

TEXTE

52/2013

Dokumentation der Emissionsmodellierung für LTO-Emissionen und die internationale Binnenschifffahrt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524/ANH,15

Dokumentation der Emissionsmodellierung für LTO- Emissionen und die internationale Binnenschifffahrt

**Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur
Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“**

von

**Balendra Thiruchittampalam
Jochen Theloke**

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung (IER), Stuttgart

Wolfram Jörß

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4527.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Heßbrühlstr. 49a 70565 Stuttgart	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) Schopenhauerstr. 26 14129 Berlin
Abschlussdatum:	Dezember 2010	
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/	
Redaktion:	Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung Johanna Appelhans	

Dessau-Roßlau, Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	6
2 Methode zur Berechnung der Emissionen aus dem Luftverkehr	7
2.1 Modellierung der Emissionen – ZSE Methodik.....	7
2.2 In PAREST verwendete Methode zur Berechnung der Emissionen aus dem Luftverkehr für das Jahr 2005.....	9
2.2.1 Methode zur Berechnung der Emissionen aus LTO-Zyklen	9
2.2.1.1 Berechnung der flugzeugtypspezifischen LTO-Anzahl in Deutschland	11
2.2.1.2 Triebwerkstypen und Emissionsfaktoren.....	13
2.2.1.3 Zuordnung Flugzeugtyp zu Triebwerkstyp.....	15
2.2.1.4 Berechnung der Emissionen des zivilen Luftverkehrs aus LTO- Zyklen	16
2.2.2 Berechnung der Emission aus dem Luftverkehr während des Reisefluges	20
2.2.2.1 Methodik	20
2.2.2.2 Ergebnisse der Emissionsberechnung für den zivilen Reise- flugverkehr.....	23
2.3 Abgleich der Berechnungsergebnisse	23
2.4 Emissionen des Flugverkehrs 2010 - 2020	25
3 Emissionen der internationalen Binnenschifffahrt	26
4 Zusammenfassung	28
5 Referenzen	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In ZSE (2007) angenommenen Aktivitätsraten für den militärischen und zivilen Luftverkehr in Deutschland.....	7
Tabelle 2: Emissionsfaktoren des zivilen und militärischen Luftverkehrs in ZSE (2007)	7
Tabelle 3: Emissionen aus dem militärischen und zivilen Flugverkehr in ZSE (2007)	8
Tabelle 4: Anzahl der flugzeugtypspezifischen LTO-Zyklen in Deutschland im Jahr 2005 EUROSTAT (2007)	11
Tabelle 5: Emissionsfaktoren für PM10 und PM2.5 aus EEA (2007).....	14
Tabelle 6: Aggregierte Emissionsfaktoren für die verschiedenen Flugzeugtypen.....	16
Tabelle 7: Emissionen des innerdeutschen Luftverkehrs unterhalb von 1000 m (LTO)	17
Tabelle 8: Emissionen des grenzüberschreitenden Luftverkehrs unterhalb von 1000 m (LTO)	18
Tabelle 9: LTO- Emissionen des zivilen Luftverkehrs in Deutschland	19
Tabelle 10: Flugleistungen auf Grundlage von StaBuA (2006a)	21
Tabelle 11: Berechnete durchschnittliche Entfernungen pro Flug.....	21
Tabelle 12: Korrelation zwischen Treibstoffverbrauch und Distanz	22
Tabelle 13: Emissionsfaktoren für den Reiseflug (EEA, 2007)	23
Tabelle 14: Berechnete Emissionen aus dem zivilen Reiseflugverkehr in Deutschland	23
Tabelle 15: Abgleich der eigenen Emissionsberechnung mit den Emissionen im ZSE für 2005	24
Tabelle 16: Zeitliche Entwicklung der Emissionsfaktoren für nationalen Flugverkehr in ZSE (2007)	25
Tabelle 17: Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsraten für nationalen Flugverkehr in ZSE (2007)	25
Tabelle 18: Energieverbrauch und Emissionen für die Quellgruppe internationaler Hochseeverkehr auf Binnenwasserstraßen in Deutschland, 2005.....	27
Tabelle 19: Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005.....	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flugzeugtypspezifische Emissionsfaktoren - Auszug aus ICAO (2007) und eigene Berechnungen	13
Abbildung 2: Auszug der Zuordnungstabelle von Flugzeugtyp zu Turbinentyp	15
Abbildung 3: Zuordnung der tonnenkilometrischen Leistung aus der Binnenschifffahrt und der internationalen Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen.....	27

1 Einleitung

Die Emissionsdatenbasis des Umweltbundesamtes, das Zentrale System Emissionen (ZSE, 2007), basiert für die Berechnung der Emissionen aus dem zivilen Flugverkehr auf dem Verkehrsmodell TREMOD (Knörr et al., 2005) und bezieht sich in Übereinstimmung mit den Regeln der internationalen Berichterstattung zur CO₂-Bilanzierung nur auf nationale Flüge. In der im Rahmen von PAREST verwendeten Version des ZSE wurde nicht zwischen Emissionen einerseits am Boden und in der Lande- und Startphase (LTO – landing and take-off) und andererseits während des Betriebs auf Reiseflughöhe (Cruise) unterschieden. Für die Immissionsmodellierung in PAREST war es jedoch notwendig, LTO-Emissionen unabhängig vom Reiseziel (national vs. international) zu benutzen, um die tatsächliche Menge der im Inland (Inlandsprinzip) emittierten Luftschadstoffe aus dieser Quellgruppe zu quantifizieren. Im Rahmen des Vorhabens wurde deshalb eine neue Methodik zur Schätzung der LTO-bezogenen Emissionen für nationale und internationale Flüge innerhalb Deutschlands entwickelt. Diese Methode wurde auf Basis von Flugdaten aus EUROSTAT (2007) und Statistisches Bundesamt (2006) sowie von Emissionsfaktoren aus ICAO¹ (2007) und EEA (2007) entwickelt.

In diesem Bericht wird die zur Berechnung der PAREST-Referenzemissionen entwickelte Methodik beschrieben. Für den militärischen Luftverkehr wurde mangels verfügbarer Informationen weiterhin der kraftstoffbasierte Ansatz aus ZSE (2007) angewendet.

¹ ICAO: International Civil Aviation Organization

2 Methode zur Berechnung der Emissionen aus dem Luftverkehr

2.1 Modellierung der Emissionen – ZSE Methodik

Die in ZSE (2007) verwendeten Aktivitätsdaten entstammen der Energiebilanz für Deutschland auf Basis des im Inland verkauften Flugtreibstoffs. Tabelle 2 zeigt die in ZSE (2007) angenommene verkaufte Menge an Flugtreibstoff für den zivilen und den militärischen Flugverkehr in Deutschland für die Jahre 2000 und 2005 sowie eine Projektion dieser Mengen für die zukünftigen Jahre 2010, 2015 und 2020. Die in Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellten Treibstoffmengen, Emissionsfaktoren und Emissionen lassen keinen Rückschluss darauf zu, ob sie LTO-Aktivitäten oder Reisflugaktivitäten zuzuordnen sind.

