

## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

### Planteil B11 Flugzeugtechnische Parameter

#### Kap.18.1

Bericht über die Festlegung von flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren für ausgewählte Schadstoffkomponenten

#### Kap.18.2

Emissionsfaktoren für Hilfstriebwerke und Emissionen durch Triebwerksanlassvorgänge

#### Kap 18.3

Flugzeugmuster und deren Triebwerksbestückung

---



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

### Planteil B11 Flugzeugtechnische Parameter

#### Kap.18.1

Bericht über die Festlegung von flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren für ausgewählte Schadstoffkomponenten

#### Kap.18.2

Emissionsfaktoren für Hilfstriebwerke und Emissionen durch Triebwerksanlassvorgänge

#### Kap 18.3

Flugzeugmuster und deren Triebwerksbestückung

---

iMA Consult GmbH  
Biebricher Allee 58  
65187 Wiesbaden



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

Planteil B11 Kap.18.1  
Flugzeugtechnische Parameter

Bericht über die Festlegung von  
flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren  
für ausgewählte Schadstoffkomponenten

Wiesbaden, 21. Juli 2004

---



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

### Planteil B11 Kap.18.1 Flugzeugtechnische Parameter

### Bericht über die Festlegung von flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren für ausgewählte Schadstoffkomponenten

---

iMA Consult GmbH  
Biebricher Allee 58  
65187 Wiesbaden



# Inhalt

	<b>Seite</b>
	<b>5</b>
0.1	6
0.2	6
0.3	7
0.4	8
<b>1</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>19</b>
4.1	19
4.1.1	19
4.1.2	24
4.2	30
4.3	34
4.4	35
<b>5</b>	<b>37</b>

<b>0.1</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abb. 4-1:	Zusammenstellung von Partikel-Emissions-Indices von trockenen Abgasstrahlen für drei verschiedene Flugzeuge/Triebwerke in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Treibstoffs [Schröder, F. et al, 2000]	20
Abb. 4-2:	Abhängigkeit der Smoke Number (Rauchzahl) relativ zu ihrem Wert bei 100% Schub vom Triebwerkschub für verschiedene Triebwerke [Petzold, A. et al, 1999]	25
Abb. 4-3:	Rußkonzentration im Abgas von Turbinentriebwerken in Abhängigkeit der Smoke Number (Rauchzahl) SN [Petzold, A. et al, 1999]	26
Abb. 4-4	Modellansatz (Var. B) für den Ruß-Emissionsfaktor als Funktion der Smoke Number (Rauchzahl)	28
Abb. 4-5	Ruß-Emissionen von zwei Flugzeug/Triebwerk-Kombinationen für einen LTO- Zyklus, Vergleich der Modellansätze Var. A und B	30
<b>0.2</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tab. 4-1	Emissionsindices für Partikelanzahl (N) und Masse von Ruß (BC) für verschiedene Flugzeug/Triebwerk-Kombinationen [Petzold, A. et al, 1999]	21
Tab. 4-2:	Wertepaare Emissionsfaktor Ruß und Smoke Number (Rauchzahl) für verschiedene Triebwerke bei Take-off-Nennleistung [Döpelheuer, A., 1997]	27
Tab. 4-3:	Basisdaten für die Vergleichsrechnung [ICAO, 2002]	29
Tab. 4-4:	Vergleichsergebnisse der zwei Modelle für die Berechnung der Ruß-Emissionen Unterteilung nach Flugphase und Beispielflugzeugen Angaben in kg Ruß	29
Tab. 4-5:	Benzol-Anteil an den von Scherer et al. [Scherer, Stefan, 1996] gemessenen Gesamtkohlenwasserstoff-Emissionen.	32
Tab. 4-6:	Emissionsindizes (EI) von Benzol, Toluol und Summe der gemessenen NMKW in mg / kg verbrannten Treibstoffs berechnet aus den $\Delta X / \Delta CO$ -Verhältnissen und EI(CO) bestimmt mit FTIR. [Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), 1997].	33
Tab. 5-1:	Zusammenfassung Ruß	37
Tab. 5-2:	Zusammenfassung Emissionsindizes für Benzol, Toluol und Xylol	38
Tab. 5-3:	Zusammenfassung Emissionsindizes für Schwefeldioxid	39

### 0.3 Abkürzungsverzeichnis

---

<b>AEI<sub>d</sub></b>	apparent emission index (related to size d)= Teilchensumme je kg Treibstoff mit 50% größer als Durchmesser d
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BC</b>	black carbon = Gehalt an Kohlenstoff infolge unvollständiger Verbrennung (wird mit Ruß gleichgesetzt)
<b>CCN</b>	cloud condensation nuclei = Kondensationskerne für die Bildung von Wolkentropfen
<b>CN</b>	condensation nuclei = Kondensationskerne (Bedingung für die Kondensation von Wasserdampf bei über 100% relativer Feuchte)
<b>CNC</b>	condensation nucleus counter = Zähler für Kondensationskerne
<b>EI(N)</b>	particle emission index = Emissionskennzahl (Anzahl Teilchen je kg Treibstoff)
<b>EI(X)</b>	mass emission index = Emissionskennzahl (für die Substanz in Klammern) Einheit: Masse der Substanz X je verbrauchter Masse Treibstoff
<b>FSC</b>	fuel sulfur content = Schwefelgehalt des Treibstoffs (Kerosin)
<b>FTIR</b>	Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometrie
<b>GSA</b>	gaseous sulfuric acid = gasförmige Schwefelsäure
<b>IATA</b>	International Air Transport Association (Internationaler Dachverband der zivilen Luftverkehrsgesellschaften)
<b>NMKW</b>	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
<b>PAK</b>	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
<b>PEI<sub>d</sub></b>	particle emission index (related to size d) = Emissionskennzahl (Anzahl Teilchen je kg Treibstoff mit 50% größer als Durchmesser d)
<b>PM</b>	particulate matter = teilchenförmige Substanzen (unspezifizierter Staub)
<b>PM<sub>n</sub></b>	PM-Fraktion mit einer 50%-igen Trennung von Partikeln mit einem Durchmesser von n µm (üblich sind die Feinstaubfraktionen PM10 und PM2,5)
<b>POM</b>	particulate organic mass = organische Partikelmasse (Stoffgruppe)
<b>SLS</b>	sea-level-static = statisch in Meereshöhe (in Verbindung mit Angaben des Schubs von Triebwerken)
<b>SN</b>	smoke number = Rauchzahl (Trübungskennzahl für Rauchdichte)
<b>TC</b>	total carbon = Gesamtgehalt an Kohlenstoff
<b>TS</b>	total sulfur = gesamte Schwefelmasse
<b>TVOC</b>	total volatile organic compounds = Summe der flüchtigen Kohlenwasserstoffe
<b>UHC</b>	unburnt hydro carbons = unverbrannte Kohlenwasserstoffe

---

**0.4 Literatur- und Quellenverzeichnis**

---

**Anderson, B.E. et al, 1998**

Airborne observations of aircraft aerosol emissions,  
1. Total non-volatile particle emission indices.  
Geophys. Res. Lett., 25, 1689-1692

**Deutsche BP AG, Hamburg, 2002**

Analysen Protokolle, Petro Lab GmbH, Speyer

**Brasseur, G.P. et al, 1998**

European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions.  
Atm. Envir. 13 Vol. 32, p.2329 – 2418

**Curtius, J. et al, 1998**

First direct sulfuric acid detection in the exhaust plume of a jet aircraft in flight.  
Geophys. Res. Lett., 25, 923-926

**Dannecker, W., 1993**

Untersuchung der Emission von Flugtriebwerken zur Bestimmung der darin  
enthaltenen Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe.  
Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg

**Deidewig, F. , 1992**

Schadstoffemissionen ziviler Flugtriebwerke am Beispiel des CFM56-3 und CF6-  
80C2. DLR-IB-325-4-92, Köln

**DLR (Hrsg. Schumann, U. et al.), 1997**

Pollutants from Air Traffic - Results of Atmospheric Research 1992-1997.  
Mitteilung 97-04, ISSN 1434-8492 Oberpfaffenhofen, Köln

**Döpelheuer, A. , 1997**

Berechnung der Produkte unvollständiger Verbrennung aus Luftfahrttriebwerken.  
DLR, Institut für Antriebstechnik, IB-325-09-97, Köln

**Döpelheuer, A. , 2000**

Aircraft Emission Parameter Modelling.  
AIR & SPACE EUROPE Vol.2, No.3 p.34 – 37

**Eickhoff, W. , 1998**

Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken.  
Umweltplanung, Arbeits -und Umweltschutz  
Heft 252 der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden

**EPA, 1999**

Evaluation of Air Pollutant Emissions from Subsonic Commercial Jet Aircraft.  
Report EPA420-R-99-013

**EUROCONTROL Experimental Centre, 2001**

Forecasting Civil Aviation Fuel Burn and Emissions in Europe  
Interim Report, May 2001 EEC Note N° 8/2001 Project APR-Z-EN  
Prepared by EUROCONTROL Experimental Centre  
[www.eurocontrol.fr](http://www.eurocontrol.fr)

**European Commission (Hrsg. Gardner, R.M.), 1998**

ANCAT/EC2 - Global Aircraft Emissions Inventories for 1991/92 and 2015.  
Report by the ECAC/ANCAT and EC working group  
Report EUR 18179, ISBN 92-828-2914-6

**Gitling, S.P. et al, 1990**

Development and characterisation of a smoke generator for the calibration of aerosol emissions from gas turbine engines.  
Aerosol Science and Technology, 13, 8-19

**Hagen, D.E. , 1992**

A Field Sampling of Jet Exhaust Aerosols.  
Particulate Science and Technology 10

**Hagen, D.E. et al, 1998**

Particulate sizing and emission indices for a jet engine exhaust sampled at cruise.  
Geophys. Res. Lett., 25, 1681-1684

**Hotes et al, 2000**

Quantifizierung der Reduktionspotentiale von Luftschadstoffen an und im Umkreis von Flugplätzen.  
AvioPlan GmbH, Berlin  
Forschungsbericht 298 45 774 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

**Howard, R.P. , 1996**

Experimental characterization of gas turbine emissions at simulated flight altitude conditions.  
AEDC-TR-96-3, Arnold Engineering Development Center tech. Report, NTIS

**Hüttig, G. et al,1999**

Entwicklung und Erprobung einer Methode zur Bewertung der Schadstoffimmissionen in der Umgebung von Flugplätzen.  
Band I: Ermittlung der Emissionen Institut für Luft- und Raumfahrt TU Berlin 1999  
Forschungsbericht 294 43 689 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

**ICAO, 1995 - 2003**

International Civil Aviation Organisation  
Engine Exhaust Emission Data Bank, DOC 9646-AN 943  
First edition 1995 und laufende Aktualisierung über Internet, [www.icao.org](http://www.icao.org)

**Penner, J.E. et al, 1999**

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC  
Special Report: Aviation and the Global Atmosphere  
ISBN 92-9169

**Kommission zur Abwehr des Fluglärms 4. Seminar Luftschadstoffe, 2000**

Toxikologische und umweltmedizinische Betrachtung von Luftschadstoffen im Flughafennahbereich, Frankfurt 9. Mai 2000

**Kärcher, B. et al, 1997**

Physicochemistry of aircraft generated liquid aerosols, soot, and ice particles. I. Model description II. Comparison with observations and sensitivity studies. DLR-IPA Report No. 90, 91, ISSN 0943-4771 Oberpfaffenhofen 1997 und in: J. Geophys. Res. 103, 17111-17147

**Kärcher, B. et al, 1998**

Ultrafine aerosol particles in aircraft plumes : Analysis of growth mechanisms. Geophysical research letters 25 (15) p.2793 – 2796

**Kärcher, B. et al, 2000**

On the unification of aircraft ultrafine particle emission data. DLR-IPA Report No. 132, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen

**Konopka, P. et al, 1997**

Particulate emissions of commercial jet aircraft under cruise conditions DLR-IPA Report No. 93, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen

**Umweltministerkoferenz, 1992**

Entwicklung von Beurteilungsmaßstäben für kanzerogene Luftverunreinigungen, 1992 Im Auftrag der Umweltministerkoferenz, MURL

**Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein- Westfalen, 1997**

Genehmigung zur Änderung der Betriebsregelung für das Parallelbahnsystem des Verkehrsflughafen Düsseldorf (612-31-21/3 DL), Düsseldorf

**NASA, 1999**

Workshop on Aerosols and Particulates From Aircraft Gas Turbine Engines Conference Proceedings Cleveland, Ohio July 1997 NASA/CP-1999-208918 1999

**Paladino, J.D, 1997**

The efficiency of the smoke meter at characterising engine emissions NASA contractor Report 202317

**Paladino, J.D. et al, 1999**

Observations of Particulates within the North Atlantic Flight Corridor. S. 121-137 in Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT 2) Environment and Climate Research Progr., Final Report EUR 18877 EN Air Pollution Research Report 68, ISBN 92-828-6197-X, Brussels

**Petry, H. et al, 1997**

Chemical Conversion of Aircraft Emissions in the Dispersing Plume: Calculation of Effective Emission Indices.  
DLR-IPA Report No. 80, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen

**Petzold, A. et al, 1997**

Jet engine exhaust aerosol characterization.  
DLR-IPA Report No. 86, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen

**Petzold, A. et al, 1999**

In situ observations and model calculation of black carbon emission by aircraft at cruise altitude.  
DLR-IPA Report No. 113, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen  
und in: J. Geophys. Res. 104, 22171-22181

**European Commission (Hrsg. Schumann, U.), 1997**

Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT).  
Environment Research Programme, Final Report EUR 16978 EN  
Air Pollution Research Report 58, ISBN 92-827-8569-6, Brussels

**NATO-RTO Research and Technology Organization, 1998**

RTO Meeting Proceedings 14  
from AVT Panel Symposium, Lisbon Oct 1998,  
Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels.  
ISBN 92-837-0009-0 Hull, Canada

**Schäfer, K., Jahn, C., Haus, R., Heland, J. , 2002**

Messung der Emissionsindizes in Flugzeugabgasen auf Flughäfen und Fackelabgasen mittels FTIR-Emissionsspektrometrie.  
Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 62, 5 (2002), 209-213.

**Scherer, Stefan Dissertation Nr. 11268 1996 ETH Zürich**

Volatile organic compounds in the air of the environment of the airport Zürich-Kloten and risk assessment of these pollutants.  
Scherer et al. 6. VOC Emissions of Civil Aircraft in the Simulated Landing Take-Off (LTO) Cycle and During the Stopover at an Airport

**Schröder, F. et al, 2000**

In-situ studies on volatile jet exhaust particle emissions - Impacts of fuel sulfur content and environmental conditions on nuclei-mode aerosols.  
DLR-IPA Report No. 131, ISSN 0943-4771, Oberpfaffenhofen

**Schumann, U. et al, 1999**

Pollution from aircraft emissions in the North Atlantic flight corridor: Overview on the POLINAT projects.  
DLR-IPA Report No. 122, ISSN 0943-4771 Oberpfaffenhofen 1999  
und in: J. Geophys. Res. 105, 3605-3631

**Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), 1997**

In situ-Bestimmung der Emissionen von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen aus Flugzeugen in der oberen Troposphäre. Leistungen und Ergebnisse, Jahresbericht 1997, Garmisch Partenkirchen

**Spicer, C.W., 1992**

Chemical Composition of Exhaust From Aircraft Turbine engines.  
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 114, 111-117  
Jan 1992

**Spicer et al, 1994**

Ann. Geophysicae, 12, 944 – 955

**Tesseraux, I. et al, 1998**

Flugzeugtreibstoffe und Flugzeugemissionen - Eine Risikocharakterisierung für Flughafenanwohner am Beispiel des Hamburg Flughafens.  
Zent.bl. Hyg. Umweltmed. 201

**Umweltbundesamt Berlin**

Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 1.2

**Visser, W.P.J. et al,**

Modeling the Effects of Operating Conditions and Alternative Fuels on Gas Turbine Performance and Emissions.  
National Aerospace Laboratory of the Netherlands

**Visser W.P.J. et al, 2000**

GSP - a generic-oriented gas turbine simulation environment.  
ASME Turbo Expo 2000, München

**Wayson, R., 2002**

Airport Air Quality. AERONET-workshop, Warschau

**Weyrauther, G. et al, 1999**

Schadstoffimmissionen Gutachten im Rahmen des Antrags auf Planfeststellung für den Ausbau des Flughafens Berlin-Schönefeld. Band M10 (1999)  
TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH

**Flughafendirektion Zürich**

Flugzeuge und Lufthygiene, Umweltschutz, [www.zurich-airport.ch](http://www.zurich-airport.ch), 1999 / 2002

# 1 Aufgabenstellung

Im Zusammenhang mit dem Planfeststellungsverfahren für den Ausbau des Frankfurter Flughafens wird die Immissionsbelastung durch den Flugverkehr anhand von Ausbreitungsrechnungen ermittelt. Eine Grundlage für diese Ausbreitungsrechnungen sind die Emissionsdaten der Verkehrsflugzeuge. In diesem Gutachten werden flugspezifische Emissionsfaktoren für Ruß, Benzol, Toluol, Xylol, Ba(P) und SO<sub>2</sub>, entsprechend dem aktuellen Stand des Wissens, vorgeschlagen.



## 2 Datenbank für Emissionswerte

Zur Charakterisierung der Betriebszustände im bodennahen Bereich von Flughäfen wurde von der ICAO ein Start-Lande-Zyklus (ICAO LTO - Cycle) festgelegt. Dieser Zyklus umfasst den Landeanflug (Approach) unterhalb 3.000 Fuß Flughöhe, die Rollvorgänge nach der Landung und vor dem Start (Taxi in and out), die Startbeschleunigung (Take off) und den Aufstieg (Climb out) bis 3.000 Fuß Flughöhe. Diesen Betriebszuständen zugeordnet sind typische Triebwerkslastpunkte, die auch die Grundlage bilden für die nach Annex 16 Volume II festgelegten Emissionsmessverfahren. Gemessen werden von den Triebwerksherstellern die Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid (CO), die Summe der Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und die Rauchzahl (Smoke Number). Die gasförmigen Schadstoffkomponenten werden neben dem jeweiligen zeitbezogenen Kraftstoffverbrauch für jeden der 4 Lastpunkte ermittelt, die Rauchzahl ist ein über den gesamten Messzyklus integral erfasster Wert. Die so ermittelten Emissionsmesswerte sind dokumentiert in der ICAO Engine Exhaust Emission Data Bank. Diese Datenbank unterliegt einer ständigen Aktualisierung; zur Zeit sind dort Datensätze für ca. 300 unterschiedliche Triebwerke abgelegt [ICAO, 2002].

Für die übrigen Schadstoffkomponenten gibt es keine vergleichbaren Datenbanken. Man ist hier auf die Auswertung einzelner Messungen und deren Veröffentlichung angewiesen.



### 3 Relevanz nicht veröffentlichter Komponenten

In der ICAO-Emissionsdatenbank ([www.icao.org](http://www.icao.org)) sind für eine große Anzahl im Serieneinsatz befindlicher Strahltriebwerke die in den verschiedenen Betriebsphasen bei der Verbrennung von Kerosin auftretenden Emissionsmengen von HC, CO, NO<sub>x</sub> und die Rauchzahl veröffentlicht. Darüber hinaus treten bei der Verbrennung von Kerosin eine Vielzahl anderer, vor allem organischer Schadstoffe mit sehr unterschiedlicher toxikologischer Wirkung auf.

Innerhalb der von der ICAO nur summarisch erfassten Kohlenwasserstoffe weisen folgende Gruppen eine toxikologische Relevanz auf: Carbonylverbindungen (Aldehyde und Ketone), Benzol und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).

Die mengenmäßig dominierenden Alkane und deren Verzweigungen sowie die Alkohole sind toxikologisch weniger relevant.

Benzol und PAKs entstehen bei der Verbrennung durch Fragmentierung der Kohlenwasserstoffketten des Kraftstoffes. Diese Reaktionen laufen bei Temperaturen zwischen 200° und 300°C ab. Aromatische Verbindungen entstehen bevorzugt im Umfeld von unvollständigen Verbrennungen. PAKs können aber auch dort entstehen, wo organische Verbindungen nur für kurze Zeit und in einer äußerst dünnen Grenzschicht hohen Temperaturen (> 600°C) ausgesetzt werden.

Partikelförmige Emissionen werden sowohl direkt von der Schadstoffquelle emittiert oder können sich in der Atmosphäre aus gasförmigen Substanzen wie Schwefel- und Stickstoffoxiden oder Kohlenwasserstoffverbindungen durch Transformation bilden. Die Aufnahme von Wasserdampf und die Koagulation zu Clustern spielt bei der Entstehung der Partikel eine wesentliche Rolle.

Entstehung und Abbrand von Ruß in Strahltriebwerken von Flugzeugen sind sehr komplexe Vorgänge. Eine konkrete Berechnung der Emissionen für unterschiedliche Triebwerke für verschiedene Betriebszustände wird sehr erschwert durch:

- Inhomogenitäten innerhalb der Brennkammer
- unzulängliche Kenntnis der Brennkammergeometrien
- unzulängliche Kenntnis der Parameter des Einspritzsystems
- lückenhafte Messwertkollektive

Auch in Zukunft erscheint es nach Aussage von Fachleuten praktisch unmöglich, den Mechanismus der Rußentstehung in Triebwerksbrennkammern vollständig zu beschreiben. Dies liegt an der extrem starken Abhängigkeit von der Temperaturverteilung bei den verschiedenen Vorgängen: Pyrolyse, Radikalbildung, Nukleation, Oberflächenwachstum, Koagulation und Alterung. Die Rußoxidation selbst ist ebenfalls noch nicht ganz geklärt.

Diese Verhältnisse bedingen teilempirische Korrelationen bei der Ableitung von Emissionsfaktoren.

Aber auch diese teilempirischen Korrelationen führen zu aussagekräftigen Angaben von Emissionsfaktoren, um die Schadstoffbelastung mit ausreichender Sicherheit prognostizieren zu können



## 4 Emissionsfaktoren als Basis für Ausbreitungsrechnungen

### 4.1 Ruß

#### 4.1.1 Literatur-Übersicht

Die Bildung von Partikeln und Ruß schwankt je nach Konstruktion der Brennkammern des Triebwerks und deren Betriebsdrücken und -temperaturen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Partikelbildung hat der Schwefelgehalt im Treibstoff. Der überwiegende Teil des Schwefels wird als Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$  emittiert, das unmittelbar durch Oxidationsprozesse in den Brennkammern der Triebwerke entsteht. Mit den gleichzeitig auch freigesetzten OH-Radikalen kann das  $\text{SO}_2$  im Abgasstrahl zu  $\text{SO}_3$  reagieren und bei vorhandenem Wasserdampf gasförmige Schwefelsäure bilden. Diese wurde messtechnisch bei Flugzeugen am Boden nachgewiesen. Diese Aerosol-Partikel sind flüchtig und werden über die Betrachtung des  $\text{SO}_2$  auch hinsichtlich der Folgeprodukte in die Beurteilung einbezogen.

