

Tab. 3: Minimalwerte und Maximalwerte sicher nachgewiesener organisch-chemischer Triebwerks-Emissionen (Triebwerkstypen CF6-50C2/E2, CFM56-3B1 und CFM56-3C1), nach HLFU (1998)

Substanz	Emissionen (mg/m ³)	Substanz	Emissionen (mg/m ³)
Acetophenon		Mesityloxid	
Benzaldehyd	0-4,85	2-Methylbenzaldehyd	0,02-0,05
Benzol	0,02-1,61	4-Methylbenzaldehyd	
Biphenyl	0,02-0,03	Methylcyclopentan	0-0,44
Butylbenzol	0-0,82	2-Methylfuran	
Sek. Butylbenzol	0,01-0,16	1-Methylnaphthalin	0-1,29
Butylcyclohexan	0,01-0,34	2-Methylnaphthalin	0-1,31
p-Cumol	0,02-0,15	2-Methylnonan	0,03-0,46
Cyclohexen	0,01-0,07	3-Methylnonan	
Tr.-Decahydronephthalin	0-1,19	4-Methylnonan	0,01-0,34
Decan	0,01-5,79	Naphthalin	0,011,02
1,2-Diethylbenzol	0,02-0,14	Nonadecan	
1,4-Diethylbenzol		Nonan	0,01-2,72
1,3-Dimethylnaphthalin	0,01-0,02	1-Nonen	0-0,74
1,4-Dimethylnaphthalin	0,03-0,07	Octadecan	
1,6-Dimethylnaphthalin	0,01-0,02	Octan	0-0,29
Dimethyloctan		1-Octen	0,03-0,2
Dodecan	0,013,45	Pentadecan	0-0,51
Ethylbenzol	0-1,8	Phenol	0,01-2,38
Ethylcyclohexan	0,01-0,21	1-Phenylethanol	0,11-0,57
Ethyl-naphthalin	0,01-0,03	Propylbenzol	0-1,12
2-Ethyltoluol	0,01-0,78	Propylcyclopentan	
3-Ethyltoluol	0,03-2,49	Pseudocumol	0,01-4,82
4-Ethyltoluol	0,06-1,18	Styrol	0,01-1,16
Ethynylbenzol	0,01-0,04	Tetradecan	0-0,92
Heptadecan	0-0,01	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	0,04-0,11
Heptan	0-0,11	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	0,01-0,27
1-Hepten	0-0,44	Toluol	0,01-0,99
Hexadecan	0-0,02	Tridecan	0,01-2,17
Hexanal		1,2,3-Trimethylbenzol	0-2,12
1-Hexen		1,1,3-Trimethylcyclohexan	
Indan	0-0,09	Undecan	0,01-4,9
Inden	0,02-0,17	m-/p-Xylole	0,01-2,37
Mesitylen	0-1,09	o-Xylole	0-3,23

Darüber hinaus wurden mit speziellen Probenahme- und Analyseverfahren PAK, PCDD/F, Aldehyde und Ketone (insgesamt 35 Verbindungen) nachgewiesen. Die Tabellen 4-6 zeigen die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen.

Tab. 4: Bestimmung der PAK-Massenkonzentrationen (2 Proben) am Triebwerk CF6-50E2, nach HLFU (1998)

PAK	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Naphthalin	24,60-37,50
Acenaphthylen	1,58-1,98
Acenaphthen	0,46-0,49
Fluoren	0,87-0,96
Phenanthren	0,70-0,78
Anthracen	0,11-0,13
Fluoranthen	0,20-0,23
Pyren	0,28-0,30
Benz(a)anthracen	0,02-0,03
Chrysen	0,03
Benzo(b/j)fluoranthen	0,02
Benzo(k/j)fluoranthen	0,02
Benzo(a)pyren	0,03
Dibenz(a,h)anthracen	0,00
Benzo(ghi)perylen	0,02-0,03
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,03
Summe nach EPA	29,50-42,00

Tab. 5: Bestimmung der PCDD/F-Massenkonzentrationen an den Triebwerken
CFM56-3B1 und CF6-50E2