Tabelle 1: In ZSE (2007) angenommen Aktivitätsraten für den militärischen und zivilen Luftverkehr in Deutschland

Emittentengruppe	EBZ	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	TJ	9,862	2,210	9,862	9,862	9,862
Luftverkehr, Zivil, National	EBZ 63	TJ	59,675	69,225	76,000	85,000	94,000
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	TJ	238,702	276,889	304,000	340,000	376,000

Tabelle 2: Emissionsfaktoren des zivilen und militärischen Luftverkehrs in ZSE (2007)

Emittentengruppe	EBZ	Schadstoff	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
Luftverkehr, Zivil National und International	EBZ 63	SO ₂	kg/TJ	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	SO ₂	kg/TJ	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
Luftverkehr, Zivil National und International	EBZ 63	NO _x	kg/TJ	325.58	325.58	325.58	325.58	325.58
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NO _x	kg/TJ	205	205	205	205	205
Luftverkehr, Zivil National und International	EBZ 63	NM VOC	kg/TJ	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NM VOC	kg/TJ	98	98	98	98	98
Luftverkehr, Zivil National und International	EBZ 63	NH ₃	kg/TJ	4	4	4	4	4
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NH ₃	kg/TJ	4	4	4	4	4

Tabelle 3: Emissionen aus dem militärischen und zivilen Flugverkehr in ZSE (2007)

Emittentengruppe	EBZ	Schadstoff	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NH ₃	Mg	39.448	8.84	39.448	39.448	39.448
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	PM2.5	Mg	118.344	26.52	118.344	118.344	118.344
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	SO ₂	Mg	91.7166	20.553	91.7166	91.7166	91.7166
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NOx	Mg	2021.71	453.05	2021.71	2021.71	2021.71
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	PM10	Mg	118.344	26.52	118.344	118.344	118.344
Luftverkehr, Militaer	EBZ 67	NMVOC	Mg	966.476	216.58	966.476	966.476	966.476
Luftverkehr, Zivil	EBZ 63	NMVOC	Mg	2234.23	2591.78	2721.56	2905.3	3060.64
Luftverkehr, Zivil	EBZ 63	NOx	Mg	19429	22538.3	23566.1	25038.5	26232.6
Luftverkehr, Zivil	EBZ 63	NH ₃	Mg	238.7	276.9	304	340	376
Luftverkehr, Zivil	EBZ 63	SO ₂	Mg	554.978	643.793	706.8	790.5	874.2
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	NOx	Mg	77716.6	90149.5	98976.3	110697	122418
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	PM2.5	Mg	0	0	0	0	0
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	PM10	Mg	0	0	0	0	0
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	NMVOC	Mg	8937	10366.7	11381.8	12729.6	14077.4
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	NH ₃	Mg	954.808	1107.56	1216	1360	1504
Luftverkehr, Zivil, International	EBZ 63	SO ₂	Mg	2219.93	2575.07	2827.2	3162	3496.8

2.2 In PAREST verwendete Methode zur Berechnung der Emissionen aus dem Luftverkehr für das Jahr 2005

Ziel der entwickelten Methodik war die Berücksichtigung von flugzeugtypischen und somit auch triebwerksspezifischen Kennzahlen bei der Berechnung der durch den zivilen Luftverkehr verursachten Emissionen in Deutschland. Dabei wurde jeweils eine Methode zur Berechnung der LTO-Zyklus bezogenen Emissionen und eine Methode zur Quantifizierung der während des Reisefluges über Deutschland entstehenden Emissionsmengen entwickelt. Im Folgenden wird zuerst die Herangehensweise zur Berechnung des LTO-basierten Ansatzes erläutert.

2.2.1 Methode zur Berechnung der Emissionen aus LTO-Zyklen

Die Ermittlung der Emissionen des zivilen Luftverkehrs aus LTO-Zyklen wurde schon in Pregger et al. (2001) anhand von Flugbewegungsdaten der Flughäfen in Deutschland durchgeführt, hier für das Bundesland Bayern. Durch eine Zuordnung der einzelnen Flugzeugtypen zu den entsprechenden Triebwerkstypen konnten mittels eines detaillierten Emissionsmodells auf Grundlage von spezifischen Kraftstoffverbräuchen Emissionen bestimmt werden. Die im Folgenden beschriebene Berechnungsmethode basiert im Wesentlichen auf der von Pregger et al. (2001) entwickelten Methode.

Bei der für PAREST entwickelten Berechnungsmethode wurden die Flugbewegungsdaten, d.h. die Anzahl der LTO-Zyklen, EUROSTAT (2007) entnommen. Diese waren aufgegliedert nach Flughafen und Flugzeugtyp. Eine weitere Unterteilung des LTO-Zyklus in Teilzyklen, d.h. in Landing, Taxi, Take-Off und Climbout² wurde nicht durchgeführt. In der Regel werden für verschiedene Flugzeugtypen unterschiedliche Turbinen verwendet. Zur Identifikation der in Frage kommenden Turbinen des jeweiligen Flugzeugtyps und zur Berechnung von flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren waren jedoch weitere Informationen notwendig. Die benötigten Informationen wurden dem Luftfahrt-Archiv (2007) und ICAO (2007) entnommen. Bei ICAO (2007) handelt es sich um eine Datenbank mit Kennzahlen zu den wichtigsten sich im Einsatz befindlichen Turbinen. Kennzahlen sind hier unter anderem spezifische Kraftstoffverbräuche und Emissionsfaktoren. ICAO (2007) enthält nur Emissionsfaktoren für die Schadstoffe CO, HC und NO_x. Die Emissionsfaktoren für NMVOC, SO₂, NH₃, PM_{2.5} und PM₁₀ mussten anderweitig abgeschätzt werden. Emissionsfaktoren für flüchtige organische Ver-

² Landing – Landen, Taxi – Bewegung auf dem Flughafengelände, Take-Off – Starten und Climbout – Steigflug bis ca. 915 m (vgl. Kap. 2.2.2.1)

bindungen (NMVOC) wurden auf Basis eines VOC-Split (89,7% kg NMVOC/kg HC) von Theloke & Friedrich (2007) aus den in ICAO (2007) angegebenen HC-Emissionsfaktoren berechnet. Zur Abschätzung der Emissionsfaktoren für die Schadstoffe SO_2 und NH_3 wurde ein kraftstoffbezogener Ansatz gewählt. Für SO_2 wurde ein Schwefelgehalt von 0,02 Gew. % zugrunde gelegt, basierend auf ZSE (2007). Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung eines treibstoffspezifischen Heizwertes von 43 MJ/kg ein Emissionsfaktor von 9,3 kg (SO_2)/TJ. Für den Schadstoff NH_3 wurde der Emissionsfaktor von 4 kg (NH_3)/TJ aus dem ZSE übernommen. Flugzeugspezifische Emissionsfaktoren für PM_{2.5} und PM₁₀ wurden EEA (2007) entnommen. Fehlende Emissionsfaktoren für bestimmte Flugzeugtypen, aufgrund nicht eindeutiger Zuordnung zu entsprechenden Turbinen, wurden auf Grundlage von LTO-gewichteten Mittelwerten abgeschätzt.

Die berechneten Emissionsfaktoren wurden auf die flugzeugtypspezifischen LTO-Daten auf Grundlage von Eurostat (2007) angewendet. Dabei wurden die Emissionsfaktoren [kg/LTO] des jeweiligen Flugzeugtyps mit der Anzahl der LTO-Zyklen pro Flugzeugtyp multipliziert. So konnten turbinen- und flugzeugspezifische Emissionsmengen aus LTO-Zyklen in Deutschland für den zivilen Flugverkehr (national und international) unterhalb von 1000 m berechnet werden. Im Folgenden wird die Berechnung schrittweise für das Jahr 2005 durchgeführt.

2.2.1.1 Berechnung der flugzeugtypspezifischen LTO-Anzahl in Deutschland

Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, ist die Grundlage zur Berechnung der LTO-bezogenen Emissionen des zivilen Luftverkehrs in Deutschland die Anzahl der flugzeugtypspezifischen LTO-Zyklen. In Eurostat (2007) werden LTO Daten pro Flughafen und Flugzeugtyp angegeben. Daher wurde in einem ersten Schritt die flughafenspezifisch angegebene Anzahl der LTO-Zyklen nach Flugzeugtypen aggregiert. Das Ergebnis ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Aufteilung in nationale und internationale LTO-Zyklen ist abhängig vom Start- bzw. Zielflughafen. In Tabelle 4 ist die Gesamtzahl aller gewerblichen Flüge berücksichtigt, d.h. es sind sowohl Passagier- als auch Fracht- und Postflüge berücksichtigt.