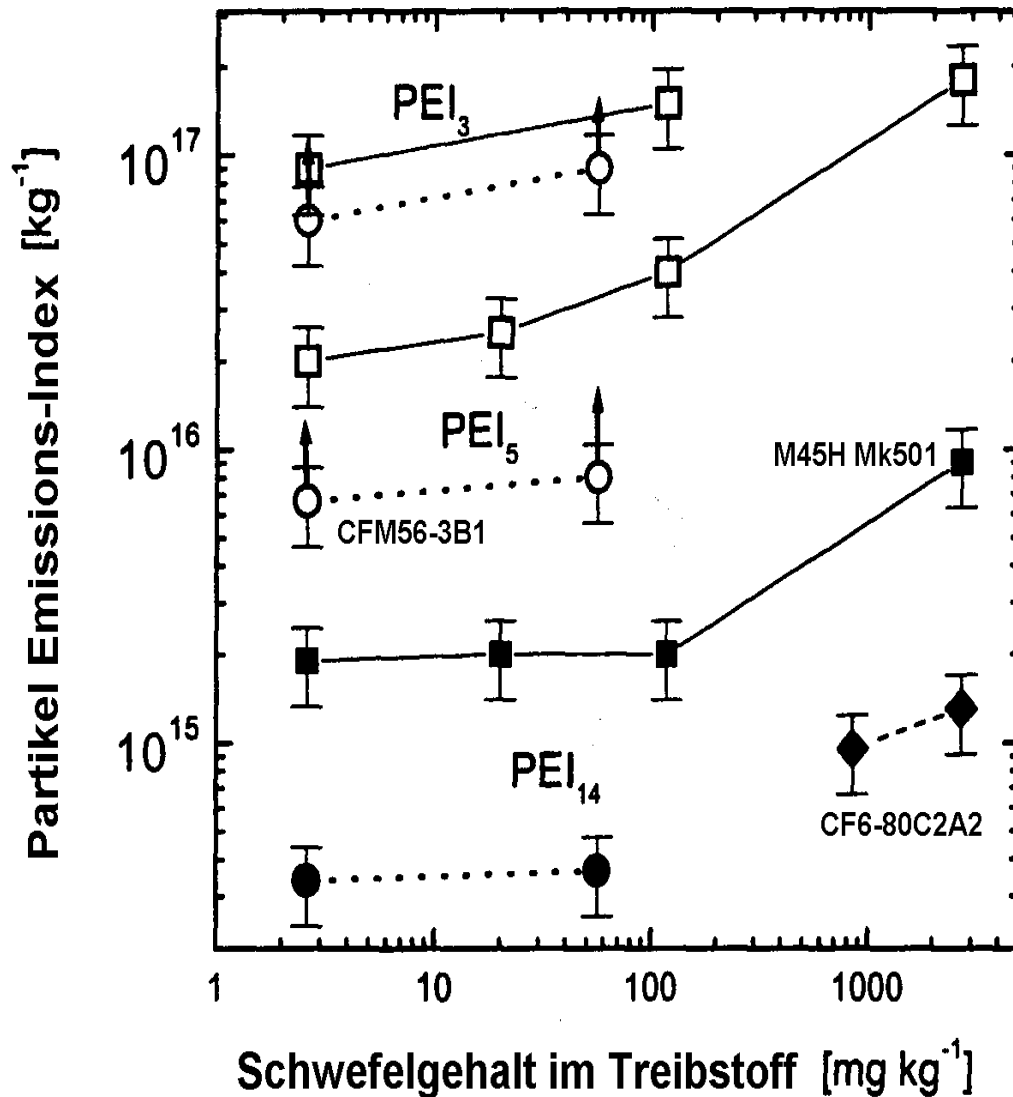
Hohe Schwefelgehalte des Treibstoffs fördern i.a. die Partikelbildung, auch die Bildung der nichtflüchtigen Ruß-Partikel. Typische Emissionskonzentrationen im Reiseflug werden mit  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  angegeben [Curtius, J. et al, 1998]. Unter Annahme von kugelförmigen Ruß-Partikeln (im Gegensatz zu den üblicherweise auftretenden Ketten und unförmigen Zusammenballungen) wurden Oberflächendichten von  $1,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$  abgeleitet. Abb.4-1 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der Partikelzahl vom Schwefelgehalt.

Nach [Penner, J.E. et al, 1999] spielt die Aerosol-Massenkonzentration (Sulfat- und Ruß-Aerosol) auch im Zeithorizont 2050, damit auch weiter über den hier relevanten Planungszeitraum hinaus, trotz Zunahme mit dem Treibstoffverbrauch gegenüber den bodengebundenen Quellen nur eine untergeordnete Rolle.

In [Schumann, U. et al, 1999] wird das Verhältnis von flüchtigen zu nichtflüchtigen Aerosol in Abgasfahnen mittleren Alters mit bis zu 50:1 angegeben. Die Aerosol-Größenverteilungen zeigen einen monotonen exponentiellen Abfall der Teilchendichte zwischen 4 und 300 nm.

Die Ergebnisse sind insbesondere für den bodenfernen Bereich (Reiseflughöhe) ermittelt worden.

Abb. 4-1: Zusammenstellung von Partikel-Emissions-Indices von trockenen Abgasstrahlen für drei verschiedene Flugzeuge/Triebwerke in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Treibstoffs [Schröder, F. et al, 2000]



**Erläuterungen zu Abbildung 4.1:**

Der Kurvenparameter  $PEI_n$  beschreibt die Minimum-Partikelgrößen (n in nm). Die Fehlerbalken geben die Unsicherheitsbereiche an.

Für die Triebwerke M45H Mk501 (durchgezogene Linie) und CFM56-3B1 (punktierte Linie) sind die Partikelindices für die Partikelgrößen  $>3\text{nm}$  ( $PEI_3$ ),  $>5\text{nm}$  ( $PEI_5$ ) und  $>14\text{nm}$  ( $PEI_{14}$ ) dargestellt. Für das Triebwerk CF6-80C2A2 (gestrichelte Linie) liegen Messungen nur für  $PEI_{14}$  vor.

Emissionsfaktoren für Langstreckenflugzeuge zeigen für die Gesamteilchenzahl Schwankungen abhängig von der Triebwerksbestückung ( $1 \text{ bis } 20 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ ). Der Anteil der nichtflüchtigen Partikel ist mit  $0,3 \text{ bis } 1,5 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$  (am häufigsten zwischen  $0,3 \text{ und } 0,6 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ ) nicht ganz so stark triebwerksabhängig.

[Schröder, F. et al, 2000] widmet sich insbesondere den flüchtigen Partikeln in Reiseflughöhe. Bei sehr niedrigem Schwefelgehalt des Treibstoffs ( $<0,01\%$ ) dominieren Nichtmethan-kohlenwasserstoffe gegenüber den Sulfaten die flüchtigen Partikel. Diese sind weit weniger vom Triebwerkstyp abhängig als die nichtflüchtigen Ruß-Partikel.

Bei Ruß-Partikeln (90 Massen-% sind Kohlenstoff, der Rest angelagerte Verbrennungsrückstände) ergaben sich für die moderne Triebwerksausrüstung eines der Testflugzeuge um Faktor 4 bis 5 geringere Emissionen ( $4 \times 10^{14} \text{ kg}^{-1}$ ) als bei dem mit älteren Triebwerken ausgerüsteten ( $1,8 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ ).

Die meisten flüchtigen Aerosol-Partikel liegen im Durchmesser bei mehr als  $0,01\%$  Schwefelgehalt des Brennstoffs im Bereich unterhalb 10 nm.

Die flüchtigen Partikel-Emissionen im untersten Kilometer der Atmosphäre (bodennaher Raum) werden mit rund  $1,1 \times 10^{16} \text{ kg}^{-1}$  beziffert.

In [Petzold, A. et al, 1999] wird für EI(BC) ein Wert von  $0,038 \text{ g kg}^{-1}$  als globaler Flottenmittelwert angesetzt. Es wurde eine starke Abhängigkeit vom Triebwerk und seiner Bauart bzw. seinem Entwicklungsstand festgestellt.

Tab. 4-1: Emissionsindices für Partikelanzahl (N) und Masse von Ruß (BC) für verschiedene Flugzeug/Triebwerk-Kombinationen [Petzold, A. et al, 1999]

Triebwerk	Zertifikat von	EI(N) $\text{kg}^{-1}$	EI(BC) $\text{g kg}^{-1}$
M45H Mk501	1971	$1.7\text{E}+15$	0.100
CFM56-3B1	1983	$3.5\text{E}+14$	0.011
CF6-80C2A2	1985	$6.0\text{E}+14$	0.023

gemessen bei Reiseflugbedingungen

Der Bereich gemessener spezifischer Emissionsfaktoren für Ruß geht von  $0,0013 \text{ bis zu fast } 0,3 \text{ g kg}^{-1}$  mit einem häufigsten Bereich von  $0,01 \text{ bis } 0,1 \text{ g kg}^{-1}$ .

Moderne Triebwerke emittieren mengenmäßig weniger und kleinere Partikel. Bei sehr niedrigem Schwefelgehalt des Treibstoffs ( $\leq 0,002\%$ ) machen die nichtflüchtigen Partikel, in erster Linie Ruß, etwa  $85\%$  des Gesamtaerosols jenseits  $10 \text{ bis } 15 \text{ nm}$  Durchmesser aus.

Das mittlere Ruß-Partikel hat bei einer angenommenen Dichte von  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  einen (äquivalenten) Durchmesser von  $35 \text{ nm}$  und eine Masse von  $3,2 \times 10^{-17} \text{ g}$ .

Unterhalb von  $10 \text{ nm}$  Durchmesser besteht die fast komplette Masse der nichtflüchtigen Partikeln aus Ruß.

Wertebereiche für den Rußemissionsindex EI(BC) von  $0,016 \text{ bis } 0,064 \text{ g kg}^{-1}$  werden auch für andere Partikelanzahlmessungen anderer Autoren bestätigt.

In [KÄRC00] wird als globales Mittel des Schwefelgehalts im Treibstoff (FSC) ein Bereich von  $0,4 \text{ bis } 0,6 \text{ g kg}^{-1}$  angegeben. Es geht in diesem Artikel vor allem um das flüchtige Aerosol. Die Anzahl kleinster Partikel ( $\text{AEI}_d$  mit  $d=7 \text{ nm}$ ) liegt bei

FSC=0,5 g kg<sup>-1</sup> und einem Alter des Abgasstrahls von weniger als einer Min. bei  $2 \times 10^{17}$  kg<sup>-1</sup> entsprechend etwa 80 mg POM kg<sup>-1</sup> (organ. Partikelmasse).

[Hagen, D.E., 1992] enthält Messergebnisse über Größenverteilung des emittierten Aerosols. Der Größenbereich liegt zwischen 14 und 200 nm mit einem Maximum bei 30 bis 50 nm.

[Petzold, A. et al, 1997] nennt für den älteren Triebwerktyp M45H Mk501 Rußmassen von über 0,6 g kg<sup>-1</sup> und Teilchenanzahlen von  $1,7 \times 10^{15}$  kg<sup>-1</sup> bei Reiseflugleistung bei nur sehr geringer Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Treibstoffs.

Die Rußpartikel wiesen Durchmesser von 45 nm auf und wuchsen als Koagulat auf 180 nm an. (Dies ist immer noch sehr weit entfernt von den Größengrenze der Feinstaubfraktionen PM2,5 und erst recht PM10.)

Das Verhältnis BC/TC (Ruß/Gesamtkohlenstoff) im Abgas wird stark von den Verbrennungsbedingungen beeinflusst. Es steigt von ca. 10% bei Leerlaufleistung bis 80% bei Reiseflugleistung an.

[Konopka, P. et al, 1997] nennt  $1 \times 10^{15}$  kg<sup>-1</sup> als die Anzahl von Rußpartikeln aus Messungen hinter modernen Großraumflugzeugen im Reiseflug.

[Kärcher, B. et al, 1997] nennt für Rußteilchen Durchmesser von einigen 10 nm bis etwa 100 nm und immissionsseitig Teilchendichten bis zu 1000 cm<sup>-3</sup>. Ansonsten wird ein physiko-chemisches Modell erläutert, das die Interaktionen zwischen Aerosol, Ruß und Eispartikeln beschreibt.

Schwefel im Treibstoff bewirkt hauptsächlich ultrafeine flüchtige Partikel mit mittleren Durchmessern von 2 bis 20 nm im frühen Stadium des Abgasstrahls. Die Sulfatteilchenanzahl liegt bei  $10^{16}$  bis  $10^{17}$  kg<sup>-1</sup> und übertrifft damit die Rußteilchenanzahl um einen Faktor 10 bis 100.

Die Massenverhältnisse sehen dagegen umgekehrt aus, wie Vermessungen des nichtflüchtigen Aerosols bei einem A 340 zeigten. Hier lagen 80% der Masse als Rußpartikel und 20% als Schwefelsäuretropfen vor.

[Paladino, J.D. et al, 1999] führt für den Parameter EI(N) einen Messwert von  $1,1 \times 10^{13}$  kg<sup>-1</sup> an. Dieser recht niedrige Wert steht in Übereinstimmung mit Werten aus anderen Untersuchungen [Hagen, D.E. et al, 1998], [Howard, R.P., 1996], [Anderson, B.E. et al, 1998].

[Brasseur, G.P. et al, 1998] nennt zusammenfassend Maxima der Partikelspektren zwischen 30 und 100 nm. Die Messung der Rauchzahl nach ICAO-Zertifizierung (smoke number) gibt nach [Gitling, S.P. et al, 1990] und [Paladino, J.D., 1997] nur die Anzahl der großen Partikel wieder und nicht die Gesamtzahl aller.

Moderne Triebwerke emittieren mit 0,01 bis 0,1 g kg<sup>-1</sup> weniger Masse an Ruß als ältere Typen, jedoch mehr kleinere Ruß-Partikel. Für ältere Triebwerke liegt der Massenausstoß teilweise deutlich höher (bis Faktor 20).

In [NASA, 1999] wird die Abhängigkeit der Partikelanzahl vom Schwefelgehalt des Brennstoffs mit  $10^{15}$  kg<sup>-1</sup> für fast schwefelfreien Treibstoff und  $3 \times 10^{17}$  kg<sup>-1</sup> für einen hohen S-Gehalt beschrieben. Die Messbeispiele zeigen eine Abhängigkeit des

Anteils der nicht-flüchtigen Partikel (maßgeblich Ruß) an der Gesamtzahl. Bei hohen Gesamtpartikelanzahlen ( $> 4 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ ) eines Triebwerks wird ein Anteil von 40% Ruß festgestellt, bei einem anderen Triebwerk mit nur etwa  $10^{15} \text{ kg}^{-1}$  ein Anteil von etwa 85%.

Auch in [DLR (Hrsg. Schumann, U. et al, 1997)] wird festgestellt, dass die Anzahl kleiner Schwefelsäure-Partikel stark mit dem Schwefelgehalt des Treibstoffs ansteigt. Die Anzahlen liegen zwischen  $10^{15}$  und  $10^{17}$  je kg Treibstoff.

Die Berücksichtigung von flüchtigen Partikeln, führt ggf. zu einer mehrfachen Zählung von Teilstoffströmen aus dem Triebwerk. Das in der Brennkammer entstehende Schwefeldioxid wird rechnerisch über den Schwefelgehalt des Treibstoffs ermittelt. Die sich überwiegend durch Oxidation des Schwefeldioxids bildenden Schwefelsäure-Partikel werden dann nochmals dem Partikelstrom als Feinstaub (PM10) zugerechnet.

An sich gelten die für Schwefeldioxid herangezogenen Beurteilungs- und Prüfwerte für diese gasförmige Komponente und alle sich daraus bildenden Folgeprodukte.

Die Schwefelsäure-Partikel nehmen bei ihrem Transport Wasserdampf auf und nehmen in Durchmesser und Gewicht zu. Diese zeitabhängige Teilchenmasse kann dann jedoch nicht als Partikelstrom gewertet werden.

In [NATO-RTO Research and Technology Organization, 1999] werden für den Idle-Schub von einer B737 bzw. B747 als Emissionsfaktor für Ruß Werte von unter  $0,01 \text{ g kg}^{-1}$  genannt.

Neben den Rußpartikeln, die als Folge einer unvollständigen Verbrennung entstehen, können sich auch zusätzlich durch chemische Reaktionen Aerosole im Abgas der Triebwerke bilden. So reagiert beispielsweise ein kleiner Teil der  $\text{SO}_2$ -Emissionen zunächst in Verbindung mit OH zu  $\text{SO}_3$  und anschließend mit atmosphärischem Wasserdampf aus der Verbrennungsreaktion im Abgasstrahl zu  $\text{H}_2\text{SO}_3$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  woraus sich im weiteren sehr schnell Aerosole bilden. Die Reaktionszeit liegt dabei unter 0,1s. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass ca. 5-10% des im Kerosin enthaltenen Schwefels durch die Verbrennung und die anschließenden Reaktionen in Sulfatteilchen umgewandelt werden [Kärcher, B. et al, 1998]. Daneben können sich weitere Partikel aufgrund chemischer Reaktionen zwischen  $\text{NO}_x$  und OH bilden. Solche sekundären Aerosole werden bisher bei den Emissionsberechnungen nicht berücksichtigt, da bisher keine ausreichend wissenschaftlich gesicherten Aussagen veröffentlicht sind [Penner, J.E. et al, 1999].

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes zur Entwicklung eines Modells für die Berechnung der Schadstoffimmissionen in der Umgebung von Flugplätzen verwenden Hüttig et al. [Hüttig, G. et al, 1999] einen einfachen nur verbrauchsproportionalen Ansatz für den Rußemissionsfaktor von  $0,038 \text{ g C pro verbranntem kg Kerosin}$ . Zur Bestätigung werden Messergebnisse aus dem BMBF Forschungsprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“ zitiert, die im Bereich von  $0,01$  bis  $0,2 \text{ g Ruß/kg Kerosin}$  liegen.

Von Döpelheuer [Döpelheuer, A., 2000] wurden schließlich mit der sogenannten Korrelationsmethode Emissionsindizes für alle Phasen eines Fluges berechnet. Ausgehend von den in der ICAO Datenbank [ICAO, 2002] gespeicherten Rauchzahlen bzw. den hieraus abgeleiteten Ruß-Emissionsfaktoren für den Triebwerksbetrieb am Boden, werden mit Hilfe von Korrelationsfunktionen anhand von Referenz-Parametern die Emissionsfaktoren für die veränderte Situation errechnet.

Solche Referenz-Parameter sind der Gasdruck am Brennkammer-Eintritt, die Flammentemperatur und das Treibstoff-Luft-Verhältnis.

In [Döpelheuer, A., 2000] sind nach dieser Methode bestimmte Ruß-Emissionsfaktoren für den Flug einer A340-300 ausgestattet mit CFM56-5C2 Triebwerken über eine Strecke von 4000km (Machzahl 0,82; Ladefaktor 80% plus Treibstoffreserve) angegeben

von: EI(Ruß) bei Taxi in/out <0,01g/kg  
EI(Ruß) in Flugphase 0,012 – 0,02g/kg

Hotes et al. [Hotes et al., 2000] gehen bei ihren Untersuchungen zur Quantifizierung der Reduktionspotentiale von Luftschadstoffen an Flughäfen davon aus, dass für die Berechnungen der derzeitigen Rußemissionen aus Strahltriebwerken für alle Phasen des LTO-Zyklus verbrauchsabhängige Emissionsindizes im Bereich von 0,01 – 0,5gC pro kg Kerosinverbrauch verwendet werden können, wie auch von [Penner, J.E. et al, 1999] vorgeschlagen wird.

R. Wayson [Wayson,R., 2002] berichtet auf dem AERONET–Workshop, 2002 in Warschau über seinen Modell-Ansatz für die Berechnung eines Ruß-Emissionsfaktors für Strahltriebwerke aus der Rauchzahl

$EI(BC) \text{ in g / kg} = 7,75 \times 10^{-4} (SN)^{1,8}$   
für SN = 12 ergibt sich hiermit ein EI (BC) = 0,068 g / kg

#### 4.1.2 Vorschlag eines Emissionsmodells für Ruß

Da der Zusammenhang von Rauchzahl (Smoke Number) und EI(BC) nicht ausreichend geklärt erscheint, die Rauchzahl (Smoke Number) stark von großen Teilchen bestimmt wird und auch für viele Triebwerke dieser Parameter nicht vorliegt, bieten sich zwei Varianten als Vorgehensweise für die Berechnung der Ruß-Emissionen an.

Variante A:

Verwendung eines konstanten Emissionsfaktors  $EI(BC) = 0,03 \text{ g Ruß / kg Treibstoffverbrauch}$  entsprechend  $5 \times 10^{14}$  Partikel von je  $6 \times 10^{-17} \text{ g}$  Masse.

Variante B:

Verwendung eines exponentiellen Ansatzes für den Zusammenhang zwischen Smoke Number (Rauchzahl) und Rußkonzentration. Dieser Ansatz wird im folgenden abgeleitet:

Die Smoke Number (Rauchzahl) liegt entsprechend den Angaben in der Literatur für Take Off-Schub am Boden im Bereich 4 bis 22 mit einem Mittelwert von etwa 12. Abb. 4-2 zeigt für einige Triebwerke die Smoke Number (Rauchzahl) in Abhängigkeit des Triebwerksschubs. In nur wenigen Untersuchungen wird die Smoke Number (Rauchzahl) mit der Rußkonzentration im Abgasstrahl korreliert (vgl. Abb. 4-3).

Abb. 4-2: Abhängigkeit der Smoke Number (Rauchzahl) relativ zu ihrem Wert bei 100% Schub vom Triebwerksschub für verschiedene Triebwerke [Petzold, A. et al, 1999]

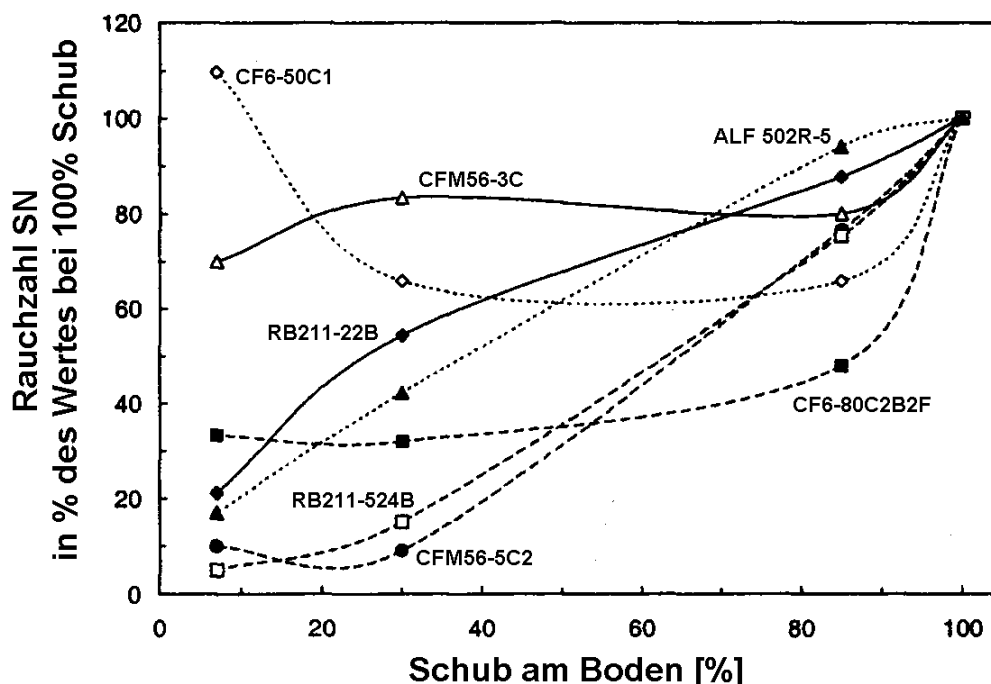
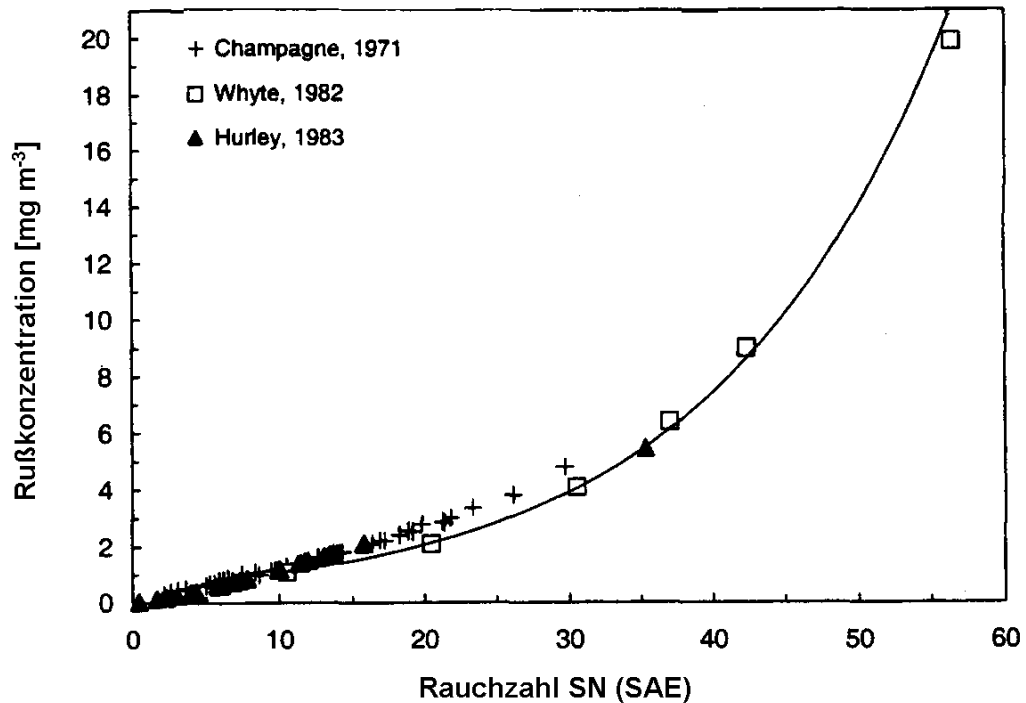


Abb. 4-3: Rußkonzentration im Abgas von Turbinentriebwerken in Abhängigkeit der Smoke Number (Rauchzahl) SN [Petzold, A. et al, 1999]



Aus Angaben von [Döpelheuer, A., 1997] lassen sich für einige Triebwerke zusammen mit den Werten ihrer Smoke Number (Rauchzahl) aus der ICAO-Datenbank [ICAO, 2002] Wertepaare für Ruß und Smoke Number (Rauchzahl) aufstellen (Tab.4-2) und in einen funktionalen Zusammenhang bringen.