PCDD/F	ng/m³
Summe TCDF	<0,0019-<0,0446
Summe PDF	<0,0019-<0,0341
Summe HxCDF	<0,0015-0,08
Summe HpCDF	<0,0015-0,4
OCDF	<0,015-0,89
Summe Tetra-OctaCDF	0,061-1,38
2,3,7,8-TCDF	<0,0019-<0,0039
1,2,3,7,8-/1,2,3,4,8-PCDF	<0,0016-<0,0057
2,3,4,7,8-PCDF	0,0009-<0,0019
1,2,3,4,7,8-/1,2,3,4,7,9-HxCDF	<0,0012-0,01
1,2,3,6,7,8-HxCDF	<0,0009-0,01
1,2,3,7,8,9-HxCDF	<0,0001-<0,0025
2,3,4,6,7,8-HxCDF	<0,001-0,01
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,0018-0,19
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	<0,0023-0,1
Summe TCDD	<0,0004-<0,0031
Summe PCDD	<0,0004-<0,0031
Summe HxCDD	<0,0004-<0,0031
Summe HpCDD	<0,0006-<0,0031
OCDD	<0,0058-0,0126
Summe Tetra-OctaCDD	0,0104
2,3,7,8-TCDD	<0,0004-<0,0031
1,2,3,7,8-PCDD	<0,0003-<0,0006
1,2,3,4,7,8-HxCDD	<0,0004-<0,0015
1,2,3,6,7,8-HxCDD	<0,0003-<0,0014
1,2,3,7,8,9-HxCDD	<0,0003-<0,0017
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	<0,0015-<0,0019
Summe Tetra-octaCDF/D	0,0714-1,38
TE (BGA) exkl. NWG	0,0012-0,01
ITE (NATO/CCMS) exkl. NWG	0,0009-0,01
ITE (NATO/CCMS) inkl. NWG	0,0018-0,01

Tab. 6: Bestimmung der Massenkonzentrationen von Aldehyden und Ketonen an den Triebwerken CF6-50E2 und CFM56-3B1

Verbindung	Konzentration in mg/m³
Formaldehyd	0,05-1,85
Acetaldehyd	0,01-0,55
Benzaldehyd	0,01-0,53
Heptanon	<0,05-0,16
Ethylmethylketon	<0,007-0,21
Cyclohexanon	<0,05-0,16

Durch Vergleich der identifizierten Verbindungen mit der parallel dazu ermittelten Summe der VOC-Konzentrationen ergibt sich ein auf die Massenanteile bezogener Aufklärungsgrad von >90%. Dem nicht aufgeklärten Massenkonzentrationsanteil sind ca. 280 Substanzen zuzuordnen.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß trotz aller analytischer Sorgfalt Lücken bleiben. Hochtoxische Stoffe wie z.B. die nitropolyzyklischen Aromaten sind toxikologisch bereits relevant, wenn die Emissionskonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Eine toxikologische Bewertung der Triebwerksemissionen muß unter diesem Vorbehalt gesehen werden.

Ein Vergleich der Meßergebnisse zeigt - sowohl für die Triebwerksprüfstandsmessungen als auch für die Hinterherfahrten -, daß die organisch-chemischen Verbindungen jeweils in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Allerdings lassen sich keine signifikanten „Fingerprints“ zur ausschließlichen Bestimmung flugverkehrsbedingter Immissionen ableiten. Erwähnenswert ist, daß die Ergebnisse der Emissionsmessungen eine große Ähnlichkeit zu denen der Spektren der Kraftfahrzeugemissionen zeigen.

Auch auf dem Flughafen Zürich-Kloten (SCHERER,1996) wurden Emissionsuntersuchungen an Triebwerksprüfständen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind im folgenden zusammengefaßt:

- Im Vergleich zu Kfz-Abgasen wurde bei den Triebwerksemissionen in Zürich-Kloten ein höherer Anteil an Alkanen (C₉-C₁₂) nachgewiesen.
- Der Anteil des Benzols an den VOC betrug im LTO-Zyklus bei den Schweizer Messungen (bei einem Benzolgehalt im Kerosin von <0,1%) 2-8%.
- Während der simulierten LTO-Zyklen wurden TVOC-Gehalte zwischen 110 und 510 g (pro LTO-Zyklus) ermittelt. In den ersten Sekunden nach dem Starten des Flugzeugmotors werden deutlich mehr TVOC emittiert (790-1300 g)! Im Winter kann die Phase bis zur Zündung 30 Sekunden und länger dauern und in dieser Zeit können 12,5 kg und mehr TVOC freigesetzt werden.
- Während eines Tankvorgangs werden ca. 3,8 kg TVOC freigesetzt.