Tabelle 4: Anzahl der flugzeugtypspezifischen LTO-Zyklen in Deutschland im Jahr 2005 EUROSTAT (2007)

Flugzeugtyp	Bezeichnung des Flugzeugtyps	LTO National 2005	LTO International 2005
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS	17832	22215
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS	1816	9551
318	AIRBUS--A-318 ALL MODELS	0	2747
319	AIRBUS--A-319 ALL MODELS	35434	109913
320	AIRBUS--A-320 ALL MODELS	57232	144679
321	AIRBUS--A-321 ALL MODELS	37624	47017
330	AIRBUS--A-330 ALL MODELS	890	22520
340	AIRBUS--A-340 ALL MODELS	264	26009
717	BOEING--717 ALL MODELS	284	1302
727	BOEING--727 ALL MODELS	0	208
737	BOEING--737 ALL MODELS	209862	336615
747	BOEING--747 ALL MODELS	70	37272
757	BOEING--757 ALL MODELS	4422	34065
767	BOEING--767 ALL MODELS	300	22161
777	BOEING--777 ALL MODELS	2	8140
at4	AEROSPATIALE--ATR-42 ALL MODELS	24168	26823
at7	AEROSPATIALE--ATR-72 ALL MODELS	31700	22657
c60	CANADAIR--CL-600 REGIONAL JET ALL MODELS	65308	188888
dc1	DOUGLAS--DC-10 ALL MODELS	42	2368
dc8	DOUGLAS--DC-8 ALL MODELS	12	355
dc9	DOUGLAS--DC-9 ALL MODELS	0	142
dh8	DE HAVILLAND CANADA DASH 8 ALL MODELS	39448	34715
do3	DORNIER--328	11592	4901
e12	EMBRAER--120	6	996
e13	EMBRAER--135	80	699
e14	EMBRAER--145	3852	54509
e17	EMBRAER--170	926	8887
f10	FOKKER--100	30336	27825
f50	FOKKER--50	1730	10151
f70	FOKKER--70	6	20655

Flugzeugtyp	Bezeichnung des Flugzeugtyps	LTO National 2005	LTO International 2005
l10	LOCKHEED--L-1011 TRISTAR	0	11
m11	BOEING--MD-11	222	12764
m80	BOEING--MD-80	830	20499
m90	BOEING--MD-90	34	1221
oan	OTHER ANTONOV	20	1994
oas	OTHER AEROSPATIALE	0	
oba	OTHER BAE	33130	22516
obo	OTHER BOEING	4	9
oca	OTHER CANADAIR	798	734
odg	OTHER DOUGLAS	0	9
odh	OTHER DE HAVILLAND	0	135
odo	OTHER DORNIER	9504	52
oem	OTHER EMBRAER	2	14
ofk	OTHER FOKKER	0	6
olo	OTHER LOCKHEED	42	527
oth	OTHERS	15008	9497
out	OTHER TUPOLEV	0	86
s20	SAAB--2000	980	7714
s34	SAAB--340	2592	3653
t13	TUPOLEV--TU-134	0	1
t15	TUPOLEV--TU-154	310	8206
total	Total	683804	1346031
unk	UNKNOWN	45090	27398

2.2.1.2 Triebwerkstypen und Emissionsfaktoren

Zur detaillierten Ermittlung der Emissionsfaktoren zur Berechnung der Emissionen des Luftverkehrs unterhalb von 1000 m wurden triebwerkspezifische Kennzahlen aus ICAO (2007) angewendet. ICAO (2007) enthält für die gängigsten Turbinen LTO-Zykluspezifische Emissionsfaktoren für die Schadstoffe CO, HC und NO_x und Kraftstoffverbräuche pro Turbinentyp und LTO-Zyklus. In Abbildung 1 ist ein Auszug aus ICAO (2007) sowie abgeschätzte LTO-spezifische Emissionsfaktoren für SO₂, NH₃ und NMVOC dargestellt.

Engine Identification	LTO Total mass (g HC)	LTO Total mass (g CO)	LTO Total mass (g NO _x)	Fuel LTO Cycle (kg)	Kerosin SO ₂ NH ₃ NMVOC			
					43.000	9,3	4	89,7%
					kJ/kg	kg/TJ	kg/TJ	kg NMVOC/kg HC
					Fuel LTO Cycle (MJ)	Total mass (g SO ₂)	Total mass (g NH ₃)	Total mass (g NMVOC)
TFE731-2-2B	823	2612	630	85	3.654	34	15	738
TFE731-3	393	2254	845	92	3.949	37	16	353
AE3007A	226	1468	1563	162	6.963	65	28	203
AE3007A1 series	279	1910	1502	164	7.058	66	28	250
AE3007C	387	1964	991	125	5.389	50	22	347
AE3007C1	346	1850	1175	138	5.947	55	24	310
AE3007A1	307	1865	1456	157	6.754	63	27	275
AE3007A1	367	2383	1607	157	6.754	63	27	330
AE3007A1	279	3088	1344	157	6.754	63	27	251
AE3007A1/1	313	1874	1442	156	6.722	63	27	281
AE3007A1/1	370	2389	1592	156	6.722	63	27	332
AE3007A1/1	280	3088	1333	156	6.722	63	27	251
AE3007A1/3	357	1954	1319	151	6.474	60	26	320
AE3007A1/3	372	2317	1465	151	6.474	60	26	333
AE3007A1/3	269	2919	1245	151	6.474	60	26	242
AE3007A1P	308	1867	1444	157	6.730	63	27	277
AE3007A1P	368	2386	1567	157	6.730	63	27	330
AE3007A1P	280	3087	1334	157	6.730	63	27	251
AE3007A3	361	1960	1316	150	6.463	60	26	324
AE3007A3	401	2488	1429	150	6.463	60	26	360
AE3007A3	289	3111	1232	150	6.463	60	26	259
AE3007A1E	264	3018	1501	165	7.113	66	28	236
AE3007C	320	1695	1050	127	5.480	51	22	287
AE3007C	320	1695	1050	127	5.480	51	22	287
AE3007C	344	2108	1150	127	5.480	51	22	308
AE3007C1	344	1842	1175	138	5.935	55	24	309
AE3007C1	389	2389	1262	138	5.935	55	24	349

Abbildung 1: Flugzeugtypspezifische Emissionsfaktoren - Auszug aus ICAO (2007) und eigene Berechnungen

Emissionsfaktoren für PM₁₀ und PM_{2.5} wurden EEA (2007) entnommen. Aufgrund der unterschiedlichen Flugzeugtypenbezeichnungen in EEA (2007) und EUROSTAT (2007) wurde eine Zuordnung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 dargestellt. Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass für manche Flugzeugtypen ein LTO-gewichteter Mittelwert berechnet wurde (vgl. auch Abschnitt 2.2.1).

Tabelle 5: Emissionsfaktoren für PM10 und PM2.5 aus EEA (2007)

Flugzeugtyp	Zugeordneter Flugzeugtyp EEA (2007)	PM2.5/ PM 10 [kg/LTO]
310	A310	0.14
318	A320	0.09
319	A320	0.09
320	A320	0.09
321	A320	0.09
330	A330	0.19
340	A340	0.21
717	MD81-88	0.12
727	B727	0.22
737	B737 400	0.07
747	B747 100-300	0.47
757	B757	0.13
767	B767 300 ER	0.15
777	B777	0.2
dc1	DC10	0.32
dc9	DC9	0.16
f10	F100	0.14
oba	BAe146	0.08
obo	Mittelwert Boeing	0.2075
odg	Mittelwert Douglas	0.24
ofk	Mittelwert Fokker	0.145

2.2.1.3 Zuordnung Flugzeugtyp zu Triebwerkstyp

Zur Berechnung der turbinenspezifischen Emissionsfaktoren wurde eine Zuordnung von Flugzeugtypen zu spezifischen Turbinentypen auf Grundlage des Luftfahrt-Archivs (2007) durchgeführt. Im Luftfahrt-Archiv (2007) sind über 6.000 Fluggeräte beschrieben. Abbildung 2 zeigt einen Auszug aus der Datenbank, die mögliche Zuordnungen von Flugzeugtypen zu entsprechenden Triebwerkstypen sowie die flugzeugspezifische Anzahl von Triebwerken enthält.