Tab. 4-2: Wertepaare Emissionsfaktor Ruß und Smoke Number (Rauchzahl) für verschiedene Triebwerke bei Take-off-Nennleistung [Döpelheuer, A., 1997]

Triebwerk	EI(BC) [g/kg]	SN
JT3D-3B *	0.829	14.3
JT8D-15	0.101	15.7
RB211-22B	0.089	14.7
RB211-524B	0.100	14.3
CF6-50 C2/E2	0.020	4
ALF 502R-5	0.063	13.5
CF6-80 C2B1F	0.037	7.1
CFM56 3B2	0.025	12
PW 4460	0.043	8.3
CFM56 5C2	0.052	11.1

\* dieses Triebwerk aus den frühen 60er Jahren wird wegen sehr geringer Häufigkeit in der heutigen Flotte nicht mit einbezogen

Unter Annahme einer exponentiellen Zunahme des Emissionsfaktors für Ruß mit der optischen Trübung im Abgasstrahl, lässt sich dann folgende Ausgleichsfunktion ableiten:

$$EI(BC) = 0,025 + 0,00023 e^{SN/2,65}$$

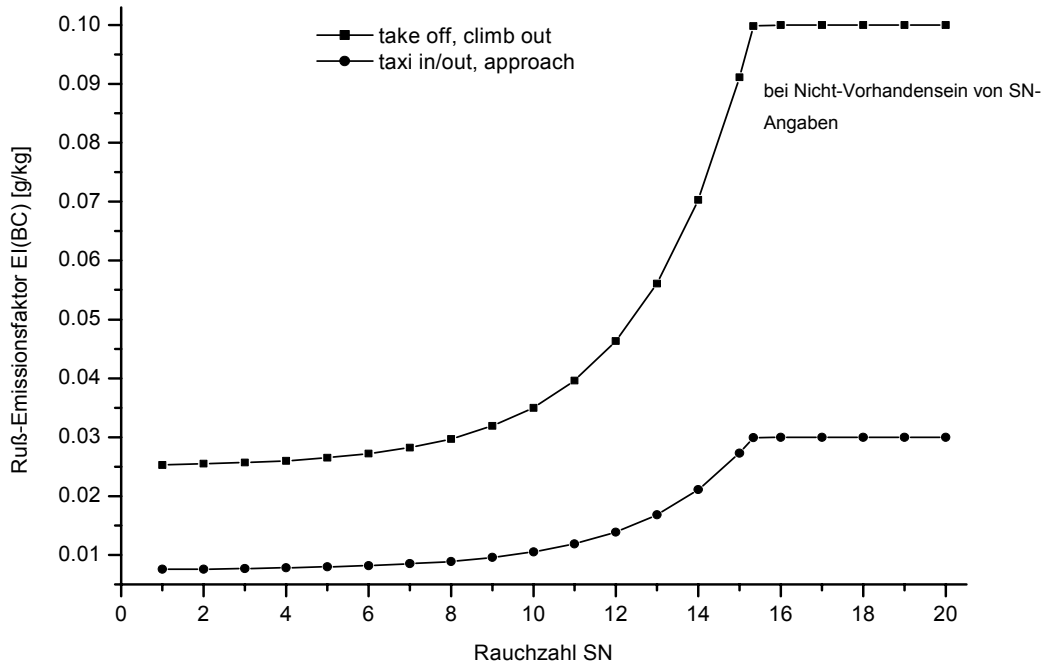
SN ist der Wert bei Nennleistung.

Die Formel bedeutet demnach, dass auch für Triebwerke mit kleinen Werten für den Parameter SN (< 2) ein Emissionsfaktor von 0,025 g kg<sup>-1</sup> Treibstoff angesetzt wird.

Zusatzannahmen:

- Soweit in der ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank SN-Werte für die verschiedenen Betriebsmodi der Triebwerke angegeben sind, sind diese mit der oben genannten Formel  $EI(BC) = f(SN)$  um zu rechnen. Grundsätzlich gilt dabei, wie auch für alle folgenden Umrechnungen als Obergrenze für Take off (T/O) und Climb out (C/O) jeweils  $EI(BC) = 0,1$  g/kg und für Approach (App) sowie Taxi (Idle) jeweils  $EI(BC) = 0,03$ g/kg.
- Sind SN(T/O) oder SN(C/O) ohne Wert oder mit 0 angegeben, so gilt:  $SN(T/O) = SN(C/O)$  und es wird EI(BC) mit der obigen Formel berechnet.
- Sind SN(T/O) und SN(C/O) beide ohne Wert oder mit 0 angegeben, so gilt die obige Formel mit  $SN = 12$ .
- Sind SN(App) oder SN(Idle) ohne Wert oder mit 0 angegeben, so gilt:  $SN(App) = SN(Idle)$  und es wird EI(BC) mit der obigen Formel berechnet.
- Sind SN(App) und SN(Idle) beide ohne Wert oder mit 0 angegeben, so wird hierfür EI(BC) mit 30% von EI(T/O)

Abb. 4-4: Modellansatz (Var. B) für den Ruß-Emissionsfaktor als Funktion der Smoke Number (Rauchzahl)



Diese differenzierte, wenn auch pragmatische Berücksichtigung des Entwicklungsverlaufs der Triebwerkgenerationen und die Kopplung an den triebwerkspezifischen Verbrauch sowie den offiziellen Parameter SN, dürfte einen Fortschritt darstellen gegenüber der in den bisherigen Ausbreitungsrechnungen bei den Flugzeugemissionen pauschalen Annahme eines festen Wertes für alle Flugzeug- bzw. Triebwerkstypen.

Einen Vergleich eines konstanten Faktors EI(BC) von  $0,03 \text{ g kg}^{-1}$  (Variante A, entsprechend  $5 \times 10^{14}$  Partikel von je  $6 \times 10^{-17} \text{ g}$  Masse) mit dem beschriebenen Ansatz (Variante B) für den LTO-Zyklus zweier typischer Flugzeugmuster und Triebwerkbestückungen zeigt Tab. 4-4; die Ausgangsdaten für die Berechnungen sind in Tab. 4-3 zusammengestellt.

Tab. 4-3: Basisdaten für die Vergleichsrechnung [ICAO, 2002]

Flugphase	LTO-Zeiten [Min]	Fuel flow [kg/s]		Rauchzahl (Smoke Number)	
		CFM56-3B2	CF6-50E2	CFM56-3B2	CF6-50E2
Take Off	0.7	1.056	2.487	12	4.1
Climb Out	2.2	0.878	1.975	10	2.7
Approach	4	0.314	0.66	3	2.7
Taxi	26	0.119	0.215	2	4.5

*Beispiel:*

*für das Flugzeugmuster B737 mit 2 Triebwerken CFM56-3B2, Flugphase Climb Out errechnet sich mit Var. B danach:*

*Dauer der Flugphase \* Treibstoffverbrauch \* Emissionsfaktor EI(BC) aus Formel für SN=10 \* Anzahl der Triebwerke =*

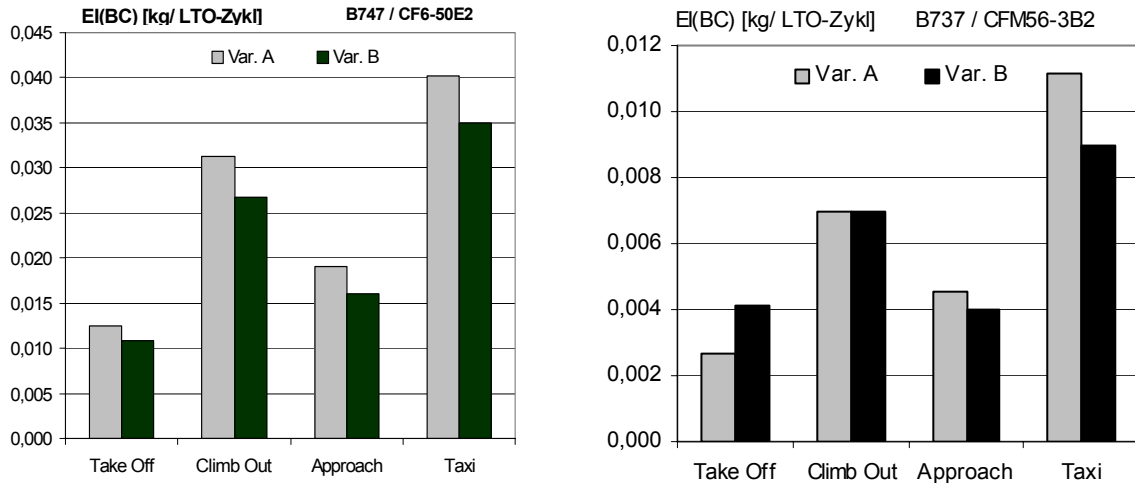
$$= 132 \text{ s} * 0,878 \text{ kg/s} * 0,035 \text{ g/kg} * 2 / 1000 = 0,0081 \text{ kg Ruß.}$$

Tab. 4-4: Vergleichsergebnisse der zwei Modelle für die Berechnung der Ruß-Emissionen Unterteilung nach Flugphase und Beispielflugzeugen Angaben in kg Ruß

Flugzeugmuster / Triebwerk	B737 / CFM56-3B2		B747 / CF6-50E2	
	Var. A	Var. B	Var. A	Var. B
Take Off	0.003	0.004	0.013	0.011
Climb Out	0.007	0.007	0.031	0.027
Approach	0.005	0.004	0.019	0.016
Taxi	0.011	0.009	0.040	0.035
<b>Gesamt</b>	<b>0.025</b>	<b>0.024</b>	<b>0.103</b>	<b>0.089</b>

Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Diagrammen noch verdeutlicht.

Abb. 4-5: Ruß-Emissionen von zwei Flugzeug/Triebwerk-Kombinationen für einen LTO-Zyklus, Vergleich der Modellansätze Var. A und B



## 4.2 Benzol und PAK

Die im Kerosin in geringen Mengen enthaltenen aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol und Xylol werden bei der Verbrennung des Kerosins im Strahltriebwerk je nach Betriebsmodus unterschiedlich vollkommen verbrannt. Die nicht verbrannten Anteile werden im Abgasstrahl emittiert. Eickhoff [Eickhoff, W., 1998] hat bei der Vorbereitung seiner Emissionsmessungen an Strahltriebwerken 2 Kerosinproben untersucht und dabei diese Stoffe in folgenden Mengen gefunden (Mittelwerte):

Benzol 0,4g/kg

Toluol 2,2g/kg

p-/m-/o-Xylol 3,8g/kg

In [Eickhoff, W., 1998] sind die Ergebnisse von umfangreichen Emissionsmessungen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken veröffentlicht. Diese Messreihen bilden die wesentliche Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für Benzol. Bei diesen Messungen wurden die organischen Komponenten qualitativ durch Hinterherfahren im Taxi-Betrieb und quantitativ durch Emissionsmessungen am Triebwerksprüfstand der Deutschen Lufthansa ermittelt. Bei den Emissionsmessungen wurden parallel die im ICAO-Zyklus gemessenen Abgaskomponenten mit erfasst, um die Repräsentanz des Messverfahrens zu gewährleisten.

Charakteristisch bei allen Emissionsmessungen war die relativ große Schwankungsbreite bei Benzol, sowohl bei den Einzelmessungen am gleichen Triebwerk als auch beim Vergleich unterschiedlicher Triebwerke.

Erwartungsgemäß müssten die höchsten spezifischen Benzolwerte im Lastzustand Idle (Taxi) auftreten, da dort aufgrund des schlechteren Ausbrandes auch die höchsten spezifischen Kohlenwasserstoffwerte gemessen werden. Für die leistungsstärkere Triebwerksgruppe (CF6-50) ließ sich dieser erwartete Trend messtechnisch bestätigen, bei der leistungsschwächeren Triebwerksgruppe (CFM56-3) traten die höchsten spezifischen Benzolwerte in den Teillastzuständen Climb Out und Approach auf, obwohl die Kohlenwasserstoffwerte den „normalen“ Trend zeigen. Eine Begründung für diese diametral unterschiedliche Tendenzen konnte bisher noch nicht erbracht werden. Offensichtlich haben Parameter wie Brennraumgeometrie, Verweilzeiten und Temperaturprofile einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffgruppen, der bisher noch nicht hinreichend erforscht ist.

Scherer et al. [Scherer, Stefan, 1996] berichten über die Untersuchung zusätzlicher bisher von ICAO nicht berücksichtigter Emissionsquellen.

Aus diesen Ergebnissen wird bei der gemeinsamen (summarischen) Vermessung von Triebwerksstart (4-5s) und Warmlaufphase (6-11min) der Anteil des beim Triebwerksstart unverbrannt emittierten Kerosins, entsprechend dem Treibstoffverbrauch in dieser Zeit (ca.500kg/h [Eickhoff, W, 1998]), herausgerechnet. Damit ergeben sich für die einzelnen untersuchten Triebwerke die in Tab. 4-5 angegebenen Emissionsmengenverhältnisse (Benzol- und Toluol-Anteil an der emittierten Gesamt-Kohlenwasserstoff-Menge/TVOC). Zum Vergleich sind die für den LTO-Zyklus gemessenen Benzol- und Toluol-Anteile angegeben.

Die Messwerte an den Triebwerken CFM56-5C2 (2.Test) und JT9D-7R4 E für Benzol und vor allem Toluol erscheinen unplausibel hoch (siehe Tab. 4-5). Der Autor vermutet selbst, dass die Effizienz der Verbrennung (Vollständigkeit der Verbrennung) und damit die Höhe der Benzol- und Toluol-Emission nicht allein vom Typ des Triebwerks sondern vor allem von der Einstellung (Justierung) des Triebwerks bestimmt wird.

Ergänzend wurden von Scherer et al. [Scherer, Stefan, 1996] ermittelt, dass bei der Betankung die TVOC-Verdampfungsemissionen 0,6% Benzol und 1,14% Toluol enthalten.

Tab. 4-5: Benzol-Anteil an den von Scherer et al. [Scherer, Stefan, 1996] gemessenen Gesamtkohlenwasserstoff-Emissionen.

Test-Triebwerk	Aufwärmphase			LTO-Zyklus		
	Benzol % TVOC	Toluol % TVOC	Xylol % TVOC	Benzol % TVOC	Toluol % TVOC	Xylol % TVOC
PW-4460	5,5	8,5	7,9	1,8	3,2	1,1
PW-4460	2,5	6,9	6,2	2,3	6,8	3,6
CFM56-5C2	1,5	1,6	4,4	3,6	7,3	3,6
CFM56-5C2	4,4	6,1	5,4	6,1	(44,4)	13,6
JT9D-7R4E	0,8	2,5	5,3	8,4	(27,5)	10,0
APU (Normalbetr.)	1,7	9,7		1,7	9,7	
Kerosin				< 0,1		
Betankung				0,6	1,1	

In [Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), 1997] wird von 9 Messungen an einem Flugzeug bei 2 Flügen in Höhen zwischen 7600 und 9500m berichtet. Die Messungen erfolgten im Rahmen des AERONOX-Projektes und des BMBF-Verbundprojektes „Schadstoffe in der Luftfahrt“ durch Institute der DLR im Abgasstrahl eines Forschungs-Flugzeugs VFW 614 mit 2 Rolls-Royce-Triebwerken (M45H Mk501). Für die Bestimmung der Emissionen wurden Luftproben innerhalb und außerhalb der Abgasfahne gezogen und im Labor auf den Gehalt an CO und einzelnen NMKW analysiert. Außerdem wurde während des Fluges zusätzlich die CO-Emission mit Hilfe der Infrarot-Spektroskopie (FTIR) gemessen.

Aus den Labor-Analysen wurden die Konzentrationsdifferenzen für die einzelnen NMKW ( $\Delta X$ ) und für CO ( $\Delta CO$ ) berechnet. Für die einzelnen NMKW wurden dann  $\Delta X / \Delta CO$ -Verhältnisse gebildet und über die Anzahl der Messungen gemittelt. Die Konzentrationen im Abgasstrahl lagen für CO, Benzol, Toluol und die meisten der gemessenen Alkene und Alkine um etwa eine Größenordnung über den Hintergrundkonzentrationen. Für Alkane wurden in der Regel keine signifikanten Konzentrationsunterschiede beobachtet. Dieses allgemeine Verhalten ist im Einklang mit Messungen an Bodenprüfständen.

Die Emissionsindizes (EI) für die einzelnen NMKW-Substanzen wurden aus den  $\Delta X / \Delta CO$ -Verhältnissen und aus den EI(CO) nach folgender Formel berechnet:

$$EI(X) = EI(CO) * MW(X) * \Delta X / \{MW(CO) * \Delta CO\}$$

Mit: MW(X) und MW(CO) Molekulargewichte der einzelnen NMWK und CO.

In Tab. 4-6 sind die berechneten Werte für Benzol, Toluol und Summe NMWK dargestellt.

Dabei zeigt sich, dass Benzol und Toluol, die im Treibstoff (Kerosin) enthalten sind (<0,1Gew% entspr.1g/kg), nicht vollständig verbrannt und deshalb emittiert werden.

Die Ergebnisse weisen für die Kohlenwasserstoffe auf eine starke Abhängigkeit von der Triebwerkslast hin. Da die Messungen in unterschiedlichen Höhen stattfanden, kann in der beobachteten Abhängigkeit zusätzlich auch eine Druckkomponente enthalten sein. Eine starke Lastabhängigkeit stellte auch schon Spicer et al. [Spicer et al, 1994] bei Prüfstandsmessungen fest.

Ein quantitativer Vergleich der *in situ* gemessenen EI(X) mit Messungen in Prüfständen ist angesichts der unterschiedlichen Triebwerke sowie der starken Lastabhängigkeit kaum möglich. Am nächsten kommen den *in situ* – Messungen die Untersuchungen von Spicer et al. [SPIC94] an einem Triebwerk TF-39 bei 30% Last, entsprechend 80% Kompressorgeschwindigkeit. Bei diesen Bedingungen betrug EI(X) 18,9mg/kg für Benzol und 4,3mg/kg für Toluol.

Da zusätzlich zu den gemessenen NMKW mit Karbonylemissionen gerechnet werden muss, geht Slemr von einer Gesamtemission von 0,4g/kg aus.

Tab. 4-6: Emissionsindizes (EI) von Benzol, Toluol und Summe der gemessenen NMKW in mg / kg verbrannten Treibstoffs berechnet aus den  $\Delta X / \Delta CO$ -Verhältnissen und EI(CO) bestimmt mit FTIR. [Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), 1997].

Tag	16.4.1997		18.4.1997	
<b>Flughöhe [m]</b>	7640	9449	7964	9449
<b>Treibstofffluss pro Triebwerk [kg/s]</b>	0,164	0,157	0,154	0,135
<b>Kompressorgeschw.</b>	86/85%	92/93%	86/86%	87/87%
<b>Zahl der Messungen</b>	3	2	2	2
<b>EI (CO) [g/kg]</b>	16,4	15,6	16,4	16,5
<b>EI (Benzol) [mg/kg]</b>	9,04±0,28	3,39±0,10	10,15±1,88	12,04±0,87
<b>EI (Toluol) [mg/kg]</b>	2,30±0,46	0,70±0,08	2,09±0,84	2,98±0,02
<b>Summe der EI (NMKW) [mg/kg]</b>	108,30±9,7	50,10±5,4	144,40±37,8	185,00±18,0

Bei der DLR wurde die sogenannte Korrelationsmethode zur Berechnung von Emissionsindizes für spezielle Betriebssituationen, die nur schwer einer Messung zugänglich sind (z.B. die Flugphase), weiterentwickelt und angewendet [Döpelheuer, A. , 2000]. Ausgehend von den in der ICAO Datenbank [ICAO, 2002] gespeicherten Emissionsfaktoren, werden mit Hilfe von Korrelationsfunktionen anhand von Referenz-Parametern die Emissionsfaktoren für die entsprechende Situation errechnet.

Da die Kohlenwasserstoff-Emissionen die Produkte unvollständiger Verbrennung sind, sind sie in reziproker Weise mit der Verbrennungs-Effizienz gekoppelt. Diese wiederum kann zufriedenstellend korreliert werden mit dem reziproken Wert der Brennkammer-Aufladung. Die Aufladung hängt vom Volumen der Brennkammer, dem Massenstrom, der Temperatur und dem Druck der Verbrennungsluft am Eintritt in die Brennkammer ab. Für große Flughöhen wird außerdem ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der veränderten Verdampfungsbedingungen eingeführt.

Mit einem entsprechenden Modellansatz wurde von [Döpelheuer, A. 2000] für das Triebwerk CF6-50C2 bei typischen Flugbedingungen (Mach 0,8, Flughöhe 35 000 Fuß) ein Emissionsfaktor für die Summe der Kohlenwasserstoffe (HC) von 0,6 g/kg berechnet.

### **Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**

Als Leitsubstanz für die polyzyklischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wird Benzo(a)pyren angenommen, da hierfür ein Bewertungsmaßstab in Form der LAI-Krebsstudie [Entwicklung von Beurteilungsmaßstäben für kanzerogene Luftverunreinigungen, 1992] vorliegt. Erstmals wurden die Benzo(a)pyren-Emissionen an zwei militärischen Flugzeugtriebwerken (F110, F101) und dem beim Militär üblichen Kraftstoff JP-8 gemessen und in [Spicer, C.W., 1992] veröffentlicht. Aus diesen Messungen abgeleitet ergibt sich ein Emissionsfaktor von ca.  $3 \mu\text{g kg}^{-1}$ . In Hamburg wurden die Immissionsanteile der PAKs an den Gesamtkohlenwasserstoffen in unmittelbarer Umgebung der Start-/Landebahnen bestimmt [Dannecker, W., 1993]. Auch Eickhoff [Eickhoff, W., 1998] hat bei einigen Triebwerken die PAK-Emissionen quantitativ erfasst. Aus diesen beiden Messreihen ergeben sich Hinweise auf etwas höhere spezifische Emissionswerte (bis zu ca. 20%).

In Übereinstimmung mit den Planfeststellungsverfahren für den Verkehrsflughafen Düsseldorf [Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein- Westfalen, 1997] und für den Ausbau des Flughafens Berlin-Schönefeld [Weyrauther, G. et al., 1999] angesetzt Wert wird auch hier für die PAKs ein spezifischer Emissionswert von  $3,7 \mu\text{g}_{\text{BaP}}\text{kg}^{-1}$  vorgeschlagen.

### **4.3 Toluol und Xylol**

Angaben über die Mengenanteile von Toluol (Methylbenzol) und Xylol (Dimethylbenzol) im Abgas von Strahltriebwerken sind noch seltener zu finden, als für Benzol. Die Ergebnisse der entsprechenden Literaturrecherchen sind in Kapitel 4.2 zusammen mit den Werten für Benzol aufgeführt. Oftmals werden auch nur entsprechende Verhältniswerte in Bezug auf die Benzolmenge sogenannte BTX-Verhältnisse angegeben. Die in der Literatur veröffentlichten Aussagen über die Emissionsanteile innerhalb der BTX- Gruppe (Benzol, Toluol, m-/p-/o-Xylol) geben ein völlig widersprüchliches Bild wie auch Tab. 5-2 zeigt.

So berichtet [Eickhoff, W., 1998] von widersprüchlichen Messergebnissen an Kerosinproben, wo Benzol / Toluol-Verhältnisse von 1:3 jedoch auch solche von 5:1 ermittelt wurden. Das Verhältnis Benzol / Xylol wird dabei zu 1:23,8 bzw 1:22,4 ermittelt.

Für die Abgase von Strahltriebwerken wurde von Eickhoff [Eickhoff, W., 1998] aus Messungen an dem größeren Triebwerk (CF6 – 50 E2/C2) ein Mittelwert der Mengenanteile für BTX von 1:0,4:1,2 angegeben, während für die kleinere Triebwerksreihe (CFM 56-3B1) 1:1,2:0,6 ermittelt wurde. Für den Straßenverkehr wird von Eickhoff ein BTX-Verhältnis von 1:2,8:1,5 genannt. Diese Angaben streuen sehr stark. Um dennoch für die beiden toxikologisch nicht so bedeutenden Schadstoffkomponenten (Toluol und Xylol) Emissionswerte anzugeben, wurde eine andere Vorgehensweise gewählt.

Unter der Annahme der Ähnlichkeit zwischen Dieselkraftstoff und Kerosin wurden trotz der anderen Verbrennungstechnologie die Emissionswerte für PKW- Dieselfahrzeuge hinsichtlich ihres Verhältnisses von Benzol : Toluol : Xylol aus [Umweltbundesamt Berlin, 1999] ausgewertet. Berücksichtigt wurden bei dieser Auswertung nur die Betriebszustände mit hohen Leistungsstufen. Daraus abgeleitet ergibt sich ein **BTX-Verhältnis von 1 : 1 : 1**. Da dieses Verhältnis aus einer Vielzahl von Einzelmessungen abgeleitet wurde, erscheint es vertretbarer als die Abstützung auf einen singulären Messwert an einem Flugzeugtriebwerk.