Nach Auffassung von SCHERER (1996) spielen die Schadstofffreisetzungen in den ersten Sekunden nach dem Motorstart für die menschliche Gesundheit eine größere Rolle als die Emissionen im LTO-Zyklus, vor allem dann, wenn am Terminal gestartet wird.

Die VOC-Emissionen in den ersten Sekunden nach dem Motorstart und während des Betankens des Flugzeuges wurden in der Studie der HLFU nicht ermittelt. Für die toxikologische Bewertung der Triebwerksemissionen im Rahmen dieses Gutachtens reichen die Messungen der HLFU aus, da die Triebwerksemissionen der HLFU (1998) nur für einen Vergleich untereinander, nicht jedoch für eine quantitative toxikologische Abschätzung herangezogen werden.

In einem Forschungsvorhaben des UBA wurde eine Methode zur Berechnung von Konzentrationsverteilungen (Ausbreitungen) im Nahbereich des Frankfurter Flughafens entwickelt. Auf der Grundlage der Emissionen von Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid, Ruß und Schwefeldioxid in einem Gebiet von 60 km x 60 km x 3000 m wurden die Immissionskonzentrationen dieser Luftschadstoffe auf dem Flughafengelände und in unmittelbarer Umgebung berechnet. Anschließend wurden die Immissionskonzentrationen im Untersuchungsgebiet (3.600 km² x 3000 m) simuliert. Dabei wurde auch die chemische Umwandlung der genannten Stoffe (Photooxidantienbildung, z.B. Ozon) mit einem komplexen meteorologisch-photochemischen Modell simuliert. In die Rechnung gingen auch Emissionen, die nicht auf den Flugverkehr zurückzuführen

sind (z.B. aus Industrie und Kfz-Verkehr), ein. Die Simulation der chemischen Umwandlungsprodukte in der Luft kann für die toxikologische Bewertung herangezogen werden, da der spezielle Beitrag der Flughafenemissionen an der Bildung der Photooxidantien ermittelt wurde (MÄDER, 1999). Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens liegen noch nicht vor.

Außerdem wurde 1997/98 die Luftschadstoffbelastung auf dem Frankfurter Flughafengelände von der HLFU (1999) im Rahmen des UBA-Projektes gemessen. Ziel war, die Immissionsereignisse so zu erfassen, daß sie den Emissionen einzelner Flugzeugbewegungen eindeutig zugeordnet werden können. Als Indikator für eine konkrete Flugbewegung wurde der Schalldruckpegel bestimmt. Die Schadstoffimmissionen, gemessen an 3 Bereichen auf dem Flughafengelände, beschreibt Tabelle 7. Dabei war eine deutliche Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen von den sich im Tages- und Jahresverlauf ändernden meteorologischen Bedingungen (z.B. Windrichtung) erkennbar. Die durch den Start der Flugzeuge verursachten Emissionen (NO, NO₂, Ruß) konnten als Konzentrationsspitzen erkannt werden; für Benzol, Toluol und Xylole konnten aufgrund der Meßmethode keine Kurzzeitereignisse dargestellt werden. Konkrete Hinweise auf die Herkunft der Schadstoffe (Triebwerk, Kfz) liefert diese Studie nicht, so daß die Werte der Tabelle 7 nur zur Einordnung der toxikologischen Bedeutung der zu beurteilenden Triebwerksemissionen herangezogen werden können.

Tab. 7: Immissionsmeßergebnisse auf dem Flughafengelände im Vergleich zu Immissionen im Frankfurter Raum (arithm. Mittelwerte in µg/m³, CO in mg/m³, Meßzeitraum 1997/98), nach HLFU (1999)

Verbindung	Meßpunkt 1	Meßpunkt 2	Meßpunkt 3	Raunheim	Offenbach	Ffm. Höchst	Ffm. Ost	Friedb. Landstr.
SO ₂	10	10	6	8	7	8	10	
CO	0,7	0,6	0,4	0,7	0,7	0,7		2,1
NO	55	48	29	39	34	49	44	100
NO ₂	65	47	37	37	45	49	54	62
Benzol	3,1	3,1	2,1					8
Toluol	4,5	5,3	3,3					27
m,p-Xylol	3,3	3,3	1,9					15
o-Xylol	2,4	2,8	1,9					
Staub	30	27	22	33	34	34	36	
O ₃	32	39	38	39	29	31	29	
Ruß	3,9	3,4	2,0					