ID	Flugzeugtyp	Triebwerkstyp	Anzahl Triebwerke	Herkunft der Daten
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	PW4000	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A1	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A2	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A3	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A5	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A5F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A8	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B1	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B1F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B2	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B2F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B4	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B4F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B5F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B6	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B6F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B7F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B8F	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2B8FA	2	Flugzeugtypen.net
300	AIRBUS--A-300 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2D1F	2	Flugzeugtypen.net
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS aircraft	PW4000	2	Flugzeugtypen.net
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2	2	Flugzeugtypen.net
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A1	2	Flugzeugtypen.net
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A2	2	Flugzeugtypen.net
310	AIRBUS--A-310 ALL MODELS aircraft	CF6-80C2A3	2	Flugzeugtypen.net

Abbildung 2: Auszug der Zuordnungstabelle von Flugzeugtyp zu Turbinentyp

2.2.1.4 Berechnung der Emissionen des zivilen Luftverkehrs aus LTO-Zyklen

Zur Berechnung der Emissionen des zivilen Luftverkehrs aus LTO-Zyklen (national und international) wurden zunächst mittlere flugzeugtypspezifische Emissionsfaktoren auf Grundlage der je Flugzeugtyp zugeordneten Triebwerkstypen generiert. Dabei wurde der arithmetische Mittelwert aller möglichen Triebwerke pro Flugzeugtyp ermittelt, wenn eine eindeutige Zuordnung möglich war. Die Mittelwerte der eindeutig zuzuordnenden Flugzeugtypen sind in Tabelle 6 dargestellt. Zusätzlich wurde eine Abschätzung von LTO-gewichteten Emissionsfaktoren für Fälle abgeschätzt, in denen es nicht möglich war, eindeutige Zuordnungen zwischen Flugzeugtypen und Turbinentypen vorzunehmen.

Tabelle 6: Aggregierte Emissionsfaktoren für die verschiedenen Flugzeugtypen

ID	NO _x [kg/LTO]	SO ₂ [kg/LTO]	NH ₃ [kg/LTO]	NMVOC [kg/LTO]	PM2.5/10 [kg/LTO]	PM2.5/10 [kg/LTO]
300	22.91	0.66	0.29	3.22	x	x
310	22.91	0.66	0.29	3.22	0.14	0.14
318	10.15	0.34	0.15	1.30	0.09	0.09
319	10.01	0.33	0.14	1.21	0.09	0.09
320	10.22	0.31	0.13	0.45	0.09	0.09
321	10.15	0.34	0.15	1.30	0.09	0.09
330	33.57	0.80	0.34	2.69	0.19	0.19
340	30.32	0.76	0.33	3.47	0.21	0.21
717	8.59	0.28	0.12	0.04	0.12	0.12
727	10.95	0.54	0.23	1.34	0.22	0.22
737	8.86	0.32	0.14	1.19	0.07	0.07
747	52.74	1.35	0.58	7.60	0.47	0.47
757	21.69	0.54	0.23	0.61	0.13	0.13
767	31.55	0.74	0.32	1.22	0.15	0.15
777	50.56	0.96	0.41	1.61	0.20	0.20
c60	2.35	0.13	0.06	0.90	x	x
dc1	36.24	0.79	0.34	15.39	0.32	0.32
dc8	16.51	0.69	0.30	1.19	x	x
e13	2.83	0.12	0.05	0.58	x	x
e17	4.51	0.19	0.08	0.03	x	x
l10	44.77	1.02	0.44	19.23	x	x
m80	9.16	0.40	0.17	1.20	x	x
oca	2.27	0.13	0.06	0.56	x	x
t13	9.28	0.50	0.21	9.87	x	x
t15	14.33	0.88	0.38	69.29	x	x
LTO-gewichteter Mittelwert für nationale Flüge [kg/LTO]	9.10	0.31	0.14	1.20	0.08	0.08
LTO-gewichteter Mittelwert für internationale Flüge [kg/LTO]	12.37	0.38	0.16	2.00	0.11	0.11

In einem nächsten Schritt wurden Annahmen über die jeweilige Flottenzusammensetzung für nationale, d.h. innerdeutsche Flüge und internationale, d. h. grenzüberschreitende Flüge getroffen. Darauf basierend wurden für jede dieser beiden Kategorien gewichtete Emissionsfaktoren berechnet.

Auf Basis der flugzeugspezifischen LTO-Anzahl aus EUROSTAT (2007) (siehe auch Tabelle 4) und der berechneten Emissionsfaktoren aus Tabelle 5 wurden in einem letzten Schritt für nationale, d.h. innerdeutsche Flüge und internationale, d. h. grenzüberschreitende Flüge jeweils die flugzeugspezifischen Emissionsmengen für das Jahr 2005 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 (national) und Tabelle 8 (international) dargestellt.

Tabelle 7: Emissionen des innerdeutschen Luftverkehrs unterhalb von 1000 m (LTO)

ID Flugzeug	NO _x [kg]	SO ₂ [kg]	NH ₃ [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5/10 [kg]
300	408492.67	11820.91	5084.26	57333.81	1494.01
310	41600.64	1203.83	517.78	5838.84	254.24
318	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
319	354758.89	11868.46	5104.71	42813.19	3189.06
320	584913.90	17811.16	7660.72	25558.56	5150.88
321	381999.79	12768.86	5491.98	48773.20	3386.16
330	29878.03	708.22	304.61	2398.51	169.10
340	8003.39	201.33	86.60	915.93	55.44
717	2440.98	80.67	34.70	12.39	34.08
727	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
737	1859809.22	68086.11	29284.35	250600.41	14690.34
747	3691.51	94.65	40.71	532.20	32.90
757	95919.19	2389.04	1027.55	2680.89	574.86
767	9466.39	223.28	96.04	366.77	45.00
777	101.11	1.91	0.82	3.22	0.40
at4	220028.47	7604.64	3270.81	28891.64	2024.85
at7	288600.73	9974.64	4290.17	37895.77	2655.90
c60	153203.71	8464.46	3640.63	58734.24	5471.65
dc1	1522.11	33.13	14.25	646.37	13.44
dc8	198.12	8.28	3.56	14.34	1.01
dc9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
dh8	359139.48	12412.61	5338.76	47158.12	3305.04
do3	105535.00	3647.51	1568.82	13857.66	971.20
e12	54.62	1.89	0.81	7.17	0.50
e13	226.52	9.88	4.25	46.52	6.70
e14	35069.09	1212.06	521.32	4604.87	322.73
e17	4177.42	179.84	77.35	30.87	77.58
f10	276182.70	9545.45	4105.57	36265.18	4247.04
f50	15750.13	544.36	234.13	2068.13	144.94
f70	54.62	1.89	0.81	7.17	0.50
l10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
m11	3168.71	100.79	43.35	490.98	18.60
m80	7605.94	334.41	143.83	992.22	69.54
m90	309.54	10.70	4.60	40.65	2.85

ID Flugzeug	NO _x [kg]	SO ₂ [kg]	NH ₃ [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5/10 [kg]
oan	182.08	6.29	2.71	23.91	1.68
oas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
oba	301619.63	10424.60	4483.70	39605.27	2650.40
obo	36.42	1.26	0.54	4.78	0.83
oca	1815.31	106.69	45.89	448.13	66.86
odg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
odh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
odo	86525.59	2990.50	1286.24	11361.56	796.27
oem	18.21	0.63	0.27	2.39	0.17
ofk	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
olo	382.37	13.22	5.68	50.21	3.52
oth	136634.69	4722.38	2031.13	17941.32	1257.40
out	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s20	8922.04	308.36	132.63	1171.54	82.11
s34	23597.89	815.59	350.79	3098.61	217.16
t13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t15	4442.13	272.57	117.23	21481.10	25.97
unk	410504.95	14187.91	6102.33	53902.85	3777.74
Gesamt [kg]	6226583.97	215195.00	92556.99	818671.48	57290.66

Tabelle 8: Emissionen des grenzüberschreitenden Luftverkehrs unterhalb von 1000 m (LTO)