#### 4.4 Schwefeldioxid

Die Menge des im Abgas eines Strahltriebwerks zu findenden Schwefeldioxids wird ausschließlich vom Schwefelgehalt des Treibstoffs (Kerosin – Jet A-1) bestimmt. Kerosin ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoffen und enthält mehr als 500 Einzelsubstanzen. Die Zusammensetzung ist abhängig vom Rohöl, vom Raffinationsprozess und vom Mischungsverhältnis der verschiedenen Raffinerie-Lieferungen. Dem Kerosin werden verschiedene Additive beigegeben (z.B. Antioxidantien und Korrosionsinhibitoren), es enthält keine Halogene.

Die Empfehlungen von ASTM (D1655-88a, 1988), IATA (Guidance Mat. 14.11.1988 Kerosene) und ICAO (Annex 16, Volume II, Appendix 4) sowie die EU-Regelung 93/12/EWG legen den Schwefelgehalt von Kerosin auf max. 0,3 Gew.% (3g/kg) fest. In der Realität liegt der Schwefelgehalt des gehandelten Kerosins üblicherweise bei <0,05 Gew.%;(<0,5g/kg).

Der Flughafen Zürich gibt auf der Basis von Daten der Lufthansa einen Schwefelgehalt des Kerosins von 0,004-0,01 Gew% (0,04 – 0,1gS/kg) an. [Flughafendirektion Zürich, 1999]

Bei der Entwicklung und Erprobung eines Modells für die Berechnung der Schadstoffemissionen in der Umgebung von Flugplätzen wird von Hüttig et al. 1999 [Hüttig et al. 1999] ein verbrauchsproportionaler Ansatz für den SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor gewählt. Von der DLR wurde für sämtliche Triebwerke ein Wert von 0,418g SO<sub>2</sub> / kg verbranntem Kerosin vorgegeben.

[Döpelheuer, A., 2000] nennt für den Schwefelgehalt von Kerosin einen globalen Mittelwert von 0,3gS/kg. Dies ist 1/10 des international erlaubten Wertes und führt zu einem mittleren EI(SO<sub>2</sub>) von ca. 0,6g SO<sub>2</sub>/kg verbranntes Kerosin.

In dem Forschungsvorhaben „Quantifizierung der Reduktionspotentiale von Luftschadstoffen an und im Umkreis von Flugplätzen“ [Hotes et al., 2000] recherchieren Hotes et al. 2000 u.a. den derzeitigen Kenntnisstand über den Schwefelgehalt im Kerosin und die daraus resultierenden Emissionen. Hotes et al. finden dabei, dass der Schwefelgehalt im Kerosin weltweit durchschnittlich bei 0,4-0,6g/kg im globalen Mittel bei 0,045 Gew% [Penner, J.E. et al., 1999] liegt. Dies ergab sich aus der Untersuchung von 1463 Kerosinproben in Großbritannien 1995. Dabei hatte 1/3 der Proben eine Konzentration unter oder um 0,01% und ca. 2/3 der Proben wiesen eine Konzentration unter 0,03% [Brasseur, G.P. et al, 1998]. In einer Untersuchung in Amsterdam wurde in 137 Kerosinproben ein durchschnittlicher Schwefelgehalt von 0,055Gew% bei einer Standardabweichung von 0,06% gefunden, was ebenfalls auf ein breites Konzentrationsspektrum hindeutet.

Der im Kerosin enthaltene Schwefel reagiert bei der Verbrennung überwiegend zu SO<sub>2</sub>. Etwa 5-10% des Schwefels in der Abgasfahne wird jedoch unmittelbar in

Sulfatteilchen ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) umgesetzt, die zu den Partikelemissionen (PM10) beitragen [Kärcher, B. et al, 1998].

In dem Projektbericht von EUROCONTROL [EUROCONTROL Experimental Centre, 2001] werden verschiedene Untersuchungen zum Schwefelgehalt von Kerosin in Großbritannien sowie an Flughäfen weltweit zitiert. Dabei wurde ein typischer Schwefelgehalt von 0,04 bis 0,05 Masse-Prozent mit einem seit 10 Jahren fallenden Trend ermittelt. Weitere Untersuchungen insbesondere an europäischen Testeinrichtungen werden mit S-Gehalten im Bereich von 0,003 bis 0,06 Masse-Prozent zitiert.

Die  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren werden üblicherweise unter der Annahme vollständiger Verbrennung des Schwefels bestimmt. Aus den in der Literatur genannten Emissionsfaktoren ermittelte EUROCONTROL [EUROCONTROL Experimental Centre, 2001] einen Mittelwert von 0,84 g/kg Kerosin.

Entsprechend dem IPCC-Bericht [Penner, J.E. et al, 1999] liegt der S-Gehalt des Kerosin derzeit im Mittel im Bereich von 0,04-0,06 Gew.%, was einen Emissionsfaktor von 0,8-1,2 g/kg Kerosin ergibt.

Nach den Recherchen des IPCC [Penner, J.E. et al, 1999] kann für die 10 Jahre von 1986-96 eine Schwefelgehalts-Trendkurve mit einem Rückgang von 6,5% festgestellt werden. Überträgt man diesen S-Gehaltstrend auf die Prognose, so ergeben sich hiermit folgende Emissionsfaktoren für die Zukunft:

1999 -- 0,86 g/kg Kerosin  
2005 -- 0,78 g/kg Kerosin  
2010 -- 0,73 g/kg Kerosin  
2015 -- 0,68 g/kg Kerosin

Eine Recherche bei der Deutsche BP AG, einem der Hauptlieferanten von Kerosin (JP A-1) an den Flughafen Frankfurt ergab aus Analyse-Protokollen zwischen dem 28.6.02 und dem 11.11.02 Schwefelgehalte von 0,002 bis 0,07 Masse-% (gemessen nach ASTM D 2622) [BP02]

## 5 Zusammenfassung und Empfehlung

In nachfolgender Tabelle werden die in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Ergebnisse zusammengefasst. Abschließend werden dann Emissionsfaktoren für die Berechnung der derzeitigen Emissionen durch den Flugbetrieb am Flughafen Frankfurt empfohlen (Eingangsgrößen für die Ausbreitungsrechnung).

Tab. 5-1: Zusammenfassung Ruß

Partikel (N)	Ruß (N)	EI(BC) g/kg	POM g/kg	Sulfat-P. g/kg	Literaturquelle
1 - 20 E15	0,3 - 1,5 E15				Schumann, U. et al., 2000
	4E14 - 1,8E15				Schröder, F. et al, 2000
		0,0013 - 0,3			Petzold, A. et al, 1999
		0,016 - 0,064			Petzold, A. et al, 1999
2 E17			0,08		Kärcher, B. et al, 2000
1,7 E15		max. 0,6		0,068	Petzold, A. et al, 1997
	1E15				Konopka, P. et al, 1997
1,1 E13					Paladino, J.D. et al, 1999, Hagen, D.E. et al, 1998, Howard, R.P., 1996, Anderson, B.E. et al, 1998
		0,01 - 0,1			Brasseur, G.P. et al, 1998
1 E15 - 3 E17					NASA, 1999
1 E15 - 1 E17					DLR (Hrsg. Schumann, U. et al.), 1997
		<0,01			NATO-RTO Research and Technology Organization, 1999
		0,038			Hüttig, G. et

Partikel (N)	Ruß (N)	EI(BC) g/kg	POM g/kg	Sulfat-P. g/kg	Literaturquelle
		0,01 – 0,2			al., 1999
		0,03			Weyrauther, G. et al., 1999
1 E14		0,015 <0,01 (taxi) 0,012 – 0,02 (im Flug)			Döpelheuer, A., 2000
		0,01 – 0,5			Hotes et al., 2000
		0,05			Wayson, R., 2002
		<b>Variante B</b>			<b>Empfehlung</b>

Die Rußbildung bei der Verbrennung im Strahltriebwerk ist ein sehr komplexer bisher leider nur ungenügend aufgeklärter Vorgang. Die inhomogenen Strömungs- und Temperaturfelder in der Brennkammer, die Auswirkungen der verschiedenen Treibstoff-Einspritzsysteme, der verschiedenen Treibstofftypen, der Brennkammer-Technologie sowie nur wenige vergleichbare Messungen machen die Bestimmung von pauschalen Emissionsindizes für Ruß im Abgas von Strahltriebwerken sehr schwierig.

Für die Berechnungen der Emissionen am Flughafen wird empfohlen, die oben abgeleitete Formel (Variante B) zur Bestimmung des EI(Ruß) aus den Smoke-Number Werten der ICAO [ICAO, 2002] zu verwenden.

Tab. 5-2: Zusammenfassung Emissionsindizes für Benzol, Toluol und Xylol

	Summe Kohlenwasserstoffe	EI Benzol		BTX - Verhältnis	Literaturquelle
	EI [g/kg]	EI [mg/kg]	% HC		
		400 (Kerosin)		1 : 3 : 23,8 1 : 0,2 : 22,4	Eickhoff, W., 1998 (Kerosin)
VOC	0,4-0,72 (Take Off)		3 - 6% (4%)	1:0,4:1,2 (CF6-50) 1:1,2:0,6 (CFM56) 1:2,8:1,5 (Straße)	Eickhoff, W., 1998 (Abgas)
		18,9		1 : 0,23	Spicer et al., 1994
TVOC			<0,1 Kerosin 0,6 Betankung 1,8 – 3,6	1 : 1,9 1:1,8-3:0,6-1,6 1 : 5,7	Scherer, Stefan, 1996

Summe Kohlenwasserstoffe		EI Benzol		BTX - Verhältnis	Literaturquelle
	EI [g/kg]	EI [mg/kg]	% HC		
			LTO 1,7 APU		
VOC	0,4	3,39 – 12,04	0,9 – 3,0	1 : 0,21/0,25	Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), 1997 (im Flug)
HC	ICAO		2,9	1 : 0,24	Weyrauther, G. et al., 1999
HC	0,6				Döpelheuer, A., 2000 (im Flug)
<b>HC</b>			<b>3,0</b>	<b>1 : 1 : 1</b>	<b>Empfehlung</b>

Es stehen nur die Ergebnisse weniger Messungen mit sehr unterschiedlichen Randbedingungen (unterschiedliche Triebwerke, - Lastzustände und – Flughöhen) zur Verfügung. Auf dieser Basis kann nur eine konservative Abschätzung zu einer vertretbaren Empfehlung führen. In diesem Sinne werden für die Berechnung der BTX – Emissionen folgende Emissionsfaktoren empfohlen:

- EI(Benzol) 3% der emittierten Gesamt-Kohlenwasserstoffmenge pro kg Treibstoff-Verbrauch {EI(Benzol) = 0,03 \* EI(Summe KW)}
- BTX-Verhältnis = 1 : 1 : 1

Tab. 5-3: Zusammenfassung Emissionsindizes für Schwefeldioxid

Schwefelgehalt im Kerosin		SO <sub>2</sub> im Abgas		Literaturquelle
g/kg	Gew%	g/kg	Gew%	
	< 0,3			ASTM, IATA, ICAO, EU
		0,418		Hüttig, G. et al., 1999
0,04 – 0,1				Flughafendirektion Zürich, 1999
		0,8 -1,2 (1999) 0,86		Penner, J.E. et al, 1999

Schwefelgehalt im Kerosin		SO <sub>2</sub> im Abgas		Literatur- quelle
g/kg	Gew%	g/kg	Gew%	
		(2005) 0,78 (2010) 0,73 (2015) 0,68		
(0,1)0,4 – 0,6	0,045 0,055	0,8 – 1,2 (1,0)		Hotes et al., 2000
0,3	0,03	0,6		Döpelheuer, A., 2000
	0,04-0,05 (0,003-0,06)	0,84		EUROCONTROL Experimental Centre, 2001
	0,002-0,07			Deutsche BP AG, 2002
	<b>0,04</b>	<b>0,8</b>		<b>Empfehlung</b>

Aufgrund der weltweiten Unterschiede im Schwefelgehalt des Kerosins wird als Emissionsfaktor ein pauschaler mittlerer Wert von 0,8g SO<sub>2</sub> pro kg Kerosin-Verbrauch für die Berechnung der Emissionen aus den Strahltriebwerken empfohlen.

Hinsichtlich der Genauigkeit und des Vertrauensbereiches der Einzelangaben wird auf die Angaben im Textteil verwiesen. Grundsätzlich sind die Angaben aus Sicht der Gutachter im Rahmen der bei Ausbreitungsrechnungen üblichen Genauigkeit vertretbar.

## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

Planteil B11 Kap.18.2  
Flugzeugtechnische Parameter

Emissionsfaktoren für Hilfstriebwerke  
und Emissionen durch  
Triebwerksanlassvorgänge

Wiesbaden, 04. August 2006

---



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

### Planteil B 11 Kap.18.2 Flugzeugtechnische Parameter

### Emissionsfaktoren für Hilfstriebwerke und Emissionen durch Triebwerksanlassvorgänge

---

iMA Consult GmbH  
Biebricher Allee 58  
65187 Wiesbaden



# Inhalt

	<b>Seite</b>
<b>Inhalt</b>	<b>5</b>
0.1 Tabellenverzeichnis	6
0.2 Abkürzungsverzeichnis	6
0.3 Literatur- und Quellenverzeichnis	7
<b>1 Anlass der Aktualisierung</b>	<b>9</b>
<b>2 Aufgabenstellung</b>	<b>11</b>
<b>3 Emissionen der Hilfstriebwerke (APU)</b>	<b>13</b>
3.1 Einleitung	13
3.2 Laufzeiten	13
3.3 Emissionsfaktoren	15
<b>4 Kohlenwasserstoff-Emissionen bei Zündvorgängen und beim Warmlaufen der Triebwerke</b>	<b>19</b>
4.1 Einleitung und Datengrundlagen	19
4.2 Ergebnisse	19

0.1	Tabellenverzeichnis	Seite
<b>Tab. 3-1:</b>	<b>Betriebszeiten der APU in Frankfurt</b>	15
Tab. 3-2:	Leistung und Treibstoffverbrauch der APUs	16
Tab. 3-3:	Emissionsfaktoren für APU	17
Tab. 4-1:	Emissionen beim Starten der Triebwerke und im LTO-Zyklus [Scherer, Stefan, 1996]	20
Tab. 4-2:	Zündemissionen der von Scherer untersuchten Triebwerke, gerechnet aus dem Kerosinverbrauch bei der Zündung („start-up“)	21
Tab. 4-3:	Übersicht über die beim Startvorgang emittierten unverbrannten Kohlenwasserstoffe (Kerosin) für die wichtigsten Flugzeugtypen und deren hauptsächliche Triebwerkstypen	22
Tab. 4-4:	Warmlaufemissionen	23
0.2	Abkürzungsverzeichnis	
APU	Auxiliary Power Unit = Hilfstriebwerke	
BaP	Benzo(a)pyren	
CO	Kohlenmonoxid	
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	
ICAO	International Civil Aviation Organization, Montreal (Unterorganisation der UN)	
LTO	Landing - TakeOff Cycle = Lande und Start Zyklus	
NO	Stickstoffmonoxid	
PM10	(engl.) particulate matter = partikelförmige Stäube mit Durchmessern von 10µm und kleiner)	
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid	
TVOC	Total Volatile Organic Compounds	
UID	Unique Identification Number = Eindeutige Identifikationsnummer	

---

**0.3 Literatur- und Quellenverzeichnis**

---

**Hotes et al., 2000**

Quantifizierung der Reduktionspotentiale von Luftschadstoffen an und im Umkreis von Flugplätzen.

AvioPlan GmbH, Berlin 2000

Forschungsbericht 298 45 774 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

**Hüttig, G. et al., 1999**

Entwicklung und Erprobung einer Methode zur Bewertung der Schadstoffimmissionen in der Umgebung von Flugplätzen.

Band I: Ermittlung der Emissionen Institut für Luft- und Raumfahrt TU Berlin 1999

Forschungsbericht 294 43 689 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

**IMA Consult GmbH, 2004**

Unterlagen zum Planfeststellungsverfahren Ausbau Flughafen Frankfurt Main, Plan-  
teil B11 Flugzeugtechnische Parameter, Kap.18.1 Bericht über die Festlegung von  
flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren für ausgewählte Schadstoffkomponenten,  
Wiesbaden, 2004

**Scherer, Stefan Dissertation Nr. 11268 1996 ETH Zürich**

Volatile organic compounds in the air of the environment of the airport Zürich-Kloten  
and risk assessment of these pollutants.

Scherer et al. 6. VOC Emissions of Civil Aircraft in the Simulated Landing Take-Off  
(LTO) Cycle and During the Stopover at an Airport

**Weyrauther, G. et al., 1999**

Schadstoffimmissionen Gutachten im Rahmen des Antrags auf Planfeststellung  
für den Ausbau des Flughafens Berlin-Schönefeld. Band M10 (1999)

TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH



# 1 **Anlass der Aktualisierung**

Mit Schreiben vom 16. Dezember 2005 ist die Fraport AG durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL) aufgefordert worden, die Luftverkehrsprognose zu aktualisieren und die Auswirkungsbetrachtungen an etwaige neue Prognoseergebnisse anzupassen. Dies betrifft insbesondere den in Blick zu nehmenden Planungshorizont, der gemäß dem Schreiben mindestens auf das Jahr 2020 zu erweitern ist.

Dieser Anforderung wird mit der vorliegenden Aktualisierung der Planfeststellungsunterlagen unter Betrachtung der Szenarien Ist-Situation 2005 sowie Prognosenullfall und Planungsfall 2020 nachgekommen.

Zudem wurden einige Planänderungen vorgenommen. Hierbei sind unter anderem die Reduzierung des Flächenumfangs für den variantenunabhängigen Südbereich, der Einbezug der geplanten Veränderungen im Nordbereich sowie die Verschwenkung der Rollbrücke West zu nennen.



## 2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Daseinsvorsorge ist entsprechend der prognostizierten Nachfrage vorgesehen, den Flughafen Frankfurt Main bedarfsgerecht auszubauen.

Vorgesehen ist als Kernstück des kapazitiven Ausbaus der Neubau einer Landebahn nordwestlich des bestehenden Flughafens mit den dazugehörigen Rollbahnen. Um den hieraus veränderten Betrieb auf dem Flughafen gewährleisten zu können, müssen auch die Vorfelder und das Rollfeld entsprechend angepasst werden.

Darüber hinaus ist eine Erweiterung der sonstigen Einrichtungen im notwendigen Umfang vorgesehen. Hierzu zählen vor allem die Neuerrichtung von Passagieranlagen (Terminal 3), Frachtanlagen (Hallen für Frachtabfertigung) und Flugzeugserviceanlagen sowie die notwendigen Betriebsgebäude.

Infolge der genannten Maßnahmen werden auch verschiedene Anpassungsmaßnahmen an der Erschließung des Flughafens notwendig. Im verkehrlichen Bereich ist dies in erster Linie die Anpassung der Straßen und die Erweiterung des Passagier-Transfer-Systems. Zu den notwendigen Straßenanpassungen gehören sowohl Änderungen öffentlicher Straßen außerhalb des Flughafengeländes als auch Änderungen an flughafeninternen Straßen.

Neben diesen Anpassungen an der verkehrlichen Erschließung sind auch Anpassungen an den Ver- und Entsorgungseinrichtungen erforderlich.

Im Zusammenhang mit dem Planfeststellungsverfahren wird die Immissionsbelastung durch den Flugverkehr anhand von Ausbreitungsrechnungen ermittelt. In dieser Immissionsprognose sind neben den Emissionsanteilen durch den reinen Flugbetrieb auch die Emissionen aus den Hilfstriebwerken (APUs) und die Kohlenwasserstoffemissionen durch das Anlassen und Warmlaufen der Triebwerke zu berücksichtigen.

Für diese beiden Emissionsvorgänge liegen bereits unterschiedliche Untersuchungen vor, deren Repräsentanz und Übertragbarkeit auf die Verhältnisse am Flughafen Frankfurt Main zu überprüfen sind. Für die Immissionsprognose werden daraus eigene Berechnungsgrundlagen abgeleitet.



## 3 Emissionen der Hilfstriebwerke (APU)

### 3.1 Einleitung

Eine im Bereich des Flughafens Frankfurt Main nicht unbedeutende Emissionsquelle ist der Betrieb der APUs (Auxiliary Power Units), die zur Stromversorgung und Klimatisierung der Flugzeuge am Boden dienen, wenn die Triebwerke abgestellt sind.

Die kleine, meist im Heck des Flugzeugs installierte, Strahltriebwerke wird bei stationärer Stromversorgung, wie z.B. in Frankfurt, nur zur Klimatisierung, zur Überbrückung der Strom- und Klimaversorgung beim An- und Abdocken und zum Start der Haupttriebwerke benötigt.

Die Emissionsmengen der APUs werden maßgeblich bestimmt von den Laufzeiten in den einzelnen Betriebsmodi, der Klimatisierung und der Klimatisierung + Stromversorgung. Mit den zugehörigen spezifischen Treibstoffverbräuchen und typischen Emissionsfaktoren können schließlich die Emissionen des APU-Betriebs bei der Abfertigung der Flugzeuge berechnet werden.

### 3.2 Laufzeiten

Den folgenden Ausführungen liegen die Angaben von Hüttig et al. [Hüttig, G. et al., 1999], Hotes et al. [Hotes et al., 2000], sowie Erhebungen der Fraport AG zu Abfertigungsereignissen, Standzeiten und **Temperaturangaben** zugrunde.

Die APUs werden in Frankfurt hauptsächlich zur Klimatisierung eingesetzt. Beim normalen „Transit“ erfolgt eine Klimatisierung üblicherweise nur während der Standzeit bei Außentemperaturen unter 0°C und über 16°C. Bei den Abfertigungskategorien „Transit mit Nachtstop“ und „Bereitstellung nach einem Werftaufenthalt“ wird dagegen unabhängig von der Außentemperatur immer klimatisiert [Hüttig, G. et al., 1999]. Für diese drei Abfertigungskategorien und drei Flugzeugkategorien (Widebody-, Narrowbody- und Regional-Flugzeuge) liegen von Hüttig, G. et al. [Hüttig, G. et al., 1999] Maximalwerte für die Klimatisierungszeiten vor. Diese wurden für Transitvorgänge auf tatsächliche Standzeiten reduziert. Für die übrigen Vorgänge Transit mit Nachtstop und Bereitstellung nach einem Werftaufenthalt wurden die Zeiten unverändert übernommen. Daraus wurde entsprechend der Häufigkeit der Abfertigungsereignisse sowie unter Berücksichtigung der Zeitanteile mit und ohne Klimatisierungsbedarf jeweils die Gesamtklimatisierungszeit errechnet und als gewichtetes Mittel auf die eigentlichen Flugbewegungen (LTOs) umgelegt. **Beim Klimatisierungsbedarf im Transit wird zwischen Istsituation 2005 (Temperaturdaten 2005) und Prognose 2020 (Temperaturdaten 2002) sowie zwischen Ganzjahresauswertung und Auswertung für Mai bis Oktober unterschieden<sup>1</sup>. Die meteorologische Reihe von 2002 wurde durch den Deutschen Wetterdienst als repräsentativ für die Ausbreitungsrechnungen ermittelt. Aus Konsistenzgründen wird die Auswertung deshalb für die Prognosefälle auf diese Datenbasis ausgedehnt. Die zusätzliche Angabe Mai bis Oktober entspricht dem Zeitraum für die Lärmberech-**

<sup>1</sup> 2005 Fraport eigene Messungen, 2002 Deutscher Wetterdienst

nung. Die Werte für die einzelnen Flugzeugkategorien sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Zusätzlich zur anteiligen Klimatisierungszeit wird die APU noch in so genannten Randzeiten (vor Start, nach Landung) betrieben:

- 5 Minuten beim An-/Abdocken zur Überbrückung der Stromversorgung
- je 1 Minute für den Start jedes einzelnen Triebwerks
- 1 Minute nach dem Start der Triebwerke zum Abkühlen

Bei einigen Flugzeugmustern zählt außerdem die Inbetriebnahme der APU im Leerlauf bereits während des Rollens zum Standplatz (Taxi In) noch als Standardprozedur nach der Landung. Da die Zeitangaben hierzu unterschiedlich sind und sich diese Prozesse teilweise überlagern, wird für die beiden Randzeiten als Standard in der Summe 13 Minuten (5+8) je Start-/Lande-Zyklus angenommen, in denen die APU die gesamte Energieversorgung des Flugzeugs (Stromversorgung und Klimatisierung) übernimmt [Hüttig, G. et al., 1999].

Tab. 3-1: Betriebszeiten der APU in Frankfurt

		Dauer / LTO [min]					
	Betriebsmodus	Hotes et al 2000	Hüttig et al 1999	Empfehlung			
Zeitanteil mit Klimatisierungsbedarf Transit				2005 01-12 40%	2005 05-10 57%	2002 01-12 36%	2002 05-10 58%
Andocken	Strom		5	5	5	5	5
Standzeit anteilig aus: Transit + Tr. mit Nacht- Stop + Bereitstellung	Klima						
Regional			45 / 55 / 35*	20	26	18	27
Narrow Body			75 / 85 / 65*	34	44	32	44
Wide Body			105 / 115 / 75*	51	63	48	64
Abdocken	Strom		8	8 inkl. x	8 inkl. x	8 inkl. x	8 inkl. x
Zündung der Triebw.	Strom		1 pro Triebw.	x	x	x	x
Abkühlung APU	Leerlauf	(1-3)	1	x	x	x	x
Gesamte Abfertigung		Mittlw. an dt. Flughäfen					
A / B / C / D / E		50/56/74/89/143					
R / N / W				33 / 47 / 64	39 / 57 / 76	31 / 45 / 61	40 / 57 / 77

\* Maximalwerte ("Kappungsgrenzen")

Bei Transit findet eine Klimatisierung unter Einsatz der APU in Frankfurt nur bei Temperaturen unter 0°C und über 16°C statt [Hüttig, G. et al., 1999]

### 3.3 Emissionsfaktoren

Eine APU emittiert in gleicher Weise wie ein Flugtriebwerk Schadstoffe, die durch die Verbrennung des Kerosins entstehen. Für die Berechnung der Emissionen der APUs werden üblicherweise mittlere Emissionsfaktoren verwendet, die sich unmittelbar auf die verbrannte Treibstoffmenge beziehen.

Der Treibstoffverbrauch einer APU ist vom jeweiligen Betriebsmodus und der Leistungsstufe der APU bestimmt. In Tab. 3-2 ist der Zusammenhang zwischen Flugzeugkategorie, Flugzeugtyp, Leistungsstufe der APU, Betriebsmodus und Treibstoffverbrauch auf der Basis insbesondere der Angaben von Hotes et al. 2000 [Hotes et al., 2000] dargestellt.

Tab. 3-2: Leistung und Treibstoffverbrauch der APUs

AzB	Modell lierg. G13.1	Hotes et al 2000			Hotes et al 2000	Janicke (6.2.02)	Hotes et al 2000 <b>Treibstoffverbr. APU [kg/h]</b>				
Flugzeug-Kategorien				Flugzeug- Typ	Leistung APU [kW]	Wärme- leistung APU [kW]	nur Klima	Strom + Klima			
P 1 / 2 S 5.1	Turbo Reg	A	Turbo Prop Verkehrs- flugzeuge für den Zubringer- dienst	F 50	75-175	75	70	80			
				CRJ							
				ATR 42 / 72							
				SAAB 2000							
				BAe 146							
S 5.2 S 5.3	Klein	B	Narrow Body	B 737	175-300	175	125	150			
				A 320							
				MD 80							
				A 319 / 321							
				B 727							
		TU 134		300-550	300	160	200				
		B 757									
		S 6.1						Mittel	C	Wide Body	B 767
											A 300
											A 310
TU 154											
S 6.3 S 6.2 S 7.1	A 340 Groß	D	Wide Body	B 777	550-800	550	215	250			
				L 1011							
				IL 86							
				A 330							
				A 340							
S 6.2 S 7.1	Groß	E	Wide Body	MD 11	800-1050		350	400			
				B 747-400							

Da am Flughafen Frankfurt Main eine flächendeckende, ständig verfügbare bodenseitige Stromversorgung zur Verfügung steht, überwiegt bei weitem der Betriebsmodus „Klimatisierung“. Der Betrieb im Leerlauf beim Anschalten und zum Abkühlen der APU kann in Anbetracht der nur kurzen Betriebsphase und des geringeren Leistungsbedarfs konservativ dem Modus „Klimatisierung“ zugeordnet werden.

Die emittierten Schadstoffe sind beim Flugtriebwerk und der APU die gleichen. Hinsichtlich der verbrauchsspezifischen Emissionsfaktoren der APUs stellt Hotes et al., 2000 [Hotes et al., 2000] stark differierende Angaben fest, er kann jedoch keine Abhängigkeit von der APU-Größe und -Leistung feststellen. Daher wird empfohlen

die folgenden mittleren verbrauchsbezogenen Emissionsfaktoren zu verwenden, wie sie bereits auch schon in früheren Untersuchungen benutzt wurden.

Die Werte sowie ihre Herkunft sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Tab. 3-3: Emissionsfaktoren für APU

	Hotes et al 2000 [HOT00]	Hüttig et al 1999 [HÜTT99]	Scherer et al 1996 [SCHER 96]	Wey- rauther et al 1999 [WEYR 99]	Strahltriebwerke [iMA., 2004]	<b>Empfehlung für APU</b>
	g / kg Kerosin					
<b>NOx</b>	8	8			ICAO	<b>8</b>
<b>HC</b>	0,4	0,6			ICAO	<b>0,5</b>
<b>CO</b>	4,0	9,0			ICAO	<b>6,5</b>
<b>CO2</b>	3150	3150			3150	<b>3150</b>
<b>SO2</b>	1,0	0,418			0,8	<b>0,8</b>
<b>Ruß</b>	0,04	0,038			f (SN-ICAO)	<b>0,04</b>
<b>PM10</b>				2 * Ruß		<b>2* Ruß</b>
<b>Benzol</b>			1,7% v HC		3% v. HC	<b>3% v. HC</b>
<b>B:T:X</b>					1:1:1	<b>1:1:1</b>
<b>BaP</b>					3,7 µg/kg	<b>3,7 µg/kg</b>



## 4 Kohlenwasserstoff-Emissionen bei Zündvorgängen und beim Warmlaufen der Triebwerke

### 4.1 Einleitung und Datengrundlagen

Die Anlassvorgänge und die ersten Minuten nach Triebwerksstart führen zu zusätzlichen Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe, die bisher bei den LTO-Vorgängen nicht berücksichtigt wurden. Diese Betriebsphasen werden im folgenden gesondert auf ihre Emissionen untersucht, insbesondere auch weil diese sich merklich auf die Geruchssituation auswirken können. Dazu sollen die bisher publizierten Messungen ausgewertet und ein Vorschlag für die Berechnung der Emissionen dieser Betriebsphasen ausgearbeitet werden.

Bisher wurden kaum Messungen hierzu durchgeführt. Eine ausführliche Arbeit aus den letzten Jahren liegt nur von Scherer et al vor, die im folgenden zitiert und ausgewertet wird.

### 4.2 Ergebnisse

Anfang der 90er Jahre wurden von Scherer et al. [Scherer, Stefan, 1996] bei Prüfläufen von Triebwerken der Typen PW 4460, CFM56-5C2 und JT9D-7R4E auf dem Prüfstand der Swissair in Zürich umfangreiche Messungen der Kohlenwasserstoff-Emissionen durchgeführt. Die Messungen wurden beginnend beim Start des Triebwerks, während der Warmlaufphase sowie bei einem simulierten Start-Landezyklus durchgeführt. Die Ergebnisse der Gesamt-Kohlenwasserstoff-Messungen sind in Tab. 4-1 dargestellt.

Tab. 4-1: Emissionen beim Starten der Triebwerke und im LTO-Zyklus  
 [Scherer, Stefan, 1996]

Triebwerk	Anlass- und Warmlaufzeit (gemessen)			LTO (gemessen)	LTO (gerechnet)	LTO (vom Gutachter gerechnet nach ICAO)
	Zeit bis zur Zündung [s]	Probenahmedauer [min]	TVOC [g] 1) s. Tabelle 3-4	TVOC [g]	TVOC [g]	TVOC [g]
PW-4460	4,5	6,8	790	280	374	595
PW-4460	4,9	11,5	1.200	310	374	595
CFM56-5C2	3,9	8,0	1.300	110	223*	285*
CFM56-5C2	3,8	6,0	1.100	360	223*	285*
JT9D-7R4E	4,7	5,7	1.300	510	294	447

\* Vergleichbares Triebwerk CFM56-5A1 [Scherer, Stefan, 1996]

Trotz begrenzter Vergleichbarkeit zeigt sich, dass die für den simulierten Start-Lande-Zyklus von Scherer et al gemessenen und gerechneten Werte (Spalten: „LTO gemessen“ und „LTO gerechnet“) in ähnlicher Größenordnung liegen, wie die zum Vergleich durchgeführten Berechnungen nach ICAO (letzte Spalte). Dies kann als Plausibilitätsnachweis für die Arbeit von Scherer et al angenommen werden.

Aus den dargestellten Daten wird auch deutlich, dass beim Start eines Strahltriebwerks offensichtlich bisher bei den Berechnungen nach ICAO nicht berücksichtigte zusätzliche Kohlenwasserstoff-Emissionen (TVOC) auftreten.

Aus der Kenntnis darüber, dass bis zur Zündung des Triebwerks über mehrere Sekunden Kerosin eingespritzt wird, das unverbrannt oder nur unvollständig verbrannt sofort wieder emittiert wird, folgern Scherer et al., dass die TVOC Emissionen in diesem Zeitraum dem jeweiligen Treibstoffverbrauch gleich gesetzt werden können.

Auch von der Lufthansa ist bekannt, dass bei dem Triebwerk des A 320 (Triebwerk CFM56-5C) die Zündung ca. 10s vor Triebwerksstart eingeschaltet ist und zumindest über einen Teil dieser Zeit bereits eine Kerosinzugabe erfolgt. (Dr. Waibel, LH, persönliche Mitteilung vom 19.7.02).

In Tab. 4-2 sind diese Erkenntnisse der Berechnung der TVOC-Emissionen bei der Zündung (start-up) zugrunde gelegt.

Tab. 4-2: Zündemissionen der von Scherer untersuchten Triebwerke, gerechnet aus dem Kerosinverbrauch bei der Zündung („start-up“)

		Treibstoffdurchsatz ICAO (Leerlauf, 3,8-4,7sec) 2) s. Tabelle 3-4	Treibstoffdurchsatz ICAO (Leerlauf, 4sec) 3) s. Tabelle 3-4
	<b>Zeit bis zur Zündung [s (Scherer et al)]</b>	<b>TVOC [g]</b>	<b>TVOC [g]</b>
PW-4460	4,5	959	852
PW-4460	4,9	1044	852
CFM56-5C2	3,9	458	470
CFM56-5C2	3,8	447	470
JT9D-7R4E	4,7	1039	884

### Empfehlung für die Berechnung der Zündemissionen

Für die weitere Vorgehensweise wird deshalb empfohlen, zusätzlich zu den gemäß ICAO berechneten Total Volatile Organic Compounds (TVOC)-Emissionen des LTO-Zyklus bei jedem Triebwerksstart eine „Zünd-Emission“ aus dem Treibstoffverbrauch über 4 Sekunden im Betriebsmodus „Leerlauf“ zu berechnen. Dazu sollte der entsprechende Emissionsfaktor aus der ICAO-Emissions-Datenbank für das jeweilige Triebwerk verwendet werden.

In der nachfolgenden Tab. 4-3 wurden für die wichtigsten Flugzeugtypen und deren typische Triebwerksbestückung der Treibstoffverbrauch im Leerlaufzustand aus der ICAO-Emissions-Datenbank dargestellt. Darüber hinaus wurde aus diesen Treibstoffverbrauchswerten die Emission an Kerosin berechnet unter der oben genannten Annahme von 4 s Zündzeit. Um die Zuordnung zwischen Flugzeug und Triebwerk eindeutig darzustellen, wurde in dieser Tabelle zusätzlich zu den üblichen Triebwerksbezeichnungen die UID Ziffer (Unique Identification Number) angegeben.

Tab. 4-3: Übersicht über die beim Startvorgang emittierten unverbrannten Kohlenwasserstoffe (Kerosin) für die wichtigsten Flugzeugtypen und deren hauptsächliche Triebwerkstypen

<b>Flugzeugtyp</b>	<b>typ. Triebwerk</b>	<b>UID-Ziffer</b>	<b>Treibstoffdurchsatz Leerlauf</b>	<b>HC-Emission bei 4s Zündzeit</b>
			kg/s	g
A319	CFMICFM56-5A5	4CM036	0,0980	392
A320	CFMICFM56-5A1	1CM008	0,1011	404
A321	IAEV2530-A5	1IA005	0,1380	552
A321	IAEV2533-A5	3IA008	0,1363	545
B737-800	CFMICFM56-7B27	3CM034	0,1160	464
B757-300	RRRB211-535E4-B	3RR034	0,1900	760
B757-300	RRRB211-535E4-B	5RR039	0,1900	760
A330	RRTrent772B-60	3RR030	0,2800	1120
A330	PWPW4168A	4PW067	0,2210	884
B777	RRTrent892	2RR027	0,3000	1200
MD11	GECF6-80C2D1F	1GE031	0,1960	784
MD11	GECF6-80C2D1F	2GE049	0,2050	820
747-400	PWPW4056	1PW042	0,2080	832
747-400	PWPW4056	1PW041	0,1880	752
747-400	RRRB211-524G/H-T	4RR036	0,2600	1040
747-400	GECF6-80C2B1F	1GE023	0,2050	820
747-400	GECF6-80C2B1F	1GE024	0,1990	796
747-400	GECF6-80C2B1F	2GE045	0,1990	796
A340	CFMICFM56-5C3	1CM011	0,1203	481
A340	CFMICFM56-5C4	2CM015	0,1240	496

**Empfehlung für die emissionsseitige Behandlung der Warmlaufzeit**

Die Warmlaufzeit wird je nach vorangehender Triebwerksstillstandszeit ca. 5 – 10 min dauern und damit häufig ganz oder teilweise in die Anfangsphase der taxi-out Betriebsphase fallen.

Tab. 4-4 zeigt die Emissionen der Warmlauf-Phase als Differenz der Emissionen von „Anlass- und Warmlaufzeit“ (Tab. 4-1) und den „Zünd-Emissionen“ (Tab. 4-2). Die aus der Differenzbildung ermittelten Warmlaufemissionen liegen in der gleichen Größenordnung, wie die für den gleichen Zeitraum nach ICAO („Leerlauf“) berechneten Werte (insbesondere bei einem Zündverzug von ca. 4 s). Da mit Überschneidungen zwischen der Warmlauf-Phase und dem „taxi-out“ sowie mit meist relativ langen „taxi-out“-Zeiten gerechnet werden muss, kann auf eine gesonderte zusätzliche Berücksichtigung der Emissionen aus der Warmlaufphase verzichtet werden.

Tab. 4-4: Warmlaufemissionen

		Differenz 1) - 2) (s.Tab.3-1/3-2)	Differenz 1) - 3) (s.Tab.3-1/3-2)	ICAO (Leerlauf) gerechn. mit Warmlaufzeit
	<b>Warmlaufzeit [min]</b>	<b>TVOC [g]</b>	<b>TVOC [g]</b>	<b>TVOC [g]</b>
PW-4460	6,8			144
PW-4460	11,5	156	348	244
CFM56-5C2	8,0	842	830	320
CFM56-5C2	6,0	654	630	240
JT9D-7R4E	5,7	261	416	84



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

Planteil B11 Kap.18.3  
Flugzeugtechnische Parameter

Flugzeugmuster und deren  
Triebwerksbestückung

Wiesbaden, 18.September 2006



## Ausbau Flughafen Frankfurt Main

# B

Planteil B11 Kap.18.3  
Flugzeugtechnische Parameter

Flugzeugmuster und deren  
Triebwerksbestückung

---

iMA Consult GmbH  
Biebricher Allee 58  
65187 Wiesbaden



# Inhalt

	<b>Seite</b>
<b>Inhalt</b>	<b>5</b>
<b>0.1</b> <b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
0.2    Tabellenverzeichnis	7
0.3    Abkürzungsverzeichnis	8
0.4    Literatur- und Quellenverzeichnis	9
<b>1</b> <b>Anlass der Aktualisierung</b>	<b>11</b>
<b>2</b> <b>Aufgabenstellung</b>	<b>13</b>
<b>3</b> <b>Datengrundlage</b>	<b>15</b>
3.1    Bezugsjahr <b>2005</b>	15
3.2    Prognosehorizonte	15
<b>4</b> <b>Verfahren zur Ermittlung der zukünftigen Triebwerksbestückung und der zukünftigen Emissionsfaktoren</b>	<b>17</b>
4.1    Triebwerksbestückung	17
4.2    Gesetzliche Vorgaben für NO <sub>x</sub> -Triebwerksemissionen	17
4.3    Aktueller Stand der Triebwerksemissionen	20
4.4    Nachfolgemodelle im Kurz- und Mittelstreckenbereich (Airbus 320, B 737)	21
4.5    Ableitung von Emissionswerten für neue Triebwerke	22
4.6    Problematik der Prognose für andere Schadstoffkomponenten	26
4.7    Empfehlungen zum Umgang mit den ICAO-Emissionsdaten	27
<b>5</b> <b>Ergebnisse</b>	<b>29</b>
5.1    Ist-Situation <b>2005</b>	29
5.2    Prognosenullfall	33
5.3    Planungsfall	38

**0.1 Abbildungsverzeichnis**

---

Abb. 4-1	Zeitliche Entwicklung der NOx-Emissionen bis 2020 für aktuelle Triebwerke [RR2003]	19
Abb. 4-2	ICAO-NOx-Charakteristik für Triebwerke unterschiedlicher Entwicklungs-generationen [MTU2005]	20
Abb. 4-3	Charakteristische NOx-Emissionswerte für derzeit produzierte Triebwerke nach LTO-Zyklus und Zielbereiche künftiger Entwicklungen	21
Abb. 4-4	Darstellung des Grenzwerteverlaufs für die Smokenumber (SN)	27

## **0.2 Tabellenverzeichnis**

Tab. 4-1	Darstellung der Grenzwerte für NO <sub>x</sub> nach dem Start-Lande-Zyklus	17
Tab. 4-2	Ableitung von NO <sub>x</sub> -Emission und Treibstoffverbrauch künftiger Triebwerke aus deren Referenztriebwerken	23
Tab. 4-3	Emissionswerte HC und CO für die neu generierten Triebwerke (Erläuterung s. 3.6)	24
Tab. 4-4	Grenzwerte der SN für die neu generierten Triebwerke (Erläuterung s. 3.6)	24
Tab. 4-5	Charakteristische Daten für die Triebwerke GE90-115B und GP7000	25
Tab. 4-6	Angepasster Fuel Flow für die Triebwerke GE90-115B und GP7000	25
Tab. 4-7	Abgeleitete NO <sub>x</sub> -Emissionen für das Triebwerk GP7000	26
Tab. 4-8	Zeiten und Leistungsstufen des ICAO-Start-Lande-Zykluses	28
Tab. 5-1	Bezugsjahr 2005, Verteilung der 495.626 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen	29
Tab. 5-2	Bezugsjahr 2005, Häufigkeitsverteilung der Flugzeugtypen innerhalb der AzB-Klasse S7	30
Tab. 5-3	Bezugsjahr 2005, Zuordnung der Triebwerkstypen zu den Fluggeräten (am Beispiel der AzB-Klasse S7)	31
Tab. 5-4	Bezugsjahr 2005, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen (verdichtetes Ergebnis)	32
Tab. 5-5	Prognosenufall 2020, Verteilung der ca. 520.000 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen	34
Tab. 5-6	Prognosenufall 2020, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen und Triebwerkszuordnung, verdichtetes Ergebnis	35
Tab. 5-7	Planungsfall 2020, Verteilung der ca. 701.000 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen	38
Tab. 5-8	Planungsfall 2020, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen und Triebwerkszuordnung, verdichtetes Ergebnis	39

### **0.3 Abkürzungsverzeichnis**

<b>ACARE</b>	Advisory Council for Aeronautic Research in Europe (Rat für Luft- und Raumfahrtforschung in Europa)
<b>AzB</b>	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB 99)
<b>CAEP</b>	Committee on Aviation Environmental Protection
<b>DES</b>	Datenerfassungssystem
<b>DFS</b>	Deutsche Flugsicherung
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization, Montreal (Unterorganisation der UN)
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>LTO</b>	Landing - TakeOff Cycle
<b>NOx</b>	Stickoxid
<b>OPR</b>	Overall Pressure Ratio
<b>SFC</b>	Specific Fuel Consumption
<b>SN</b>	Smokenumber
<b>TW</b>	Triebwerk
<b>UID</b>	Unique Identification Number (von der ICAO vergebene Identifizierungsnummer)

#### 0.4 Literatur- und Quellenverzeichnis

---

**Airbus**

<http://www.airbus.com/en/>

**Boeing**

<http://www.boeing.com/commercial/index.html>

**Cessna**

<http://www.cessna.com/>

**Embraer**

<http://www.embraer.com/english/content/home/>

**EngineAlliance**

<http://www.enginealliance.com/>

**Flugdaten Fraport AG**

Flugdaten für Modelltage des Prognosenullfalls und des Planungsfalls, letzte Version 12. September 2006

**GE Aviation**

<http://www.geae.com/engines/commercial/index.html>

**HB Verkehrsconsult**

Erweiterungsmaßnahmen für die Wartung von A380-Flugzeugen (A380-Werft)  
Gutachten G7- Lufthygienische Auswirkungen durch den Werftbetrieb.  
24. April 2003

**Howse, Mike**

“Environmental technologies”

<http://www.rolls-royce.com/media/product/tech/briefings/techbrief.htm> (Abruf am 29.06.2006)

**IAE International Aero Engines**

<http://www.i-a-e.com/engine/index.shtm>

**International Civil Aviation Organization**

Engine Exhaust Emissions Databank, DOC 9646-AN 943  
First edition 1995 (addendum 1996-2006)

<http://www.caa.co.uk/default.aspx?categoryid=702&pagetype=90>

**JP Airline Fleets**

International Edition Bucher&Co. Publikationen Zürich Airport  
Bezugsjahr 2005

**MTU Aero Engines**

Persönliches Gespräch mit dem Leiter des Technologie-Managements am  
30.05.2006

**MTU**

<http://www.mtu.de/de/index.html>

**MTU2005**

Beiträge der Flugzeugtriebwerke zur Schadstoffreduktion im Luftverkehr, Dr.-Ing.  
Stefan Donnerhack, MTU Aero Engines, München, Präsentation am 14.06.2005,  
Umweltbundesamt Berlin,  
[http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/verkehrstraeg/flugverkehr/workshop-  
luftqualitaet/MTU-Flugtriebwerke-Schadstoffreduktion2005.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/verkehrstraeg/flugverkehr/workshop-luftqualitaet/MTU-Flugtriebwerke-Schadstoffreduktion2005.pdf) (Abruf am  
26.06.2006)

**Pratt&Whitney**

<http://www.pratt-whitney.com/>

**Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG**

persönliches Gespräch mit dem Leiter der Brennkammer Aero-Thermodynamik und  
Kraftstoffaufbereitung am 9.6.2006

**Rolls-Royce**

[http://www.rolls-royce.com/civil\\_aerospace/default.jsp](http://www.rolls-royce.com/civil_aerospace/default.jsp)

**Snecma**

<http://www.snecma.com/index2.php3?&lang=en>

# 1 **Anlass der Aktualisierung**

Mit Schreiben vom 16. Dezember 2005 ist die Fraport AG durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL) aufgefordert worden, die Luftverkehrsprognose zu aktualisieren und die Auswirkungsbetrachtungen an etwaige neue Prognoseergebnisse anzupassen. Dies betrifft insbesondere den in Blick zu nehmenden Planungshorizont, der gemäß dem Schreiben mindestens auf das Jahr 2020 zu erweitern ist.

Dieser Anforderung wird mit der vorliegenden Aktualisierung der Planfeststellungsunterlagen unter Betrachtung der Szenarien Ist-Situation 2005 sowie Prognosenullfall und Planungsfall 2020 nachgekommen.

Zudem wurden einige Planänderungen vorgenommen. Hierbei sind unter anderem die Reduzierung des Flächenumfangs für den variantenunabhängigen Südbereich, der Einbezug der geplanten Veränderungen im Nordbereich sowie die Verschwenkung der Rollbrücke West zu nennen.



## 2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Daseinsvorsorge ist entsprechend der prognostizierten Nachfrage vorgesehen, den Flughafen Frankfurt Main bedarfsgerecht auszubauen.

Vorgesehen ist als Kernstück des kapazitiven Ausbaus der Neubau einer Landebahn nordwestlich des bestehenden Flughafens mit den dazugehörigen Rollbahnen. Um den hieraus veränderten Betrieb auf dem Flughafen gewährleisten zu können, müssen auch die Vorfelder und das Rollfeld entsprechend angepasst werden.