ID Flugzeug	NO _x [kg]	SO ₂ [kg]	NH ₃ [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5/10 [kg]
300	508897.75	14726.42	6333.94	71426.12	2484.11
310	218792.82	6331.40	2723.18	30708.57	1337.14
318	27890.53	932.28	400.98	3561.02	247.23
319	1100429.35	36814.86	15834.35	132802.57	9892.17
320	1478626.61	45025.53	19365.82	64610.49	13021.11
321	477367.75	15956.67	6863.08	60949.64	4231.53
330	756014.92	17920.24	7707.63	60690.44	4278.80
340	788485.19	19835.21	8531.28	90236.50	5461.89
717	11190.68	369.83	159.07	56.79	156.24
727	2276.60	113.28	48.72	278.46	45.76
737	2983101.67	109208.93	46971.58	401958.69	23563.05
747	1965571.57	50394.77	21675.17	283372.18	17517.84
757	738916.17	18404.07	7915.73	20652.30	4428.45
767	699282.20	16494.00	7094.20	27093.47	3324.15
777	411534.41	7788.40	3349.85	13120.68	1628.00
at4	331844.34	10278.75	4420.97	53717.23	2999.38
at7	280304.11	8682.31	3734.33	45374.17	2533.54
c60	443105.62	24481.47	10529.66	169874.95	21121.71
dc1	85817.83	1867.88	803.39	36442.97	757.76
dc8	5861.07	244.89	105.33	424.09	39.70
dc9	1756.77	54.42	23.40	284.38	22.72
dh8	429481.27	13303.02	5721.73	69522.19	3881.88
do3	60633.38	1878.10	807.78	9815.02	548.04
e12	12322.15	381.67	164.16	1994.65	111.37
e13	1979.22	86.36	37.14	406.49	78.16

ID Flugzeug	NO _x [kg]	SO ₂ [kg]	NH ₃ [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5/10 [kg]
e14	674365.40	20888.21	8984.18	109162.76	6095.27
e17	40091.55	1725.96	742.35	296.25	993.76
f10	344240.72	10662.72	4586.12	55723.89	3895.50
f50	125584.46	3889.93	1673.09	20328.96	1135.10
f70	255536.10	7915.13	3404.36	41364.85	2309.67
l10	492.49	11.25	4.84	211.53	1.23
m11	182186.39	5795.12	2492.52	28229.02	1427.29
m80	187848.34	8259.20	3552.34	41052.44	2292.23
m90	15105.77	467.90	201.25	2445.24	136.53
oan	24669.04	764.11	328.65	3993.30	222.97
oas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
oba	278559.71	8628.28	3711.09	45091.80	1801.28
obo	111.34	3.45	1.48	18.02	1.87
oca	1669.72	98.13	42.21	412.19	82.08
odg	111.34	3.45	1.48	18.02	2.16
odh	1670.17	51.73	22.25	270.36	15.10
odo	643.32	19.93	8.57	104.14	5.81
oem	173.20	5.36	2.31	28.04	1.57
ofk	74.23	2.30	0.99	12.02	0.87
olo	6519.85	201.95	86.86	1055.40	58.93
oth	117493.41	3639.31	1565.30	19019.22	1061.97
out	1063.96	32.96	14.17	172.23	9.62
s20	95434.78	2956.06	1271.42	15448.49	862.59
s34	45193.58	1399.85	602.09	7315.70	408.48
t13	9.28	0.50	0.21	9.87	0.11
t15	117587.53	7215.21	3103.32	568625.46	917.61
unk	338958.03	10499.09	4515.74	54868.76	3063.68
Gesamt [kg]	16676877.71	516711.84	222241.65	2664652.00	150514.99

Die Summen aus Tabelle 7 und Tabelle 8 sind in Tabelle 9 dargestellt

Tabelle 9: LTO- Emissionen des zivilen Luftverkehrs in Deutschland

	Fuel [TJ]	NO _x [t]	SO ₂ [t]	NH ₃ [t]	NMVOC [t]	PM2.5/10 [t]
Innerdeutscher Luftverkehr	23.14	6226.58	215.19	92.56	818.67	57.29
Grenzüberschreitender Luftverkehr	55.56	16676.88	516.71	222.24	2664.65	150.51

2.2.2 Berechnung der Emission aus dem Luftverkehr während des Reisefluges

2.2.2.1 Methodik

Die Emissionen des zivilen Luftverkehrs aus der Reiseflugphase (Cruise) wurden für die Immissionsmodellierung im Rahmen von PAREST nicht benötigt. Es war aber wichtig, diese Emissionen zu berechnen bzw. insbesondere die dieser Flugphase zuzuordnenden Treibstoffmengen, um einen Abgleich mit dem kraftstoffbezogenen Ansatz des ZSE zu ermöglichen und so eine Plausibilitätskontrolle durchführen zu können (siehe Abschnitt 2.3).

Zur Berechnung der Emissionen während des Reisefluges (Cruise) wurde eine Abschätzung der durchschnittlichen Reisentfernung sowohl für den innerdeutschen (national) als auch für den grenzüberschreitenden (internationalen) zivilen Luftverkehr durchgeführt. Dazu wurden durchschnittliche Flugentfernungen auf Basis von Flugleistungsdaten, d.h. die Anzahl der Flüge und die geleistete Flugkilometerzahl, unterschieden nach innerdeutschem und grenzüberschreitendem Luftverkehr, berechnet. Für den grenzüberschreitenden Luftverkehr wurde nur die Reisstrecke berücksichtigt, welche bis zur deutschen Grenze im Durchschnitt zurückgelegt wird. Die Flugleistungsdaten wurden StaBuA (2006a) entnommen. Dabei wurde auf eine flugzeugspezifische Betrachtung verzichtet und stattdessen eine Durchschnittsflotte angenommen.

Die Emissionen aus dem Reiseverkehr des zivilen Luftverkehrs in Deutschland wurden dann unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Treibstoffverbrauchs und durchschnittlichen Emissionsfaktoren jeweils auf Grundlage von EEA (2007) sowie der Anzahl der Flüge von StaBuA (2006a) differenziert nach innerdeutschem und grenzüberschreitendem Luftverkehr berechnet (siehe auch Tabelle 11). Im Folgenden wird der Berechnungsweg anhand der konkret verwendeten Eingangsdaten beschrieben. Tabelle 10 zeigt die Flugleistungen des zivilen Luftverkehrs getrennt nach Verkehr innerhalb Deutschlands und grenzüberschreitendem Flugverkehr (ins Ausland und aus dem Ausland) auf Grundlage von StaBuA (2006a).

Tabelle 10: Flugleistungen auf Grundlage von StaBuA (2006a)

Verkehrsart - Flugart	Flüge	Flug- kilometer	Personen- kilometer	Fracht- tonnenkilometer	Post- tonnenkilometer
	Anzahl	1 000 km	1 000 Pkm	1 000 tkm	
Verkehr innerhalb Deutschlands (Linienverkehr)	382828	136351	9491139	26989	16853
Verkehr ins Ausland	676113	232138	21491277	475294	13322
Verkehr aus dem Ausland	676247	232129	21588600	502589	11766
Gesamtverkehr	1735188	600618	52571017	1004872	41941

Tabelle 11 zeigt die ermittelte durchschnittliche Entfernung für einen Flug innerhalb Deutschlands bzw. für grenzüberschreitende Flüge.

Tabelle 11: Berechnete durchschnittliche Entfernungen pro Flug

Flugkilometer pro Flug [km]	
Durchschnittliche Entfernung für ein Flug innerhalb Deutschlands	356
Durchschnittliche Entfernung für einen Flug ins Ausland (Innerdeutscher Anteil)	343
Durchschnittliche Entfernung für ein Flug aus dem Ausland (Innerdeutscher Anteil)	343
Durchschnittliche Entfernung für einen Flug Gesamt (National + International)	346

Tabelle 12 zeigt die Korrelation zwischen Reiseentfernung und Treibstoffverbrauch auf der Basis von EEA (2007) und die Interpolationsergebnisse für die in Tabelle 11 berechneten durchschnittlichen Distanzen. Für den Reiseflugverkehr (Climb+Cruise+Descent) ist der grau markierte Bereich von Bedeutung. Die übrigen Flugphasen sind zur besseren Verständlichkeit im Folgenden kurz erklärt (vgl. Sterzenbach & Conrady (2003)):

- LTO: Landing and Take-Off Zyklus
- Taxiout: Rollen vom Flughafenterminal bis zur Startbahn
- Climbout: Steigflug im Anschluss an den Start bis in eine Höhe von 3000 Fuß (ca. 915m)
- Climb: Steigflug oberhalb von Climbout
- Cruise: Reiseflug
- Descent: Abstieg nach Verlassen der Reiseflughöhe
- Approach: Landeanflug bis zum Verlassen der Landebahn
- Taxiin: Rollen von der Landebahn bis zum Terminal.

Tabelle 12: Korrelation zwischen Treibstoffverbrauch und Distanz

Average Fleet (B737-400)

Distance(km)	Climb/cruise/descent	232	343	356	463
Fuel (kg)	Flighttotal	1603.1	1923.2	1960.6	2268
	LTO	825.4	825.4	825.4	825.4
	Taxiout	183.5	183.5	183.5	183.5
	Takeoff	86	86.0	86.0	86
	Climbout	225	225.0	225.0	225
	Climb/cruise/descent	777.7	1097.9	1135.3	1442.6
	Approachlanding	147.3	147.3	147.3	147.3
	Taxiin	183.5	183.5	183.5	183.5
NOx (kg)	Flighttotal	17.7	20.6	20.9	23.6
	LTO	8.3	8.3	8.3	8.3
	Taxiout	0.784	0.784	0.784	0.784
	Takeoff	1.591	1.591	1.591	1.591
	Climbout	3.855	3.855	3.855	3.855
	Climb/cruise/descent	9.462	12.318	12.651	15.392
	Approachlanding	1.24	1.2	1.2	1.24
	Taxiin	0.784	0.8	0.8	0.784
HC (g)	Flighttotal	817.6	863.5	868.8	912.9
	LTO	666.8	666.8	666.8	666.8
	Taxiout	321.18	321.2	321.2	321.18
	Takeoff	3.09	3.09	3.09	3.09
	Climbout	10.58	10.58	10.58	10.58
	Climb/cruise/descent	150.78	196.7	202.1	246.13
	Approachlanding	10.74	10.7	10.7	10.74
	Taxiin	321.18	321.2	321.2	321.18
CO (g)	Flighttotal	14252.5	15015.1	15104.1	15836
	LTO	11830.9	11830.9	11830.9	11830.9
	Taxiout	5525.45	5525.5	5525.5	5525.45
	Takeoff	77.19	77.19	77.19	77.19
	Climbout	202.29	202.29	202.29	202.29
	Climb/cruise/descent	2421.54	3184.2	3273.2	4005.06
	Approachlanding	500.54	500.54	500.54	500.54
	Taxiin	5525.45	5525.5	5525.5	5525.45

(Quelle: Emission Inventory Guidebook, 2007)

In Tabelle 13 sind die Emissionsfaktoren für die Schadstoffe NO_x, SO₂, NMVOC und PM2.5 auf Basis von EEA (2007) dargestellt. Für NH₃ wurde der wie bei der LTO-Emissionsberechnung angewendete kraftstoffbasierte Faktor zugrunde gelegt. Tabelle 13 gibt die Emissionsfaktoren sowohl für die „Average fleet“ als auch für die „Old fleet“ an. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Kategorien liegt in der unterschiedlichen Flottenzusammensetzung. Die „Old fleet“ hat in der Regel höhere Emissionsfaktoren aufgrund der eingesetzten Turbinen.

Tabelle 13: Emissionsfaktoren für den Reiseflug (EEA, 2007)

Domestic	SO₂	NO_x	NMVOC	PM2.5
Cruise(kg/tonne)–Average fleet(B737-400)	1.00	10.30	0.10	0.20
Cruise(kg/tonne)-Old fleet(B737-100)	1.00	9.40	0.80	0.20
International	SO₂	NO_x	NMVOC	PM2.5
Cruise (kg/tonne)-Average fleet (B767)	1	12.8	0.5	0.2
Cruise (kg/tonne)-Old fleet (DC10)	1	17.6	0.8	0.2

2.2.2.2 Ergebnisse der Emissionsberechnung für den zivilen Reise- flugverkehr

Die Berechnungsergebnisse für die Emissionen aus dem zivilen Reiseflugverkehr in Deutschland sind in Tabelle 15 dargestellt, unterschieden nach innerdeutschem (Domestic) und grenzüberschreitendem (International) Luftverkehr.

Tabelle 14: Berechnete Emissionen aus dem zivilen Reiseflugverkehr in Deutschland

Domestic	SO₂ [kg]	NO_x [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5/ 10 [kg]	NH₃ [kg]	Fuel [TJ]
Cruise–Average fleet(B737-400)	434617	4476560	43462	86923	74754	18.69
Cruise-Old fleet(B737-100)	434617	4085404	347694	86923	74754	-
International	SO₂ [kg]	NO_x [kg]	NMVOC [kg]	PM2.5 [kg]	NH₃ [kg]	Fuel [TJ]
Cruise -Average fleet (B767)	1484815	19005629	742407	296963	255388	63.86
Cruise -Old fleet (DC10)	1484815	26132740	1187852	296963	255388	-

2.3 Abgleich der Berechnungsergebnisse

Ziel der in diesem Bericht beschriebenen Methode war es, die durch LTO-Aktivitäten des zivilen Luftverkehrs innerhalb Deutschlands verursachten Emissionsmengen zu berechnen. Der bisherige Ansatz auf Grundlage von ZSE (2007) berechnet Emissionen

für den nationalen Luftverkehr und den internationalen Luftverkehr auf Basis der Annahme, dass 20 % des im Inland getankten Treibstoffs nationalen Aktivitäten zuzuordnen sind und 80% internationalen Aktivitäten. Im ZSE (2007) wurden die Flugphasen „LTO“ und „Cruise“ nicht unterschieden. Auf Basis der Annahme, dass die in Deutschland getankten Treibstoffmengen den in Deutschland verbrauchten Treibstoffmengen weitgehend entsprechen, wurden die in beiden Berechnungsansätzen (ZSE, 2007 und dieser Bericht) angenommenen Treibstoffmengen jeweils für den nationalen und internationalen zivilen Luftverkehr miteinander verglichen. Tabelle 15 zeigt, dass die Mengen sowohl für den innerdeutschen zivilen Luftverkehr als auch für den internationalen Luftverkehr nach den beiden Ansätzen stark voneinander abweichen. Insgesamt ist eine Abweichung von etwa 17% bzw. 45% hinsichtlich der insgesamt angenommenen Treibstoffverbräuche festzustellen. Allerdings ist anzumerken, dass die Vergleichbarkeit insbesondere beim internationalen Flugverkehr aufgrund der unterschiedlichen Ansätze nur bedingt gegeben ist. Zur Vollständigkeit und vor allem zur Verdeutlichung der möglichen Unterschiede als Folge der Anwendung von unterschiedlichen Methoden, wird hier dennoch der Vergleich der Ergebnisse auch für den internationalen Flugverkehr aufgezeigt.

Tabelle 15: Abgleich der eigenen Emissionsberechnung mit den Emissionen im ZSE für 2005

		NO _x [t]	SO ₂ [t]	NH ₃ [t]	NM VOC [t]	PM2.5/10 [t]	Fuel [TJ]
National	Emission berechnet (LTO + Reiseflug)	10703.14	389.00	167.31	895.36	144.21	57599.01
	Emissionen ZSE (LTO + Reiseflug)	22538.28	643.79	276.90	2591.78	-	69225.00
	Differenz Eigene Rechnung und ZSE [%]	-52.51	-39.58	-39.58	-65.45	-	-16.79
International	Emission berechnet (LTO + Reiseflug)	35682.51	1110.64	477.63	2933.77	150.81	150977.05
	Emissionen ZSE (LTO + Reiseflug)	90149.52	2575.07	1107.56	10366.72	-	276889.00
	Differenz Eigene Rechnung und ZSE [%]	-60.42	-56.87	-56.88	-71.70	-	-45.47

Die dem LTO-Zyklus bzw. dem Reiseflug zuzuordnenden Treibstoffmengen wurden aus der Verteilung der SO₂-Emissionen berechnet. Dieses einfache Verfahren bietet sich an, da die SO₂-Emissionen über den benutzten Emissionsfaktor von 9,3 kg/TJ linear mit den Treibstoffmengen verknüpft sind. So ist die Konsistenz der Schadstoffmengen zu den Treibstoffmengen sichergestellt.