Darüber hinaus ist eine Erweiterung der sonstigen Einrichtungen im notwendigen Umfang vorgesehen. Hierzu zählen vor allem die Neuerrichtung von Passagieranlagen (Terminal 3), Frachtanlagen (Hallen für Frachtabfertigung) und Flugzeugserviceanlagen sowie die notwendigen Betriebsgebäude.

Infolge der genannten Maßnahmen werden auch verschiedene Anpassungsmaßnahmen an der Erschließung des Flughafens notwendig. Im verkehrlichen Bereich ist dies in erster Linie die Anpassung der Straßen und die Erweiterung des Passagier-Transfer-Systems. Zu den notwendigen Straßenanpassungen gehören sowohl Änderungen öffentlicher Straßen außerhalb des Flughafengeländes als auch Änderungen an flughafeninternen Straßen.

Neben diesen Anpassungen an der verkehrlichen Erschließung sind auch Anpassungen an den Ver- und Entsorgungseinrichtungen erforderlich.

Für die Immissionsprognose (G13.1 Luftschadstoffe – Flugverkehr) zum Planfeststellungsantrag ist es notwendig, mit detailliertem Flottenbestand zu rechnen. Aus dem aktuellen Flottenmix sind die heutigen Bestandszahlen und die Zuordnung der Triebwerke zu ermitteln. Für die beiden Prognosehorizonte Prognose Nullfall und Planungsfall ist soweit als möglich die Triebwerksbestückung der im Jahre 2020 zu erwartenden Flugzeugflotten zu prognostizieren.



## 3 Datengrundlage

### 3.1 Bezugsjahr 2005

Zur Ermittlung der Triebwerksbestückung der Flugzeugflotte in der Ist-Situation 2005 wurden zunächst die von der Fraport AG bereitgestellten realen Flugdaten 2005 hinsichtlich folgender, für die weitere Berechnung wichtiger Merkmale ausgewertet::

- Registration des Flugzeugs
- Flugzeugtyp nach ICAO-Code und AzB-Klassen-Zuordnung
- Anzahl und Art der Triebwerke

Diese Daten für das Bezugsjahr 2005 sind teilweise auch in die Prognosehorizonte eingeflossen.

Im Flugplan 2005 ist noch das Militärflugzeug C17-Globemaster enthalten. Dessen Triebwerkskonfiguration und die dazugehörigen Emissionsdaten wurden über den Flugzeughersteller und den Triebwerkshersteller ermittelt [Boeing, Pratt&Whitney Military Engines, per E-Mail].

### 3.2 Prognosehorizonte

Für die beiden Prognosehorizonte Prognosenufall 2020 und Planungsfall 2020 wurde von der Fraport AG je ein Modelltag mit Flugbewegungen bereitgestellt [Flugdaten Fraport AG, 2006]. Die Triebwerkszuordnung zu den einzelnen Flugzeugtypen wurde für heute im Verkehr befindliche Flugzeuge zunächst aus dem Bezugsjahr 2005 übernommen. Diese Zuordnung wurde dann abgeglichen mit der ICAO-Emissions-Datenbank [International Civil Aviation Organization, 2006], die Hinweise enthält, welche Triebwerke von den Herstellern bereits nicht mehr produziert werden bzw. in absehbarer Zukunft aus dem Markt genommen werden. Für Flugzeuge, die sich heute im Entwicklungsstadium befinden, wurden Angaben der Triebwerkshersteller aus persönlichen Gesprächen [MTU Aero Engines und Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG] sowie die entsprechenden Internetangaben der Hersteller [Airbus, Boeing, Embraer, Cessna, EngineAlliance, Pratt&Whitney, IAEA, Snecma, Rolls-Royce, MTU, GE Aviation] verwendet. Die Ableitung der entsprechenden Triebwerke und deren Emissionsverhalten mit Schwerpunkt der Abgas-komponente NOx wird ausführlich im Kapitel 4 zu diesem Bericht dargestellt.



## 4 Verfahren zur Ermittlung der zukünftigen Triebwerksbestückung und der zukünftigen Emissionsfaktoren

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Prognose der Triebwerksbestückung und den zukünftigen Emissionsfaktoren beschrieben. Dabei wird aufgrund der Relevanz die Emissionskomponente NO<sub>x</sub> ausführlich dargestellt, die anderen Schadstoffkomponenten, die in die Immissionsprognose eingehen, werden kurz dargestellt.

### 4.1 Triebwerksbestückung

Ausgangsbasis waren die heutige Triebwerksbestückung und die Modelltage [s. B11 Kap.12], hierin die Angabe des Flugzeugtyps und der Luftfahrtgesellschaft. Im ersten Schritt wurde die heutige Triebwerksbestückung übernommen. Für die darauf folgende Prognose wurde unterstellt, dass die Luftfahrtgesellschaften auch in Zukunft für einen bestehenden Flugzeugtyp keinen Herstellerwechsel bei den Triebwerken vornehmen werden. In einem zweiten Schritt wurden alle Triebwerke entfernt, die in der ICAO-Emissionsdatenbank mit dem Vermerk „Out-of-Production“ und „Out-of-Service“ gekennzeichnet sind. Falls ein Flugzeugtyp mit mehreren Triebwerken derselben Baureihe geflogen wird, wurden für diesen Typ die zuletzt zertifizierten Triebwerke in den Prognosehorizont übernommen. Nach den Angaben der Flugzeughersteller sind Flugzeugmuster zu erwarten, die mit heute noch nicht zertifizierten Triebwerken bestückt sein werden. Deren Emissionen wurden nach dem nachfolgend beschriebenen Verfahren abgeleitet.

### 4.2 Gesetzliche Vorgaben für NO<sub>x</sub>-Triebwerksemissionen

Auf Basis der gesetzlichen Regelungen lässt sich die Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren bis zum Jahr 2008 prognostizieren. Der in Tab. 4-1 zuletzt genannte Grenzwert gilt für Triebwerke mit einem Zulassungsdatum nach dem 1.1.2008. Für den Zeitraum nach 2008 sind noch keine Entscheidungen bezüglich einer weiteren Verschärfung der Grenzwerte getroffen worden.

Tab. 4-1 Darstellung der Grenzwerte für NO<sub>x</sub> nach dem Start-Lande-Zyklus [ICAO]

CAEP-Grenzwert	Zertifizierung	Serienproduktion	Charakterisierungsparameter	Zulassungsgrenzwert
CAEP/2	ab 1.1.1996 *	Ab 1.1.2000		$D_p / F_{00} = 32 + 1,6 \pi_{00}$
CAEP/4	ab 1.1.2004 *	n.b.	$\pi_{00} \leq 30$ $F_{00} > 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 19 + 1,6 \pi_{00}$
			$\pi_{00} \leq 30$ $26,7 \text{ kN} < F_{00} \leq 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 37,572 + 1,6 \pi_{00} - 0,2087 F_{00}$

CAEP-Grenzwert	Zertifizierung	Serienproduktion	Charakterisierungs-Parameter	Zulassungsgrenzwert
			$30 < \pi_{00} < 62,5$ $F_{00} > 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 7 + 2 \pi_{00}$
			$30 < \pi_{00} < 62,5$ $26,7 \text{ kN} < F_{00} \leq 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 42,71 + 1,4286 \pi_{00} - 0,4013 F_{00} + 0,00642 \pi_{00} \times F_{00}$
			$\pi_{00} \geq 62,5$	$D_p / F_{00} = 32 + 1,6 \pi_{00}$
CAEP/6 (proposal)	Ab 1.1.2008		$\pi_{00} \leq 30$ $F_{00} > 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 16,72 + (1,4080 * \pi_{00})$
			$\pi_{00} \leq 30$ $26,7 \text{ kN} < F_{00} \leq 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 38,5486 + (1,6823 * \pi_{00}) - (0,2453 * F_{00}) - (0,0031 * \pi_{00} * F_{00})$
			$30 < \pi_{00} < 82,6$ $F_{00} > 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = -1,04 + (2,0 * \pi_{00})$
			$30 < \pi_{00} < 82,6$ $26,7 \text{ kN} < F_{00} \leq 89,0 \text{ kN}$	$D_p / F_{00} = 46,1504 + (1,4285 * \pi_{00}) - (0,5298 * F_{00}) + (0,00642 * \pi_{00} * F_{00})$
			$\pi_{00} \geq 82,6$	$D_p / F_{00} = 32 + (1,6 * \pi_{00})$

Anmerkungen:

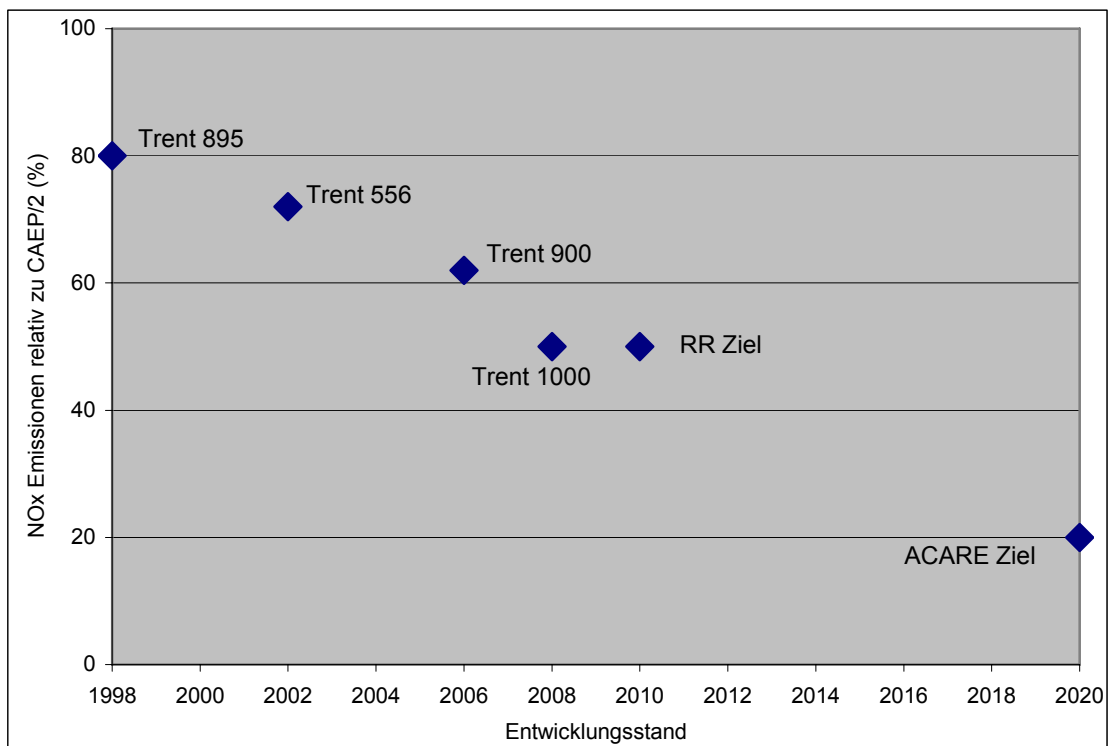
CAEP/4 'überschreibt' CAEP/2 nur bei Triebwerken mit Zertifizierung ab 1.1.2004, CAEP/2 für Serienproduktion ist noch gültig

- CAEP Committee on Aviation Environmental Protection (Arbeitsgruppe der ICAO)
- $D_p$  = Masse des während des standardisierten Start-Lande-Zyklus emittierten Schadstoffes in Gramm
- $F_{00}$  = Maximal-Schub für den Start unter den ISA-Bedingungen auf Meereshöhe, ohne Wassereinspritzung in Kilo Newton (kN)
- $\pi_{00}$  = Verhältnis des mittleren Gesamtdrucks nach der letzten Kompressorstufe zum mittleren Gesamtdruck in der Kompressor-Eintrittsebene bei Start-Schub unter ISA-Bedingungen auf Meereshöhe
- \* Herstellung des ersten Produktionsmodells

Die oben genannten Grenzwerte sind definitionsgemäß bezogen auf den maximalen Schub des Triebwerks  $F_{00}$  und auf  $\pi_{00}$ . Somit führt eine Reduzierung des oben genannten Grenzwertes nur dann zu einer gleichartigen Reduktion des Emissionsmassenstroms ( $D_p$  summiert über alle Phasen des Standard-LTO-Zyklus), wenn diese Parameter des entsprechenden Triebwerks konstant gehalten werden.

Für den Zeitraum nach 2008 sind, wie bereits geschildert, bislang keine weiteren Grenzwertregelungen festgelegt und verabschiedet. Entsprechend wird für diesen Zeitraum auf Informationen und Prognosen der Triebwerkshersteller zurückgegriffen. Die Entwicklungsabteilungen von MTU Aero Engines (MTU) in München und Rolls-Royce Deutschland (RRD) in Dahlewitz haben entsprechendes Informationsmaterial zur Verfügung gestellt. Die hohen Entwicklungskosten für neue Triebwerke haben dazu geführt, dass viele Hersteller Allianzen geschmiedet haben. Triebwerksentwicklungen sind geprägt durch die Forderungen nach möglich geringem SFC (Specific Fuel Consumption), Gewicht, Kosten (sowohl Anschaffung als auch Betrieb) und Emissionen (Schadstoffe und Lärm). Dies führt zu einem optimalen Bypassverhältnis mit möglichst hochbelasteten Kerntriebwerken, was die Prozessdrücke und -temperaturen festlegt und somit unter Annahme ähnlicher Materialien zu ‚ähnlichen‘ Triebwerken führt.

Abb. 4-1 Zeitliche Entwicklung der NOx-Emissionen bis 2020 für aktuelle Triebwerke [RR2003]



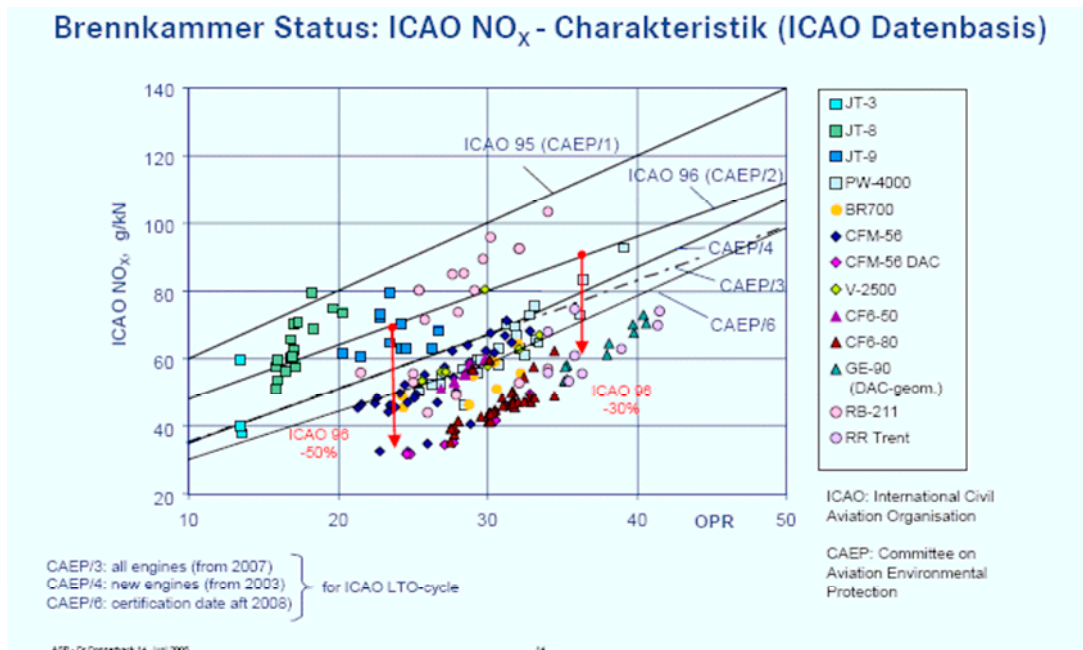
Die Industrie plant, bis zum Jahr 2020 die Technologie zur Erreichung einer Reduktion der NOx-Emissionen auf 20% des CAEP/2-Grenzwertes bereitzustellen (s. Abb. 4-1 Ziel der ACARE [ACARE]). Mit einem deutlichen Marktanteil von Triebwerken dieses Standards ist jedoch erst in den folgenden Jahren zu rechnen. Diese langen Entwicklungszeiten sind darauf zurückzuführen, dass eine signifikante Absenkung der NOx-Emissionen unter das Niveau 50% von CAEP/2 nur mit einer weitgehenden Änderung der Brennkammertechnologie möglich ist. Mit dem derzeitigen Stand der Technik der RQL-Brennkammern (Rich Quench Lean, Mager-

verbrennung) werden bis 2015 Triebwerke mit einer NO<sub>x</sub> -Emission von CAEP/2 - 40% marktreif verfügbar sein. Eine weitere Absenkung ist beispielsweise mit gestufter Verbrennungstechnologie möglich, die derzeit im Entwicklungsstadium ist, und deren marktreife Einführung nach 2015 erwartet wird (Projekte TAPS = Twin Annular Premixing Swirler und ANTLE = Affordable Near Term Low Emissions) [Rolls-Royce Environmental Technologies].

**4.3 Aktueller Stand der Triebwerksemissionen**

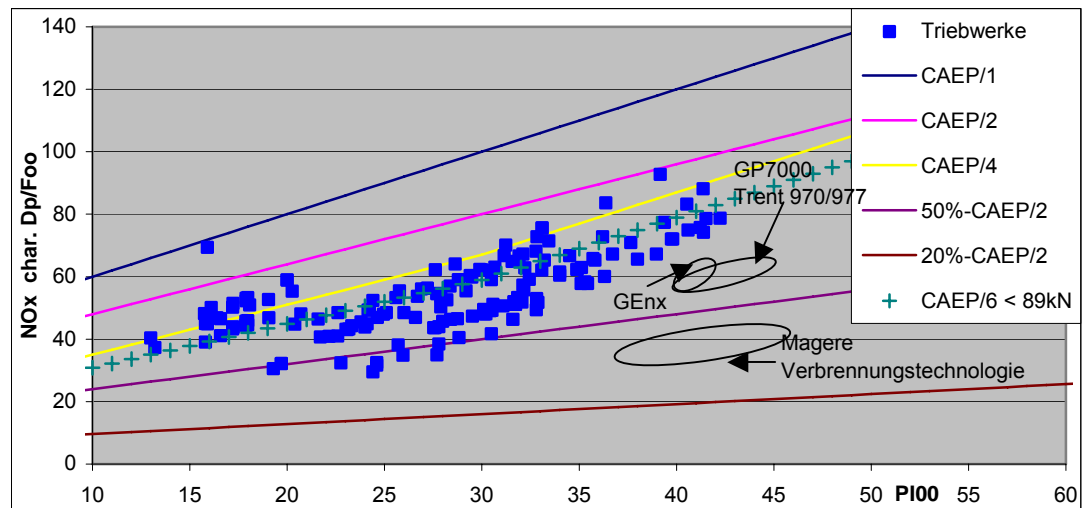
Die führenden Luftverkehrsgesellschaften bestellen im Rahmen ihrer Vorsorgeplanung Triebwerke, die zum Bestellzeitpunkt bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen eindeutig unter dem Grenzwert liegen. Nachfolgende Abbildung zeigt den Stand der NO<sub>x</sub>-Emissionen aktueller Triebwerke nach dem LTO-Zyklus und den Verlauf der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte (s. Abb. 4-2). Deutlich wird dabei eine Zunahme des  $\pi_{00}$  während der technologischen Evolution der Triebwerke (z.B. JT-Familie von Pratt&Whitney ggü. PW4000). Die modernen, im Verkehr befindlichen Triebwerke halten bereits heute den ab 1.1.2008 gültigen Grenzwert CAEP/6 ein bzw. unterschreiten diesen.

Abb. 4-2 ICAO-NO<sub>x</sub>-Charakteristik für Triebwerke unterschiedlicher Entwicklungsgenerationen [MTU2005]



In der Verdichtung der Daten für die Prognose wurden aus der aktuellen ICAO Emissions-Datenbank [ICAO2004] alle Triebwerke ausgesondert, die mit dem Vermerk „out-of-service“ oder „out-of-production“ versehen sind. Die Emissionswerte der dann verbliebenen Triebwerke für NO<sub>x</sub> nach dem LTO-Zyklus sind in der folgenden Abb. 4-3 dargestellt. Eingetragen sind hier ferner die Zielbereiche der derzeit in Vorentwicklung befindlichen Triebwerke.

Abb. 4-3 Charakteristische NO<sub>x</sub>-Emissionswerte für derzeit produzierte Triebwerke nach LTO-Zyklus und Zielbereiche künftiger Entwicklungen



Das bis 2015 angestrebte Ziel von 50%-CAEP/2 ist für einen Teil der Triebwerke bereits heute erfüllt. Zum Prognosehorizont 2020 werden die Triebwerke, die heute noch oberhalb 50%-CAEP/2 liegen, aufgrund der bis dann zu erwartenden Erneuerung der Triebwerke und/oder der Flugzeuge deutlich in ihrem Marktanteil abnehmen. Deutlich wird hier aber auch, dass bei weiter steigendem  $\pi_{00}$  (Bereich  $\pi_{00}$  größer als ca. 40) der Abstand zwischen den realen und den angestrebten NO<sub>x</sub>-Werten immer größer wird, was der Charakteristik der Triebwerke mit hohem Druckverhältnis entspricht. Eine weitere Minderung in diesem Bereich ist deshalb nur mit heute noch nicht verfügbarer Technologie zu erreichen.

#### 4.4 Nachfolgemodelle im Kurz- und Mittelstreckenbereich (Airbus 320, B 737)

Beide Flugzeugmuster sind mit hohem Verkehrsanteil sowohl in der aktuellen Bewegungsstatistik als auch in den Flugplänen des Prognosehorizonts vertreten. Seit Ende der 80er-Jahre des letzten Jahrhunderts wird der Airbus 320 von zahlreichen Fluggesellschaften als Kurz- und Mittelstreckenflugzeug eingesetzt. Boeing hat als Antwort auf den Airbus 320 für das Modell 737 das Programm „Next Generation“ [BOEING2006] aufgelegt, unter dem die Version 600, 700, 800 und 900 angeboten werden. Der technologische Fortschritt, der sich derzeit in der Boeing 787 und im Airbus 350 abzeichnet, wird auch zu einer grundlegenden Überarbeitung des Typs A320 sowie der Reihe B737 führen. Nach Aussage der Triebwerkhersteller ist mit diesen überarbeiteten Modellen im Zeitraum 2012/13 zu rechnen. Diese Nachfolgemodelle werden auf Basis des durchschnittlichen Flottenalters der in Frankfurt hauptsächlich vertretenen Fluglinien eine Marktdurchdringung von 20% erreichen und wurden mit diesem Anteil im Prognosefall und Planungsfall berücksichtigt.

#### 4.5 Ableitung von Emissionswerten für neue Triebwerke

Die dafür notwendigen Triebwerke befinden sich derzeit im Status der Vorentwicklung. Auslegungsdaten wie die Schubleistung, das Druck- und Nebenstromverhältnis sind relativ sicher prognostizierbar. Wählt man ein schon heute existierendes Triebwerk mit entsprechenden Parametern, dann lässt sich über die bereits erreichte Minderung gegenüber dem Grenzwert und das noch verbleibende Potenzial entsprechend der zuvor beschriebenen Prognosen auch das zukünftige NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau abschätzen. Dabei wird in erster Näherung vorausgesetzt, dass sich eine Minderung der Gesamtemission des  $Dp/F_{00}$  über den LTO-Zyklus gleichmäßig auf die einzelnen Laststufen verteilt. In der folgenden Tabelle (Tab. 4-2) wurden so für die Flugzeugtypen, die im Prognosenullfall und im Planungsfall zu berücksichtigen sind, jedoch heute noch nicht auf dem Markt sind, Emissionswerte generiert, um auch diese neuen Flugzeuge in die Ausbreitungsrechnung mit aufzunehmen. Das Ergebnis wurde mit den Triebwerksherstellern abgestimmt. Die neu-generierten Triebwerke wurden zur eindeutigen Identifizierung mit provisorischen UID-Kennungen „nXXnnn“ versehen und sind in der Tabelle grün hinterlegt. Für Trent 900 wurde „0RR000“ aus dem Gutachten G7 zum Planfeststellungsverfahren A380-Werft übernommen [HB-Verkehrsconsult, 2003]. Die Minderungsfaktoren und die Bezugstriebwerke sind in der rechten Spalte angegeben.

Grenzwertbezogene Angaben, wie z.B. Minderungsziele, beziehen sich streng genommen auf das Verhältnis der charakteristischen, spezifischen Emission zum Grenzwert („Dp/F00 characteristic“, hier zu CAEP 2). Die charakteristische Emission unterscheidet sich von der mittleren (average) durch einen Sicherheitszuschlag, der mit zunehmender Anzahl getesteter Triebwerke geringer wird. Wie in 4.7 ausgeführt, ist dieser Zuschlag unrealistisch hoch. Deshalb wird bei der Prognose von der „mittleren“ statt von der „charakteristischen“ spezifischen Emission ausgegangen.