2.4 Emissionen des Flugverkehrs 2010 - 2020

Für die LTO-Aktivitäten im Jahr 2005 wurden für alle betrachteten Schadstoffe Emissionsfaktoren abgeleitet, indem die Emissionssumme durch den Treibstoffverbrauch geteilt wurde. Daraus wurden Emissionsfaktoren für die Jahre 2010 bis 2020 abgeleitet, in dem sie mit der zeitlichen Dynamik der Emissionsfaktoren überlagert wurden, wie sie, basierend auf TREMOD (Knörr et al., 2005), in ZSE (2007) implementiert ist.

Tabelle 16: Zeitliche Entwicklung der Emissionsfaktoren für nationalen Flugverkehr in ZSE (2007)

Strukturelement	Wertetyp	Schadstoff	Material	2005	2010	2015	2020
Ziviler Luftverkehr, national	Emissionsfaktor	NH ₃	Flugtreibstoff	100%	100%	100%	100%
		NM VOC		100%	96%	91%	87%
		NO _x		100%	95%	90%	86%
		SO ₂		100%	100%	100%	100%
		PM2.5/10		100%	100%	100%	100%
Quelle: berechnet aus [ZSE 2007]							

Für die Entwicklung der Aktivitätsraten wurde parallel zum Ansatz für die Emissionsfaktoren der Treibstoffverbrauch für die LTO-Zyklen im Jahr 2005 mit der Dynamik der Aktivitätsraten des nationalen³ Flugverkehrs in ZSE (2007) überlagert:

Tabelle 17: Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsraten für nationalen Flugverkehr in ZSE (2007)

Strukturelement	Wertetyp	Material	2005	2010	2015	2020
Ziviler Luftverkehr, national	Aktivitätsrate	Flugtreibstoff	100%	110%	123%	136%
Quelle: berechnet aus ZSE (2007)						

Aus den so für alle Jahre definierten Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten wurden schließlich die LTO-Emissionen berechnet.

³ Die zeitliche Dynamik der Aktivitätsraten für den Flugverkehr ist in ZSE (2007) identisch für die Kategorien „national“ und „international“: Diese wurden in der Emissionsberichterstattung mit den konstanten Faktoren 20% für nationalen Flugverkehr und 80% für internationalen Flugverkehr aus den Absatzmengen der deutschen Flughäfen gebildet. Für die Zukunftsjahre wurden dieselben Verhältnisse auf die prognostizierten Gesamtmengen angewendet.

3 Emissionen der internationalen Binnenschifffahrt

Entsprechend AEIGB (2009) entstammen die Emissionen der internationalen Hochseeschifffahrt Schifffahrtsaktivitäten in internationalen Gewässern unter allen Flaggen. Diese Aktivitäten können in internationalen Gewässern, Binnengewässern und Küstengewässern stattfinden⁴. Aufgrund dieser Definition mussten im Rahmen von PAREST auch Emissionen aus Aktivitäten der internationalen Schifffahrt auf Binnengewässern berücksichtigt werden, da in manchen Regionen signifikante Beiträge zur Luftqualität zu erwarten waren.

Anders als die Binnenschifffahrt wird der internationale Schiffsverkehr in der internationalen Emissionsberichterstattung nicht in die nationalen Emissionsmengen eingerechnet, sondern unter "international Bunkers" bilanziert, unabhängig davon, wo die Emissionen stattfinden. Deshalb sind zu Emissionen von internationalen Seeschiffen auf deutschem Hoheitsgebiet auch kaum verwertbare Daten zu finden. Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen des PAREST-Projekts zusätzlich zu ZSE (2007) der internationale Hochseeschiffsverkehr auf Binnenwasserstraßen bilanziert. Die räumliche Verteilung der internationalen Schifffahrt ist in Denier van der Gon, H. et al. (2009) beschrieben und die räumliche Verteilung der nationalen als auch der internationalen Binnenschifffahrt kann Thiruchittampalam, B. et al. (2010) entnommen werden. In Abbildung 3 (siehe Thiruchittampalam, B. et al. (2010)) ist sowohl die räumliche Verteilung der nationalen als auch der internationalen Binnenschifffahrt veranschaulicht, dabei ist der Bereich, der für die internationale Binnenschifffahrt von Relevanz ist grau dargestellt. Die Berechnung der Emissionen wird im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Zunächst wurden die Emissionen des internationalen Schiffsverkehrs auf Binnenwasserstraßen in Deutschland mit Hilfe folgenden Annahmen für das Jahr 2005 quantifiziert: Der Seeverkehr von und zu Binnenhäfen in Deutschland betrug im Jahr 2005 auf Grundlage von StaBuA (2006b) 328,1 Mio. tkm. Es wurde ein spezifischer Treibstoffverbrauch 4,828 g Treibstoff/tkm angenommen (für Küstenschifffahrt in [COM 1999, Seite 23/24 (Annex 2)]) sowie ein Heizwert von 40,453 MJ/kg (aus der Energiebilanz

⁴ **International navigation (Definition according to EEA (2009)):** "Emissions from fuels used by vessels of all flags that are engaged in international water-borne navigation. The international navigation may take place at sea, on inland lakes and waterways and in coastal waters. It includes emissions from journeys that depart in one country and arrive in a different country. Excludes consumption by fishing vessels (see 1.A.4.c.iii - Fishing). Emissions from international military water-borne navigation can be included as a separate sub-category of international water-borne navigation provided that the same definitional distinction is applied and data are available to support the definition."

Deutschland, 2002). Hieraus ergibt sich für 2005 eine Aktivitätsrate von ca. 64 TJ Schiffsdiesel. Auf Basis der in ZSE (2007) enthaltenen Emissionsfaktoren für die internationale Schifffahrt wurden die Emissionen dieser Quellgruppe berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Energieverbrauch und Emissionen für die Quellgruppe internationaler Hochseeverkehr auf Binnenwasserstraßen in Deutschland, 2005

Strukturelement	Wertetyp	Schadstoff	Material	Einheit	2005
Internationaler Hochseeverkehr auf Binnenwasserstraßen	Aktivitätsrate			TJ	64,1
	Emission	NH ₃	Heizöl, schwer	Mg	0,3
		NMVOC		Mg	3,3
		NOx		Mg	115,3
		SO ₂		Mg	89,7
		PM10		Mg	3,8
		PM2.5		Mg	3,8

In Abwesenheit fundierter Prognosen wurden die Emissionen konstant bis 2020 angenommen.

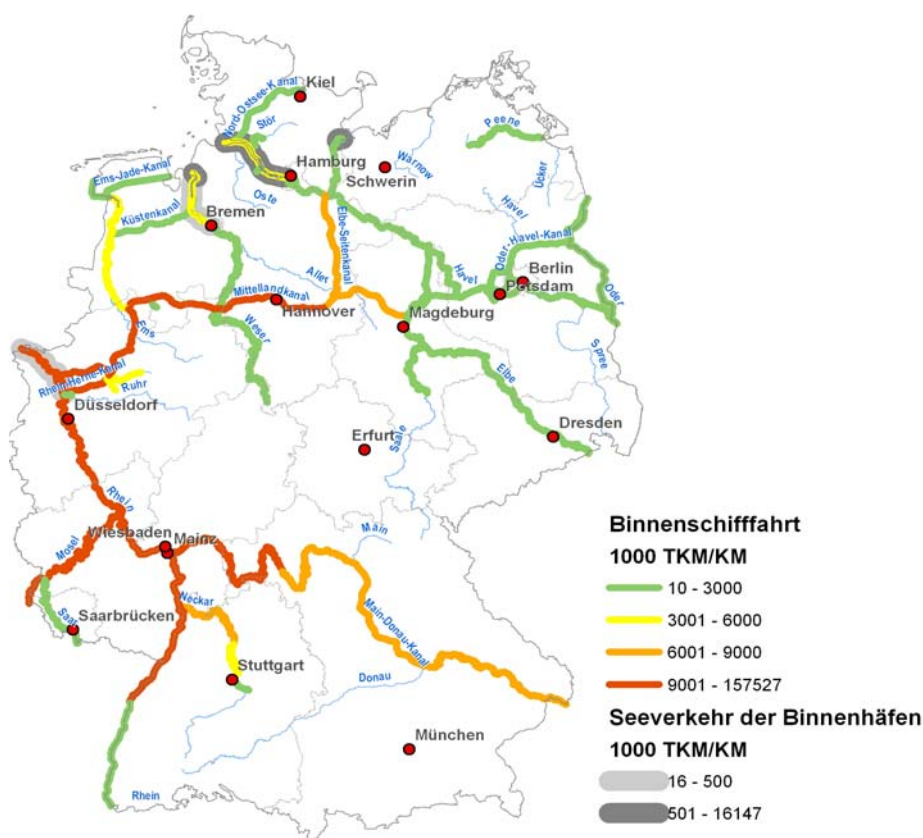


Abbildung 3: Zuordnung der tonnenkilometrischen Leistung aus der Binnenschifffahrt und der internationalen Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen (grau markiert)

4 Zusammenfassung

Die Emissionen aus dem Flugverkehr im ZSE (2007) wurden mit Hilfe des Modells TREMOD berechnet. Basis hierbei ist die Energiebilanz. Die Anforderungen für die Tier-2-Methode, mit einer Unterscheidung der Emissionsfaktoren für den LTO-Zyklus und den Reiseflug wurden dabei nicht erfüllt. Die Berechnung der Emissionen aus dem Flugverkehr erfolgte nach dem Tier-1-Ansatz. Dieser Bericht beschreibt eine Methode, welche Emissionsfaktoren sowohl für den LTO-Zyklus als auch für den Reiseflug berücksichtigt. Der Unterschied zwischen dem Tier-1- und dem Tier-2-Ansatz ist in Tabelle 19 dargestellt.

Der bisherige Ansatz auf Grundlage von ZSE (2007) berechnet Emissionen für den nationalen Luftverkehr und den internationalen Luftverkehr auf Basis der Annahme, dass 20% des im Inland getankten Treibstoffs nationalen Aktivitäten zuzuordnen sind und 80% internationalen Aktivitäten. Auf Basis der Annahme, dass die in Deutschland getankten Treibstoffmengen den in Deutschland verbrauchten Treibstoffmengen weitgehend entsprechen, wurden die in beiden Berechnungsansätzen (ZSE, 2007 und dieser Bericht) angenommenen Treibstoffmengen jeweils für den nationalen und internationalen zivilen Luftverkehr miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine starke Abweichung sowohl für den innerdeutschen zivilen Luftverkehr als auch für den internationalen Luftverkehr. Insgesamt ist eine Abweichung von etwa 17% bzw. 45% hinsichtlich der insgesamt angenommenen Treibstoffverbräuche festzustellen. Allerdings ist anzumerken, dass die Vergleichbarkeit insbesondere beim internationalen Flugverkehr aufgrund der unterschiedlichen Ansätze nur bedingt gegeben ist.

Die auf Grundlage dieser Methode für den PAREST-Referenzdatensatz (Jörß et al., 2010) berechneten Emissionsmengen für das Jahr 2005 sind in Tabelle 19 dargestellt. Zum Vergleich sind in Tabelle 19 auch die Emissionsmengen aus ZSE (2007) dargestellt.

Tabelle 19: Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005

Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005								
Datenbasis	Flugphasen	Flugziel	NO _x	NM VOC	PM _{2.5/10}	SO ₂	NH ₃	Kerosinverbrauch
			[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[TJ]
PAREST REF	LTO	national + international	22,9	3,5	0,2	0,7	0,3	78.7
ZSE 2007	LTO + Reiseflug	National	22,5	2,6	NE	0,6	0,3	69.225

Neben der Emissionsberechnung des Flugverkehrs ist in diesem Bericht auch die Berechnung der Emissionen aus dem Verkehr von internationalen Seeschiffen auf deutschem Hoheitsgebiet beschrieben. Der internationale Schiffsverkehr ist in der internationalen Emissionsberichterstattung nicht in die nationalen Emissionsmengen eingerechnet, sondern unter "international Bunkers" bilanziert, unabhängig davon, wo die Emissionen stattfinden. Daher wurde in diesem Bericht eine Methode beschrieben, um die Emissionen von internationalen Seeschiffen auf deutschem Hoheitsgebiet zu berechnen. Die Ergebnisse der Bilanzierung des internationalen Binnenschiffverkehrs sind in Tabelle 18 zu finden.

5 Referenzen

- COM, 1999:** EUROPEAN COMMISSION: The Development of Short Sea Shipping in Europe: A Dynamic Alternative in a Sustainable Transport Chain - Second Two-yearly Progress Report, Brussels, 29.06.1999, COM(1999) 317 final, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS
http://ec.europa.eu/transport/maritime/sss/doc/com_99_317_en_final.pdf
- Denier van der Gon, H., 2009:** Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van der Brugh, H. (2009) Gridded European emission data for the projection years 2010, 2015 and 2020 based on the IIASA GAINS NEC scenarios Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. TNO-report TNO-034-UT-2009-02306_RPT-ML. TNO, Niederlande.
- EEA, 2007:** EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007, EEA Technical report No 16/2007, Copenhagen, 2007;
<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5>
- EEA, 2009:** EMEP/EEA Atmospheric Emission Inventory Guidebook 2009 (URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/#>)
- EUROSTAT, 2007:** Eurostat, 2007: „Luftverkehr - Zusammengefasste Zahlen auf standardisierter regionaler Ebene (NUTS)“
- GfK, 2007:** Flüsse Deutschland. GfK Geomarketing. Stand 2007. (http://www.gfk-geomarketing.de/digitale_landkarten/landkarten.php).
- ICAO, 2007:** “ICAO Engine Emissions Databank“ siehe <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>.
- Jörß et al., 2010:** Jörß, W., Kugler, U., Theloke, J. (2010), Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005 – 2020; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT
- Knörr et al., 2005:** Knörr W., Dünnebeil F., Helms H., Höpfner U., Lambrecht U., Patyk A. und Reuter C. (2005): Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 204 45 139, Heidelberg
- Luftfahrt-Archiv, 2007:** siehe <http://www.luftfahrt-archiv.de>

- Pregger et al., 2001:** Pregger, T.; Blank, P.; Wickert, B.; Krüger, R.; Theloke, J.; Friedrich, R.: Emissionskataster für Bayern 1996, Projektbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Januar 2001
- StaBuA, 2006a:** Statistisches Bundesamt, 2006 „Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2005, Fachserie 8 Reihe 6.2“
- StaBuA, 2006b :** Stat. BA Fachserie 8, Reihe 4, für 2005, erschienen Mai 2006, 3.3 Güterbeförderung und tonnenkilometrische Leistung 2005 nach Flaggen und Hauptverkehrsbeziehungen
- StaBuA, 2006c** Statistischen Bundesamtes (2006) in Tabelle 4.4 „Güterbeförderung und tonnenkilometrische Leistung 2005 nach Wasserstraßen“
- Sterzenbach & Conrady, 2003:** Rüdiger Sterzenbach, Roland Conrady: Luftverkehr: betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003
- Theloke & Friedrich, 2007:** Theloke, J., Friedrich, R., Compilation of a database on the composition of anthropogenic VOC emissions for atmospheric modeling in Europe, Atmospheric Environment 41 (2007) 4148–416
- Thiruchittampalam et al., 2010:** Thiruchittampalam, B., Köble, R., Theloke, J., Kugler, U., Uzbasich, M., Kampffmeyer, T. (2010a). Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.
- ZSE, 2007:** Zentrales System Emissionen (ZSE), Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes mit dem Stand vom 08.06.2007