Realistisch ist neben einer entsprechenden Minderung der NO<sub>x</sub>-Emission auch eine Verringerung des spezifischen Treibstoffverbrauches (SFC). Allerdings sind diesem Potenzial Grenzen gesetzt, da physikalisch bedingt bei Triebwerken mit geringerem SFC höhere Drücke und Temperaturen herrschen, die sich nachteilig auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen auswirken. Im Sinne eines konservativen Ansatzes wurde daher der SFC nicht reduziert.

Tab. 4-2 Ableitung von NOx-Emission und Treibstoffverbrauch künftiger Triebwerke aus deren Referenztriebwerken

		Max. Schub kN	Druck-Verh.	Ei Nox g/kg				Dp/F <sub>00</sub> NOx g/kN				Fuel Flow kg/s				
Triebwerk	UID	F <sub>00</sub>	π <sub>00</sub>	T/O	C/O	App	Idle	Ave	Char. °	CAEP2	Char./CAEP2	T/O	C/O	App	Idle	
CFM56-5B4/2P	3CM021	120,1	27,70	18,40	13,60	6,50	3,90	31,70	34,90	76,3	45,7	1,140	0,950	0,340	0,120	
A320 Nachfolger	1XX001	120,1	27,70	16,56	12,24	5,85	3,51	28,53	31,40	76,3	41,2	1,140	0,950	0,340	0,120	-10% NOx ggü. CFM56-5B4/2P
Trent 556-61	6RR041	261,5	36,71	44,91	32,76	11,78	6,19	61,10	67,20	90,7	74,1	2,240	1,830	0,620	0,230	
A345	3XX001	236,0	36,71	44,91	32,76	11,78	6,19	55,14	60,65	90,7	66,8	2,022	1,652	0,560	0,208	wie Trent 556-61 +
Trent 895	5RR040	413,1	41,52	47,79	34,29	11,39	5,11	67,81	78,60	98,4	79,9	4,030	3,190	1,050	0,330	
GE <sub>nx</sub>	2XX003	296,0	38,00	39,00	28,00	10,50	5,50	57,79	63,57	92,8	69,2	2,890	2,290	0,750	0,240	-20% NOx ggü. Trent 895 +
GE 90-115B	7GE099	513,9	42,24	50,34	35,98	16,50	5,19	67,89	78,70	99,6	79,0	4,690	3,670	1,130	0,380	
GP7000	2XX004	343,0	45,60	42,79	30,58	14,03	4,41	57,71	66,90	105,0	63,7	3,130	2,450	0,754	0,254	-15% NOx ggü. GE 90-115B +
CFM56-7B27/2	4CM043	121,4	28,84	20,81	15,59	7,53	4,36	38,23	40,49	78,1	51,8	1,265	1,033	0,351	0,115	
B73X Nachfolger	1XX002	121,4	28,84	18,73	14,03	6,78	3,92	34,41	36,40	78,1	46,6	1,265	1,033	0,351	0,115	-10% NOx ggü. 4CM043
Trent 900*	0RR000	335,0	38,97	36,28	29,82	11,51	6,29	50,38	58,44	94,4	61,9	2,622	2,183	0,737	0,259	
Trent 1000	2XX007	335,0	38,97	36,28	29,82	11,51	6,29	50,38	58,44	94,4	61,9	2,622	2,183	0,737	0,259	wie Trent 900
A35X	2XX006	335,0	38,97	36,28	29,82	11,51	6,29	50,38	58,44	94,4	61,9	2,622	2,183	0,737	0,259	wie Trent 900
A35X	2XX005	335,0	38,97	36,28	29,82	11,51	6,29	50,38	58,44	94,4	61,9	2,622	2,183	0,737	0,259	wie Trent 900

\* vorläufige Herstellerangaben, die im Genehmigungsverfahren zum Bau der A380-Halle verwendet wurden.

° „Characteristic“ s. Abschnitt 3.7

+ Treibstoffverbrauch entsprechend dem geringeren Schub skaliert

Tab. 4-3 Emissionswerte HC und CO für die neu generierten Triebwerke (Erläuterung s. 3.6)

Triebwerksname	UID	Rated Output F <sub>00</sub> KN	EI HC g/kg			EI CO g/kg				
			T/O	C/O	App	Idle	T/O	C/O	App	Idle
A320 Nachfolger	1XX001	120,1	0,10	0,20	5,30	3,60	1,40	3,60	29,10	40,10
A345	3XX001	236,0	0,00	0,00	0,10	0,02	0,25	0,46	10,30	14,71
GENx	2XX003	296,0	0,02	0,00	0,00	0,89	0,27	0,54	14,71	10,30
GP7000	2XX004	343,0	0,04	0,03	0,06	4,24	0,08	0,07	1,98	39,11
B73X Nachfolger	1XX002	121,4	0,05	0,06	4,21	5,56	0,54	1,97	24,28	38,73
Trent 900	0RR00*	335,0	0,00	0,08	0,07	1,21	0,00	0,18	1,19	21,56
Trent 1000	2XX007	335,0	0,00	0,08	0,07	1,21	0,00	0,18	1,19	21,56
A35X	2XX006	335,0	0,00	0,08	0,07	1,21	0,00	0,18	1,19	21,56
A35X	2XX005	335,0	0,00	0,08	0,07	1,21	0,00	0,18	1,19	21,56

\* vorläufige Herstellerangaben, die im Genehmigungsverfahren zum Bau der A380-Halle verwendet wurden.

Tab. 4-4 Grenzwerte der SN für die neu generierten Triebwerke (Erläuterung s. 3.6)

Triebwerksname	UID	Rated Output F <sub>00</sub> KN	Maximale, gesetzlich erlaubte Smoke Number			
			T/O	C/O	App	Idle
A320 Nachfolger	1XX001	120,1	22,51	22,51	22,51	22,51
A345	3XX001	236,0	18,72	18,72	18,72	18,72
GENx	2XX003	296,0	16,05	16,05	16,05	16,05
GP7000	2XX004	343,0	16,89	16,89	16,89	16,89
B73X Nachfolger	1XX002	121,4	22,44	22,44	22,44	22,44
Trent 900	0RR00*	335,0	17,00	17,00	17,00	17,00
Trent 1000	2XX007	335,0	17,00	17,00	17,00	17,00
A35X	2XX006	335,0	17,00	17,00	17,00	17,00
A35X	2XX005	335,0	17,00	17,00	17,00	17,00

\* vorläufige Herstellerangaben, die im Genehmigungsverfahren zum Bau der A380-Halle verwendet wurden.

Das Verfahren zur Ableitung der Emissionen in der oberen Tabelle wird im Folgenden erläutert am Beispiel des Triebwerkes GP7000 (Airbus 380). Als Vergleichstriebwerk für das GP7000 wurde das Triebwerk GE90-115B herangezogen. Das GE90 ist die technologische Basis für das daraus entwickelte GP7000 Triebwerk [EngineAlliance] Aus den Herstellerangaben der beiden Triebwerke sind folgende charakteristische Daten bekannt:

Tab. 4-5 Charakteristische Daten für die Triebwerke GE90-115B und GP7000

	<b>Triebwerk</b>	<b>UID</b>	<b>Gesamtdruck- verhältnis</b>	<b>Maximalschub (kN)</b>
Reales Bezugs-TW	GE90-115B	7GE099	42,24	513,9
Prognose-TW	GP7000	2XX004	45,6	343,0

In diesem Fall entspricht das Druckverhältnis des zukünftigen Triebwerks nur näherungsweise dem des Bezugstriebwerks. In den übrigen Fällen wird nach derzeitiger Kenntnis von Übereinstimmung der Verhältnisse ausgegangen. Der benötigte Maximalschub des GP7000 ist laut Herstellerangabe (EngineAlliance) niedriger als beim GE90-115B. Bei vergleichbarem Wirkungsgrad wirkt sich dies auf den zu erwartenden Treibstoffverbrauch aus. Die Angaben für den Treibstoffverbrauch (Fuel Flow) wurden entsprechend dem Verhältnis der Maximalschübe angepasst<sup>1</sup>. Mit diesen Anpassungen errechnen sich für das neue Triebwerk GP7000 folgende Werte für den Fuel Flow.

Tab. 4-6 Angepasster Fuel Flow für die Triebwerke GE90-115B und GP7000

<b>Triebwerk</b>	<b>Fuel Flow kg/s</b>				<b>Fuel kg</b>
	<b>T/O</b>	<b>C/O</b>	<b>App</b>	<b>Idle</b>	<b>LTO Cycle</b>
GE90-115B	4,69	3,67	1,13	0,38	1546,00
GP7000	3,13	2,45	0,75	0,25	1031,87

Die Skalierung der Fuel Flows über den Schub stellt eine Vereinfachung dar, bei der die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Triebwerke unbeachtet bleiben. Sie ist aufgrund fehlender Daten jedoch eine mit vertretbaren Unsicherheiten behaftete Berechnungsmethode.

Mit dem vom Hersteller angegebenen Reduktionsfaktor von 15% für die spezifischen NOx-Emissionen des GP7000 gegenüber GE90-115B ergeben sich die Emissionsindizes in Tab. 3-7 für die einzelnen Laststufen. Zusätzlich angegeben sind die Maßzahlen der mittleren und der charakteristischen Emission sowie der zugehörige CAEP2-Grenzwert und die jeweiligen Anteile der spezifischen Emission an diesem Grenzwert. Da die charakteristische Emission des zukünftigen Triebwerks

<sup>1</sup> Beim A345-Triebwerk und dem GENx wird der Treibstoffverbrauch ebenfalls über den vom Hersteller prognostizierten Schub skaliert. Bei den übrigen Prognose-Triebwerken werden jeweils Treibstoffverbrauch und Schub des Referenztriebwerks angesetzt.

nicht aus der Anzahl von vermessenen Exemplaren ermittelt werden kann, wurde dafür die prognostizierte mittlere Emission mit dem Verhältnis der charakteristischen zur mittleren Emission des Bezugstriebwerks skaliert.

Tab. 4-7 Abgeleitete NO<sub>x</sub>-Emissionen für das Triebwerk GP7000

Triebwerk	EI NO <sub>x</sub> g/kg				Dp/F <sub>00</sub> g/kN			% CAEP2	
	T/O	C/O	App	Idle	Ave	Char.	CAEP2	Ave	Char.
GE90-115B	50,34	35,98	16,50	5,19	67,89	78,7	99,58	68,17%	79,00%
GP7000	42,79	30,58	14,03	4,41	57,71	66,9	104,96	54,99%	63,70%

Vom Hersteller wurde mit anderen Methoden ein Wert für Dp/F<sub>00</sub> NO<sub>x</sub> für das GP7000 von 56,5 g/kN mittlere Emission (Ave) ermittelt. Dies entspricht einer Reduktion gegenüber dem Vergleichstriebwerk von ca. 17%. Die Übereinstimmung ist relativ gut, wobei der hier gewählte Ansatz konservativ zu höheren Emissionen führt.

#### 4.6 Problematik der Prognose für andere Schadstoffkomponenten

Im Gegensatz zur Schadstoffkomponente NO<sub>x</sub> sind für die gasförmigen Komponenten CO, HC Grenzwerte nach ICAO Annex 16 festgelegt, die seit ihrer erstmaligen Verabschiedung unverändert fortgeschrieben worden sind. Diese Grenzwerte sind wie folgt definiert:

Kohlenwasserstoffe (HC): Dp/F<sub>00</sub> = 19.6 g/kN

Kohlenmonoxid (CO): Dp/F<sub>00</sub> = 118 g/kN

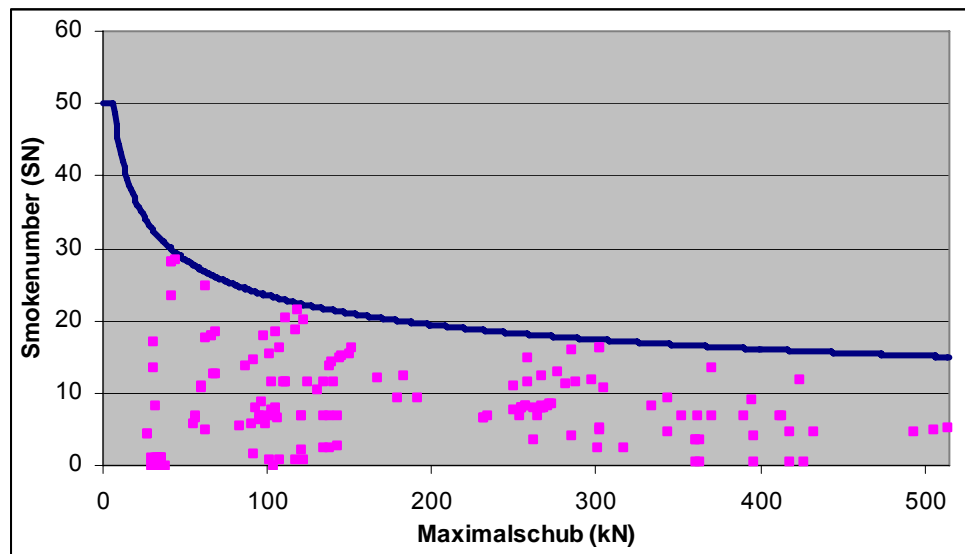
Diese konstanten Werte gelten über alle Schub- und Druckbereiche. Die neuen Triebwerke unterschreiten diese Grenzwerte bei weitem. Die Entwicklungsziele der Triebwerkshersteller laufen im Wesentlichen auf eine Minimierung des Treibstoffverbrauches und der NO<sub>x</sub>-Emissionen hinaus. Es gibt einzelne Brennkammerkonzepte bei denen eine Minimierung von NO<sub>x</sub> einhergeht mit einer graduellen Erhöhung von HC und CO. Da diese Erhöhung jedoch nicht eindeutig quantifizierbar ist, wird empfohlen, bei der Immissionsprognose für die Abgaskomponenten HC und CO die entsprechenden Zahlenwerte der Referenztriebwerke einzusetzen.

Für die Smokenumber gilt nach ICAO folgender Grenzwert:

SN = 83.6 x (F<sub>∞</sub>)<sup>-0.274</sup>, oder 50; der kleinere Wert ist zu verwenden.

Die Grenzwertdefinition legt einen maximalen Wert für die Smokenumber fest, dieser darf auch von kommenden Triebwerksgenerationen nicht überschritten werden. Aus Abb. 4-4 wird der Verlauf des Grenzwertes über dem Maximalschub deutlich. Eingetragen in diese Darstellung sind auch die Werte für SN aus der ICAO-Emissionsdatenbank.

Abb. 4-4 Darstellung des Grenzwerteverlaufs für die Smokenumber (SN)



Zumeist liegen die modernen Triebwerke mit höheren Leistungen deutlich unterhalb des Grenzwertes. Das Design zukünftiger Brennkammern ist vor allem auf die Optimierung des Treibstoffverbrauches und der NO<sub>x</sub>-Emissionen ausgelegt. Diese Optimierung führt bei manchen Brennkammerkonzepten zu einem Anstieg der Smokenumber. Da der Grenzwert weiterhin gültig ist, könnte für eine sehr konservative Abschätzung für die neuen Triebwerke mit dem leistungsbezogenen Grenzwert gerechnet werden (Tab. 3-4). Die Flugzeughersteller fordern seit längerem eine deutliche Unterschreitung des Smoke-Grenzwertes. Realistischer als mit dem Grenzwert zu rechnen, ist das in B11-18.1 beschriebene Ersatzverfahren für Triebwerke ohne Angabe der Smoke Number. Die bisher vorliegenden Untersuchungen zu diesem Effekt lassen darauf schließen, dass sich die Smoke Number in der Praxis nicht mehr als verdoppelt gegenüber dem Bezugstriebwerk [MTU 2005], was zu deutlich niedrigeren Werten führt.

#### 4.7 Empfehlungen zum Umgang mit den ICAO-Emissionsdaten

Gemäß der Definition der Zertifizierung von Triebwerksemissionen sind die Messwerte mit einem Faktor zu bewerten, der von der Anzahl der für eine Emissionszertifizierung herangezogenen Triebwerke abhängt. Nach ICAO Annex 16 Volume II liegt der Aufschlag bei einem gemessenen Triebwerk bei 15,9% und verringert sich bei drei gemessenen Triebwerken auf 5,9%. In der Emissionsdatenbank sind die so berechneten Werte als „charakteristische“ Emissionsmengen (characteristic emissions) dargestellt. Nach Aussage aller Triebwerkshersteller sind die Toleranzen bei der Fertigung von Triebwerken so eng ausgelegt, dass bei der Messung von Triebwerksemissionen bzgl. NO<sub>x</sub> eine Standardabweichung von knapp 16% als überhöht angesehen wird, selbst wenn nur ein einzelnes Triebwerk auf dem Prüfstand gemessen und zertifiziert wird. Es ist aus diesem Grunde legitim, die tatsächlichen Emissionswerte und nicht die „charakteristischen“ Emissionswerte, für die Immissionsprognose für NO<sub>x</sub> heranzuziehen.

Die Zeiten und die Leistungsstufen des ICAO-Start-Lande-Zyklus sind in Tab. 4-8 aufgeführt. Diese Leistungsstufen liegen auch der Zertifizierung von Grenzwerten zugrunde. Durch die technologische Entwicklung in den letzten Jahren ist der spezifische Leistungsbedarf moderner Flugzeuge geringer als in den Zertifizierungsbedingungen unterstellt. Bei den Rollbewegungen am Boden werden heutzutage die Triebwerke mit ca. 3% – 4% ihres Nennschubes betrieben. 100% Startschub wird in der Regel nur bei ungünstigen Startbedingungen und voller Auslastung benötigt.

Tab. 4-8      Zeiten und Leistungsstufen des ICAO-Start-Lande-Zyklus

	<b>Startlauf (TO)</b>	<b>Steigflug (C/O)</b>	<b>Anflug (App)</b>	<b>Rollen am Boden (Taxi)</b>
<b>Schub</b>	100%	85%	30%	7%
<b>Zeiten in s</b>	42	132	240	1560

Das Rechnen mit den von der ICAO in der Emissionsdatenbank veröffentlichten Daten kann somit zu erhöhten Emissionen gegenüber den tatsächlichen Emissionen führen. Diese Überschätzung fällt für die einzelnen Schadstoffkomponenten unterschiedlich aus und hängt von den tatsächlichen Betriebsbedingungen ab. In der Definition der Leistungsstufen für die Messung und Festlegung von Emissionsdaten wird der in der Vergangenheit erreichte Fortschritt in der Verbesserung der Flugzeugzellen, und damit einer Verringerung des spezifischen Schubbedarfes nicht berücksichtigt und demzufolge auch nicht honoriert. Zieht man alle genannten Faktoren in Betracht, ist daraus zu schließen, dass die Verwendung der ICAO-Emissionsdaten zu Prognosezwecken tendenziell zu einer konservativen Abschätzung der realen Emissionsverhältnisse führt. [MTU2005]

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Ist-Situation 2005

In der nachfolgenden Tab. 5-1 sind die 495.626 Jahresflugbewegungen<sup>2</sup> des Jahres 2005 für die einzelnen Flugzeugtypen dargestellt. Die Rangfolge in dieser Tabelle wurde nach der Häufigkeit der Flugbewegungen geordnet. Die Darstellung wurde bei ca. 0,5% der Jahresflugbewegungen aus Gründen der Übersicht abgeschnitten, da die verbleibenden etwa 4% sich aus vielen verschiedenen Flugzeugtypen mit jeweils sehr geringer Häufigkeit zusammensetzen (in der weiteren Auswertung sind sie allerdings enthalten).

Tab. 5-1 Bezugsjahr 2005, Verteilung der 495.626 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Relative Häufigkeit Flugbewegungen	AzB-Klasse
<b>Strahlflugzeuge</b>		
Airbus 320	13,3%	S5.2
Airbus 321	9,2%	S5.2
Boeing 737-300	8,9%	S5.2
Boeing 737-500	8,8%	S5.2
Boeing 747-400	6,5%	S7
Airbus 319	4,4%	S5.2
Airbus 300-600	3,9%	S6.1
Avro RJ85	3,8%	S5.1
Airbus 340-300	2,8%	S6.3
Boeing 737-800	2,6%	S5.2
Boeing 767-300	2,5%	S6.1
Douglas MD 11	2,1%	S6.2
Airbus 330-300	2,0%	S6.1
Canadair RegionalJet 700	1,9%	S5.1
Embraer 145	1,8%	S5.1
Boeing 777-200	1,4%	S6.1
BAe 146-300	1,3%	S5.1
Embraer 170	1,2%	S5.1
Boeing 757-200	1,1%	S5.2
Fokker 70	1,1%	S5.1
Canadair RegionalJet 200	1,0%	S5.1
Bae 146-200	1,0%	S5.1
Boeing 737-400	1,0%	S5.2
C17-Globemaster	0,9%	S6.2
Boeing 747-200	0,9%	S7

<sup>2</sup> Incl. Helikopter, Kleinflugzeuge und Militär. Die Gesamtzahl ohne Helikopter und Kleinflugzeuge (DES) beträgt 494.483.

Flugzeugtyp	Relative Häufigkeit Flugbewegungen	AzB-Klasse
Airbus 340-600	0,8%	S6.3
Airbus 330-200	0,8%	S6.1
Avro RJ-100	0,8%	S5.1
Boeing 757-300	0,8%	S5.2
Airbus 310	0,7%	S6.1
Canadair RegionalJet 100	0,6%	S5.1
Fokker 100	0,6%	S5.1
Douglas MD-87	0,5%	S5.3
Boeing 737-700	0,5%	S5.2
Boeing 737-600	0,5%	S5.2
Douglas DC-10	0,4%	S6.2
Sonstige Strahlflugzeuge	4,0%	
<b>Zwischensumme</b>	<b>96,4%</b>	
<b>Propellerflugzeuge</b>		
Dash-DH8C	1,2%	P2.1
ATR-72	0,8%	P2.1
ATR-45	0,5%	P2.1
ATR-43	0,3%	P2.1
Sonstige Propellerflugzeuge	0,7%	
<b>Zwischensumme</b>	<b>3,5%</b>	
Helikopter	0,1%	H2
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	

Zur Bestimmung der Emissionen aus dem Flugverkehr ist neben der Häufigkeit der Flugbewegungen auch die Verteilung der Triebwerke innerhalb der einzelnen Flugzeugmuster erforderlich. Einzelne Triebwerke können mit verschiedenen UID-Kennungen (je nach Baureihe, Seriennummer usw.) geführt werden, die ihrerseits zur eindeutigen Bestimmung der Emissionsfaktoren notwendig sind. Die weitere Vorgehensweise wird beispielhaft für die Klasse S7 in den nachfolgenden Tabellen Tab. 5-2 und Tab. 5-3 dargestellt.

Tab. 5-2 Bezugsjahr 2005, Häufigkeitsverteilung der Flugzeugtypen innerhalb der AzB-Klasse S7

Flugzeugtyp	Wichtung in AzB-Klasse	relative Häufigkeit Flugbewegungen
Boeing 747-100	1,0%	0,07%
Boeing 747-200	11,6%	0,87%
Boeing 747-300	0,9%	0,07%
Boeing 747-400	86,4%	6,49%
Boeing 747SP	0,1%	0,004%
	100,00%	7,50%

Tab. 5-3 Bezugsjahr 2005, Zuordnung der Triebwerkstypen zu den Fluggeräten  
 (am Beispiel der AzB-Klasse S7)

Flugzeugtyp	AzB-Kl.	Triebwerk	ICAO-UID	Anz. Triebw.	Wichtung innerhalb des Typs
Boeing 747-100	S7	JT9D-7A	1PW021	4	1,0
Boeing 747-200	S7	GECF6-50E2	1GE009	4	0,3059
Boeing 747-200	S7	GECF6-50E2	3GE077	4	0,3059
Boeing 747-200	S7	JT9D-7R4G2	1PW029	4	0,1421
Boeing 747-200	S7	JT9D-7J	1PW024	4	0,1016
Boeing 747-200	S7	JT9D-7Q	1PW025	4	0,0569
Boeing 747-200	S7	RB211-524D4	1RR007	4	0,0438
Boeing 747-200	S7	RB211-524D4	1RR008	4	0,0438
Boeing 747-300	S7	PWJT9D-7R4G2	1PW029	4	1
Boeing 747-400	S7	GECF6-80C2B1F	1GE023	4	0,2167
Boeing 747-400	S7	GECF6-80C2B1F	1GE024	4	0,2167
Boeing 747-400	S7	GECF6-80C2B1F	2GE045	4	0,2167
Boeing 747-400	S7	PWPW4056	1PW042	4	0,1380
Boeing 747-400	S7	PWPW4056	1PW041	4	0,1380
Boeing 747-400	S7	RB211-524H-T	4RR037	4	0,0434
Boeing 747-400	S7	CF6-80C2B5F	3GE057	4	0,0305
Boeing 747SP	S7	PWJT9D-7F	1PW022	4	0,5
Boeing 747SP	S7	PWJT9D-7F	1PW023	4	0,5
<b>Typenzahl</b>					<b>5,0000</b>

Zur Berechnung der Emissionen eines einzelnen Flugzeugtyps sind die Emissionsfaktoren der ICAO-Emissions-Datenbank [ICAO2006] für die jeweiligen UIDs mit ihren Wichtungsfaktoren aus Tab. 5-3 und der Anzahl der Triebwerke zu multiplizieren sowie innerhalb des Flugzeugtyps aufzusummieren. Die Jahresemission eines Typs ergibt sich aus dessen Anteil an den Flugbewegungen in Tab. 5-1 und der Gesamtzahl der jährlichen Flugbewegungen.

Für die Modellrechnungen zur Immissionsprognose wurden aus dem umfangreichen Datenmaterial der so ermittelten Zuordnungen die häufigsten bzw. repräsentativen Kombinationen als Eingangsdaten ausgewählt. Die Verteilung der Triebwerkstypen innerhalb der AzB-Klassen ergibt sich durch Kombination des Anteils des Flugzeugtyps an der AzB-Klasse mit dem Anteil der Triebwerksverteilung für den jeweiligen Flugzeugtyp (s. Tab. 5-4). Der besseren Übersicht wegen sind die zusammengehörenden Kombinationen von Flugzeugmuster und Triebwerksmuster mit einheitlicher Schattierung hinterlegt.

In Tab. 5-4 sind die dargestellten Flugbewegungen nach AzB-Klassen zusammengefasst. Die Häufigkeit der Flugbewegungen pro AzB-Klasse setzt sich hier jeweils aus den in Tab. 5-1 aufgeführten Einzelangaben und einem geringen Anteil der sonstigen Flugzeuge zusammen. Die Klassen S3.2 und S4 wurden auf S6.2, die Klassen S4/S4b auf S7 umgelegt.

Tab. 5-4 Bezugsjahr 2005, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen  
 (verdichtetes Ergebnis)

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anz. TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ		
H2	0,08%	Eurocopter AS32 (wird umgelegt)	100,0%	Turbomeca Makila			100,00%		
P1.4	0,15%	Propeller (wird umgelegt)	100,0%	PROP			100,00%		
P2.1	3,32%	AT43	11,9%	PW120		2	100,0%		
		AT45	16,6%	PW127E		2	100,0%		
		AT72	27,7%	PW124B		2	100,0%		
		DHC8	43,9%	PW123B		2	100,0%		
S5.1	16,86%	Avro RJ85	28,7%	ALF507-1F	1TL004	4	100,00%		
		Canadair Regional Jet 700	14,7%	CF34-8C1	6GE096	2	100,00%		
		Embraer 145	14,0%	AE3007A		4AL003		2	53,03%
				AE3007A1/1		6AL008		2	8,72%
						6AL009		2	8,73%
						6AL010		2	8,73%
				AE3007A1		6AL005		2	6,92%
						6AL006		2	6,93%
						6AL007		2	6,93%
		Bae 146-300	9,7%	ALF502R-5	1TL003	4	100,00%		
		Embraer 170	9,3%	CF34-8E5	6GE094	2	100,00%		
Fokker 70	8,1%	Tay 620-15	1RR020	2	100,00%				
Canadair Regional Jet 200	7,9%	CF34-3B1	5GE084	2	100,00%				
Bae 146-200	7,6%	ALF502R-5	1TL003	4	100,00%				
S5.2	51,47%	Airbus 320	28,2%	CFM56-5A1	1CM008	2	100,00%		
		Airbus 321	19,4%	V2530-A5	1IA005	2	72,62%		
				V2533-A5	3IA008	2	27,38%		
		Boeing 737-300	18,8%	CFM56-3B1	1CM004	2	100,00%		
		Boeing 737-500	18,7%	CFM56-3B1	1CM004	2	78,71%		
				CFM56-3C1	1CM006	2	10,64%		
					1CM007	2	10,65%		
		Airbus 319	9,3%	CFM56-5A5	4CM036	2	100,00%		
Boeing 737-800	5,5%	CFM56-7B26	3CM033	2	73,97%				
		CFM56-7B27	3CM034	2	26,03%				
S5.3	1,66%	Douglas MD-81 – MD-88	80,8%	JT8D-217C	4PW070	2	88,20%		
				JT8D-219	1PW019	2	5,90%		
					4PW071	2	5,90%		
		Tupolev 154	19,2%	JT8D-217	4PW068	2	100,00%		
S6.1	11,62%	Airbus 300-600	34,4%	CF6-80C2A3	1GE018	2	38,01%		
					2GE038	2	38,01%		
				CF6-80C2A5	1GE020	2	11,99%		

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anz. TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
					2GE039	2	11,99%
		Boeing 767-300	22,1%	PW4060	1PW043	2	100,00%
		Airbus 330-300	17,6%	Trent 772B-60	3RR030	2	76,85%
				PW4168A	4PW067	2	11,58%
					7PW082	2	11,57%
		Boeing 777-200	12,7%	Trent 892	2RR027	2	36,27%
				PW4077	2PW061	2	28,23%
				PW4090	3PW066	2	18,80%
				GE90-92B	3GE061	2	8,35%
					3GE066	2	8,36%
		Airbus 330-200	7,4%	PW4168A	4PW067	2	28,21%
					7PW082	2	28,21%
				Trent 772B-60	3RR030	2	43,58%
		Airbus 310	5,9%	CF6-80C2A2	1GE016	2	50,00%
					2GE037	2	50,00%
S6.2	3,67%	Douglas MD-11	60,8%	CF6-80C2D1F	1GE024	3	44,16%
					2GE045	3	44,17%
				PW4462	1PW058	3	5,83%
					1PW059	3	5,84%
		C17-Globemaster	27,1%	PW2040	4PW073	4	100,00%
		Douglas DC-10	12,1%	CF6-50C2	3GE074	3	100,00%
S6.3	3,61%	Airbus 340-300	76,8%	CFM56-5C4	2CM015	4	88,48%
				CFM56-5C2	1CM010	4	11,52%
		Airbus 340-600	23,2%	Trent 556	6RR041	4	100,00%
S7	7,56%	Boeing 747-400	88,2%	CF6-80C2B1F	1GE024	4	35,06%
					2GE045	4	35,07%
				PW4056	1PW041	4	14,93%
					1PW042	4	14,94%
		Boeing 747-200	11,8%	CF6-50E2	1GE009	4	32,93%
					3GE077	4	32,92%
				JT9D-7R4G2	1PW029	4	15,02%
				JT9D-7J	1PW024	4	10,57%
				RB211-524D4	1RR007	4	4,28%
					1RR008	4	4,28%

## 5.2 Prognosenullfall

Die Verteilung der ca. 520.000 Jahresflugbewegungen des Prognosenullfalls 2020 auf die Flugzeugtypen bzw. AzB-Klassen zeigt die nachfolgende Tab. 5-5, die verdichtete Verteilung der Flugzeugtypen innerhalb der AzB-Klassen und die charakteristische Triebwerksbestückung die Tab. 5-6.

Tab. 5-5 Prognosenullfall 2020, Verteilung der ca. 520.000 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Anteil an Flugbewegungen	AzB
<b>Strahlflugzeuge</b>		
Airbus 320	19,97%	S5.2
Airbus 321	8,60%	S5.2
Embraer 170	8,13%	S5.1
Airbus 350-300	7,87%	S6.1
Airbus 319	7,14%	S5.2
Boeing 737-700	5,89%	S5.2
Boeing 737-800	4,89%	S5.2
Embraer 195	4,50%	S5.1
Airbus 380-800	4,37%	S7
Boeing 777-200	4,30%	S6.1
Airbus 340-600	3,57%	S6.3
Boeing 747-800	3,57%	S7
Airbus 330-300	3,24%	S6.1
Boeing 737-600	2,25%	S5.2
Boeing 787-300	2,25%	S6.1
Boeing 767-300	1,32%	S6.1
Learjet 60XR	1,19%	S5.1
Airbus 318	1,06%	S5.2
Boeing 747-400	0,99%	S7
Cessna 501	0,93%	S5.1
Embraer 145	0,79%	S5.1
Tupolev 204	0,53%	S5.2
Boeing 787-800	0,53%	S6.1
Airbus 340-300	0,53%	S6.3
Airbus 350-800	0,40%	S6.1
Boeing 777-300	0,40%	S6.1
Airbus 380-900	0,40%	S7
Airbus 330-200	0,13%	S6.1
Boeing 787-900	0,13%	S6.1
<b>Zwischensumme</b>	<b>99,87%</b>	
Eurocopter AS332	0,13%	H2
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	

Tab. 5-6 Prognosenullfall 2020, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen und Triebwerkszuordnung, verdichtetes Ergebnis

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ		
H2	0,13%	Eurocopter AS32 (wird umgelegt)	100,00%	Turbomeca Makila		2	100,00%		
S5.1	15,54%	Cessna C501	5,96%	BR700-710-C4-11	6BR010	2	33,00%		
				BR700-710A1-10	4BR008	2	33,00%		
				BR700-710A2-20	4BR009	2	34,00%		
		LearJet LR60XR	7,66%	PW306A	7PW077	2	100,00%		
		EMBRAER 195	28,94%	CF34-8E5A1	6GE095	2	100,00%		
		EMBRAER 145	5,11%			AE3007A1	6AL007	2	12,50%
						AE3007A1/1	6AL010	2	12,50%
						AE3007A1/3	6AL013	2	12,50%
						AE3007A1P	6AL016	2	12,50%
						AE3007A3	6AL019	2	12,50%
						AE3007A1E	6AL020	2	12,50%
						AE3007C	6AL022	2	12,50%
		EMBRAER 170	52,34%			CF34-8E2	6GE093	2	33,00%
						CF34-8E5	6GE094	2	33,00%
CF34-8E5A1	6GE095					2	34,00%		
S5.2	50,33%	Airbus 318	2,10%	PW6122A	7PW083	2	50,00%		
				CFM56-5B8/P	7CM048	2	50,00%		
		Airbus 319	14,19%			CFM56-5B5/P	3CM027	2	5,00%
						CFM56-5B6/P	3CM028	2	5,00%
						CFM56-5A5	4CM036	2	90,00%
		Airbus 320	31,75%			V2527-A5	11A003	2	6,00%
						V2500-A1	11A001	2	6,00%
						CFM56-5A1	1CM008	2	65,00%
						CFM56-5B4/2P	3CM021	2	23,00%
		Airbus 320 Nachfolger	7,94%			1XX001	2	100,00%	
		Airbus 321	17,08%			V2530-A5	11A005	2	50,00%
						V2533-A5	31A008	2	30,00%
						CFM56-5B3/2P	4CM038	2	10,00%
						CFM56-5B1/2P	3CM020	2	10,00%
Boeing 737-600	3,57%			CFM56-7B18	3CM029	2	25,00%		
				CFM56-7B20	3CM030	2	12,50%		
				CFM56-7B20/2	4CM039	2	25,00%		

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
				CFM56-7B22	3CM031	2	12,50%
				CFM56-7B22/2	4CM040	2	25,00%
		Boeing 737-700	9,36%	CFM56-7B20	3CM030	2	10,00%
				CFM56-7B20/2	4CM039	2	15,00%
				CFM56-7B22	3CM031	2	10,00%
				CFM56-7B22/2	4CM040	2	15,00%
				CFM56-7B24	3CM032	2	10,00%
				CFM56-7B24/2	4CM041	2	15,00%
				CFM56-7B26	3CM033	2	10,00%
				CFM56-7B26/2	4CM042	2	15,00%
		Boeing 737-800	7,78%	CFM56-7B24	3CM032	2	12,50%
				CFM56-7B24/2	4CM041	2	25,00%
				CFM56-7B26	3CM033	2	12,50%
				CFM56-7B26/2	4CM042	2	25,00%
				CFM56-7B27	3CM034	2	12,50%
				CFM56-7B27/2	4CM043	2	12,50%
		Boeing 73X Nachfolger	5,18%		1XX002	2	100,00%
		Tupolev 204	1,05%	RB211-535E4B	5RR039	2	50,00%
				RB211-535E4	5RR038	2	50,00%
S6.1	20,57%	Airbus 330-200	0,64%	PW4168A	7PW082	2	100,00%
		Airbus 330-300	15,76%	PW4168A	7PW082	2	25,00%
				Trent 772	3RR030	2	25,00%
				Trent 768	3RR029	2	25,00%
				CF6-80E1A4B	4GE080	2	25,00%
		Airbus 350-300	38,26%		2XX005	2	40,00%
					2XX006	2	60,00%
		Airbus 350-800	1,93%		2XX005	2	40,00%
					2XX006	2	60,00%
		Boeing 767-300	6,43%	CF6-80C2B7F	2GE055	2	15,00%
				RB211-524H-T	4RR037	2	15,00%
				CF6-80C2B2F	2GE046	2	15,00%
				CF6-80C2B2	2GE042	2	15,00%
				CF6-80C2B4	2GE043	2	15,00%
				CF6-80C2B6	2GE044	2	10,00%
				PW4x62	1PW059	2	15,00%
		Boeing 777-200	20,90%	PW4077	2PW061	2	6,00%
				Trent 877	2RR025	2	6,00%

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
				Trent 892	2RR027	2	8,00%
				Trent 895	5RR040	2	6,00%
				GE90-77B	6GE088	2	12,00%
				GE90-90B	6GE090	2	32,00%
				GE90-92B	3GE066	2	11,00%
				GE90-94B	6GE091	2	6,00%
				PW4090	3PW066	2	11,00%
				GE90-110B1	7GE097	2	2,00%
		Boeing 777-300	1,93%	GE90-115B	7GE099	2	25,00%
				GE90-94B	6GE091	2	25,00%
				Trent 892	2RR027	2	25,00%
				PW4098	5PW076	2	25,00%
		Boeing 787-300	10,93%	GEEnx	2XX003	2	50,00%
				Trent 1000	2XX007	2	50,00%
Boeing 787-800	2,57%	GEEnx	2XX003	2	50,00%		
		Trent 1000	2XX007	2	50,00%		
Boeing 787-900	0,64%	GEEnx	2XX003	2	50,00%		
		Trent 1000	2XX007	2	50,00%		
S6.3	4,10%	Airbus 340-300	12,90%	CFM56-5C4/P	7CM047	4	55,00%
				CFM56-5C2/P	7CM045	4	20,00%
				CFM56-5C3	1CM011	4	25,00%
		Airbus 340-600	87,10%	Trent 556-61	6RR041	4	100,00%
S7	9,33%	Airbus 380-800	46,81%	Trent 900	0RR000	4	70,00%
				GP7000	2XX004	4	30,00%
		Airbus 380-900	4,26%	Trent 900	0RR000	4	70,00%
				GP7000	2XX004	4	30,00%
		Boeing 747-400	10,64%	CF6-80C2B1F	2GE045	4	27,00%
				RB211-524G-T	4RR036	4	9,00%
				RB211-524H-T	4RR037	4	12,00%
				CF6-80C2B5F	3GE057	4	8,00%
				PW4056	1PW042	4	22,00%
				PW4x62	1PW059	4	22,00%
Boeing 747-800	38,30%	GEEnx	2XX003	4	100,00%		

Neue Triebwerke, für die es derzeit noch keine Daten gibt, sind in der Tabelle grün hinterlegt. (Ableitung s. Kapitel 4)

### 5.3 Planungsfall

Die Verteilung der ca. 701.000 Jahresflugbewegungen des Prognosejahres 2020 auf die Flugzeugtypen bzw. AzB-Klassen zeigt die nachfolgende

Tab. 5-7, die verdichtete Verteilung der Flugzeugtypen innerhalb der AzB-Klassen und die charakteristische Triebwerksbestückung die Tab. 5-8.

Tab. 5-7 Planungsfall 2020, Verteilung der ca. 701.000 Jahresflugbewegungen auf die Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Anteil an Flugbewegungen	AzB
Airbus 320	17,14%	S5.2
Embaer 195	16,80%	S5.1
Airbus 350-300	9,10%	S6.1
Embraer 170	7,59%	S5.1
Airbus 319	7,45%	S5.2
Airbus 380-800	4,09%	S7.1
Airbus 330-300	3,99%	S6.1
Airbus 340-600	3,51%	S6.3
Boeing 737-800	3,31%	S5.2
Boeing 747-800	3,07%	S7.1
Boeing 737-700	2,97%	S5.2
Boeing 777-200	2,78%	S6.1
Airbus 321	2,48%	S5.2
Boeing 737-600	2,43%	S5.2
Boeing 767-300	1,75%	S6.1
Boeing 747-400	1,46%	S7.1
Boeing 787-800	1,31%	S6.1
Boeing 777-300	1,27%	S6.1
Airbus 350-800	1,17%	S6.1
Boeing 787-300	1,17%	S6.1
Embraer 145	1,07%	S5.1
Learjet 60XR	1,02%	S5.1
Cessna 501	0,93%	S5.1
Tupolev 204	0,58%	S5.2
Airbus 318	0,29%	S5.2
Airbus 330-200	0,29%	S6.1
Airbus 350-900	0,29%	S6.1
Airbus 340-300	0,29%	S6.3
Airbus 380-900	0,19%	S7.1
Airbus 340-500	0,10%	S6.3
<b>Zwischensumme</b>	<b>99,90%</b>	
Eurocopter AS332	0,10%	H2
Summe	100,00%	

Tab. 5-8 Planungsfall 2020, Zusammensetzung der AzB-Klassen aus Flugzeugtypen und Triebwerkszuordnung, verdichtetes Ergebnis

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
H2	0,10%	Eurocopter AS332 (wird umgelegt)	100,00%	Turbomeca Makila		2	100,00%
S5.1	27,41%	Cessna C501	3,37%	BR700-710-C4-11	6BR010	2	33,00%
				BR700-710A1-10	4BR008	2	33,00%
				BR700-710A2-20	4BR009	2	34,00%
		Learjet 60XR	3,73%	PW306A	7PW077	2	100,00%
		Embraer 195	61,28%	CF34-8E5A1	6GE095	2	100,00%
		Embraer 145	3,91%	AE3007A1	6AL007	2	12,50%
				AE3007A1/1	6AL010	2	12,50%
				AE3007A1/3	6AL013	2	12,50%
				AE3007A1P	6AL016	2	12,50%
				AE3007A3	6AL019	2	12,50%
				AE3007A1E	6AL020	2	12,50%
				AE3007C	6AL022	2	12,50%
				AE3007C1	6AL024	2	12,50%
		Embraer 170	27,71%	CF34-8E2	6GE093	2	33,00%
				CF34-8E5	6GE094	2	33,00%
CF34-8E5A1	6GE095			2	34,00%		
S5.2	36,66%	Airbus 318	0,80%	PW6122A	7PW083	2	50,00%
				CFM56-5B8/P	7CM048	2	50,00%
		Airbus 319	20,32%	V2527-A5	11A003	2	1,00%
				CFM56-5A5	4CM036	2	64,00%
				CFM56-5B5/P	3CM027	2	6,00%
				CFM56-5B6/P	3CM028	2	8,00%
				V2522-A5	3IA006	2	1,00%
				CFM56-5B6/2P	3CM022	2	20,00%
		Airbus 320	37,40%	CFM56-5A1	1CM008	2	62,50%
				CFM56-5B4/P	3CM026	2	5,00%
				CFM56-5B4/2P	3CM021	2	20,00%
				CFM56-5A3	1CM009	2	7,50%
				V2527-A5	11A003	2	2,50%
				V2500-A1	11A001	2	2,50%
		Airbus 320 Nachfolger	9,35%		1XX001	2	100,00%
		Airbus 321	6,77%	V2530-A5	11A005	2	50,00%
				V2533-A5	3IA008	2	30,00%
				CFM56-5B3/2P	4CM038	2	10,00%
				CFM56-5B1/2P	3CM020	2	10,00%
		Boeing 737-600	5,31%	CFM56-7B18	3CM029	2	23,75%
CFM56-7B20	3CM030			2	13,75%		

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
				CFM56-7B20/2	4CM039	2	25,00%
				CFM56-7B22	3CM031	2	13,75%
				CFM56-7B22/2	4CM040	2	23,75%
		Boeing 737-700	6,48%	CFM56-7B20	3CM030	2	10,00%
				CFM56-7B20/2	4CM039	2	15,00%
				CFM56-7B22	3CM031	2	10,00%
				CFM56-7B22/2	4CM040	2	15,00%
				CFM56-7B24	3CM032	2	10,00%
				CFM56-7B24/2	4CM041	2	15,00%
				CFM56-7B26	3CM033	2	10,00%
				CFM56-7B26/2	4CM042	2	15,00%
		Boeing 737-800	7,22%	CFM56-7B24	3CM032	2	11,25%
				CFM56-7B24/2	4CM041	2	21,25%
				CFM56-7B26	3CM033	2	11,25%
				CFM56-7B26/2	4CM042	2	22,50%
				CFM56-7B27	3CM034	2	11,25%
				CFM56-7B27/2	4CM043	2	22,50%
		B73X Nachfolger	4,75%		1XX002	2	100,00%
		Tupolev 204	1,59%	RB211-535E4B	5RR039	2	50,00%
				RB211-535E4	5RR038	2	50,00%
S6.1	23,13%	Airbus 330-200	1,26%	PW4168A	7PW082	2	100,00%
		Airbus 330-300	17,26%	PW4168A	7PW082	2	25,00%
				Trent 772	3RR030	2	25,00%
				Trent 768	3RR029	2	25,00%
				CF6-80E1A4B	4GE080	2	25,00%
		Airbus 350-300	39,37%		2XX005	2	40,00%
					2XX006	2	60,00%
		Airbus 350-800	5,05%		2XX005	2	40,00%
					2XX006	2	60,00%
		Airbus 350-900	1,26%		2XX005	2	40,00%
					2XX006	2	60,00%
		Boeing 767-300	7,58%	CF6-80C2B7F	2GE055	2	15,00%
				RB211-524H-T	4RR037	2	15,00%
				CF6-80C2B2F	2GE046	2	15,00%
				CF6-80C2B2	2GE042	2	15,00%
				CF6-80C2B4	2GE043	2	15,00%
				CF6-80C2B6	2GE044	2	10,00%
				PW4x62	1PW059	2	15,00%
		Boeing 777-200	12,00%	PW4077	2PW061	2	6,00%
				Trent 877	2RR025	2	6,00%
				Trent 892	2RR027	2	8,00%
				Trent 895	5RR040	2	6,00%
				GE90-77B	6GE088	2	12,00%

AzB	Anteil AzB an Gesamtverkehr	Flugzeugtyp	Anteil Typ an AzB	Triebwerkstyp	UID	Anzahl TW pro Flugzeug	Anteil TW an Typ
				GE90-90B	6GE090	2	32,00%
				GE90-92B	3GE066	2	11,00%
				GE90-94B	6GE091	2	6,00%
				PW4090	3PW066	2	11,00%
				GE90-110B1	7GE097	2	2,00%
		Boeing 777-300	5,47%	GE90-115B	7GE099	2	25,00%
				GE90-94B	6GE091	2	25,00%
				Trent 892	2RR027	2	25,00%
				PW4098	5PW076	2	25,00%
		Boeing 787-300	5,05%	GEenx	2XX003	2	50,00%
				Trent 1000	2XX007	2	50,00%
		Boeing 787-800	5,68%	GEenx	2XX003	2	50,00%
				Trent 1000	2XX007	2	50,00%
S6.3	3,89%	Airbus 340-300	7,50%	CFM56-5C4/P	7CM047	4	55,00%
				CFM56-5C2/P	7CM045	4	20,00%
				CFM56-5C3	1CM011	4	25,00%
		Airbus 340-500	2,50%	Trent 553-61	3XX001	4	100,00%
		Airbus 340-600	90,00%	Trent 556-61	6RR041	4	100,00%
S7	8,81%	Airbus 380-800	46,41%	Trent 900	0RR000	4	70,00%
				GP7000	2XX004	4	30,00%
		Airbus 380-900	2,21%	Trent 900	0RR000	4	70,00%
				GP7000	2XX004	4	30,00%
		Boeing 747-400	16,57%	CF6-80C2B1F	2GE045	4	27,00%
				RB211-524G-T	4RR036	4	9,00%
				RB211-524H-T	4RR037	4	12,00%
				CF6-80C2B5F	3GE057	4	8,00%
				PW4056	1PW042	4	22,00%
				PW4x62	1PW059	4	22,00%
		Boeing 747-800	34,81%	GEenx	2XX003	4	100,00%

Neue Triebwerke, für die es derzeit noch keine Daten gibt, sind in der Tabelle grün hinterlegt. (Ableitung s. Kapitel 4)