

TEXTE

48/2012

# Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs - TREMOD AV



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 360 16 029  
UBA-FB 001664

## **Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs – TREMOD AV**

von

**Wolfram Knörr, Alexander Schacht**  
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH,  
Heidelberg

**Sabine Gores**  
Öko-Institut e.V., Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4357.html>  
verfügbar.

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

ISSN 1862-4804

Durchführung  
der Studie: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH  
Wilckensstr. 3  
69120 Heidelberg

Öko-Institut e.V.  
Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin

Abschlussdatum: November 2010

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet II 2.6 Umweltprüfungen und raumbezogene Umweltplanung  
Michael Kotzulla  
  
Fachgebiet I 3.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr  
Frank Wetzel

Dessau-Roßlau, September 2012

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2 Entwicklung des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2009</b>	<b>4</b>
2.1 Übersicht	4
2.2 Abgehender gewerblicher Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen	5
2.3 Sonstiger Flugverkehr	9
2.3.1 Gewerblicher Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen	9
2.3.2 Nicht gewerblicher Flugverkehr	10
2.4 Starts auf ausgewählten Flugplätzen	10
<b>3 Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Flugzeugen</b>	<b>12</b>
3.1 Flugzyklen	12
3.2 Flugzeugtypen	12
3.3 Emissionsdaten	13
3.3.1 Übersicht	13
3.3.2 Direkt verfügbare Emissionsdaten von Flugzeugtypen	15
3.3.3 Sonstige Emissionsfaktoren	17
3.4 Aufbereitung der Emissionsdaten	17
3.4.1 Übersicht	17
3.4.2 Emissionsfunktionen für Turboprop und Jet	18
3.4.3 Emissionsfunktionen für Drehflügler	19
3.4.4 Emissionsfaktoren für Motorflugzeuge mit Kolbenmotor	20
3.4.5 Übrige Emissionsfaktoren für Kerosin	20
3.4.6 Übrige Emissionsfaktoren für Flugbenzin	21
<b>4 Emissionsberechnung des Flugverkehrs mit TREMOD-AV</b>	<b>22</b>
4.1 Zuordnung Distanzklassen	22
4.2 Berücksichtigung der tatsächlichen Flugstrecke	23
4.3 Berechnung und Aufbereitung der Ergebnisse	24
4.3.1 Kraftstoffverbrauch des Flugverkehrs	24
4.3.2 Aufbereitung der Ergebnisse für die Emissionsberichterstattung	30
4.3.3 Ergebnisse für ausgewählte Emissionskomponenten	33
4.3.4 Differenzierung in Personen- und Güterverkehr	34
4.3.5 LTO-Emissionen auf ausgewählten Flugplätzen	38
<b>5 Das TREMOD-AV-Modell</b>	<b>40</b>
<b>6 Zusammenfassung und offene Punkte</b>	<b>41</b>
<b>7 Anhang</b>	<b>42</b>
7.1 Abgrenzungen Flugverkehrsstatistik	42
7.2 Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdatensätze	43
7.3 Datenquellen für Emissionsfaktoren und Vergleich	53
7.4 Kurzbeschreibung TREMOD-AV	57
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>9 Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>61</b>



## 1 Aufgabenstellung

Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention und der Genfer Luftreinhalte-Protokolle verpflichtet, Emissionsinventare für Klimagase und Luftschadstoffe zu erstellen. Dies geschieht getrennt nach Quellgruppen, auch für den Flugverkehr.

Die Berechnung der Emissionen des Flugverkehrs für das Treibhausgasinventar erfolgt derzeit nach dem Tier 2a Verfahren der IPCC Guidelines 2006, basierend auf der deutschen Energiebilanz, der Verteilung der nationalen und internationalen Kerosinverbräuche nach den Angaben von Eurocontrol und den Angaben zu Starts von deutschen Flughäfen vom Statistischen Bundesamt. Mit dem Emissionsmodell „TREMOD“ steht dem Umweltbundesamt ein Instrumentarium zur Verfügung, das seit vielen Jahren die verkehrsbedingten Emissionen in Deutschland ermittelt und mit den aktuellen Informationen Jahr für Jahr neu berechnet. Seit 2002 werden jedes Jahr die differenzierten Ergebnisse des Straßenverkehrs direkt aus der aktuellen TREMOD-Version in das ZSE übertragen.

Ziel des Vorhabens ist es, das TREMOD-Modell im Bereich Flugverkehr so zu erweitern, dass zukünftig differenzierte und aktuelle Emissionsergebnisse erzeugt werden können, die den Anforderungen der Berichterstattung gerecht werden, und dass die jährlich aktualisierten Emissionsergebnisse direkt in das ZSE übernommen werden können. Dabei sollen die Berechnungen nach einem verfeinerten Verfahren durchgeführt werden, das die Berechnung der Luftverkehrsemissionen auf Basis der einzelnen Flüge nach Flugzeugtypen beinhaltet (Tier 3a).

Darüber hinaus soll das TREMOD-Modul für den Flugverkehr zusätzliche Berechnungs- und Auswertemöglichkeiten bereitstellen, die es erlauben, aktuelle und zukünftig relevante Fragestellungen zu den Emissionen des Flugverkehrs zu beantworten.

Das erweiterte TREMOD-Modell soll im Rahmen der Bestandsaufnahme der Emissionen des Flugverkehrs in Deutschland vor allem die folgenden Informationen liefern:

### 1. Kraftstoffverbrauch und Emissionen des Flugverkehrs

- für Deutschland in der Zeitreihe 1990-2009 (jährlich fortschreibbar mit Realdaten)
- differenziert nach
  - nationalem und internationalem Flugverkehr
  - den Flugphasen LTO (Landing/Take-Off unter 3000 Fuß) und Cruise (Reiseflug oberhalb 3.000 Fuß) sowie
  - dem LTO-Kerosinverbrauch und den LTO-Emissionen nach IPCC-Flugzeugklassen.

### 2. Ausgabe der LTO-Emissionen pro Flughafen

- für die 27 wichtigsten deutschen Verkehrsflughäfen (ausgewählte Flughäfen)
- in der Zeitreihe 1990-2009 (jährlich fortschreibbar mit Realdaten)
- differenziert nach den IPCC-Flugzeugklassen.

## 2 Entwicklung des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2009

### 2.1 Übersicht

Das Verkehrsaufkommen des Luftverkehrs in Deutschland wird auf Basis des Verkehrsstatistikgesetzes (VerkStatG) erhoben [StatBA 6.2]. Für den gewerblichen Flugverkehr erfolgt die Erfassung auf ausgewählten Flugplätzen sehr detailliert. Für die Emissionsberechnung steht hier eine nahezu vollständige und sehr fein gegliederte Datenbasis zur Verfügung.

Im Rahmen der Emissionsberichterstattung und der TREMOD-Modellierung interessiert in erster Linie der von Deutschland abgehende (Outgoing) Flugverkehr, der am ehesten mit der in Deutschland getankten Kraftstoffmenge in Beziehung steht, die die Basis der Berichterstattung darstellt. Für die Emissionsberichterstattung nach den IPCC-Richtlinien wesentlich sind hier Unterscheidungen nach Kraftstoffarten (Kerosin, Flugbenzin) und Verkehrsrelationen (national, international).

Für eine möglichst exakte Bestimmung der Emissionen des Flugverkehrs kann auf flugzyklen- und distanzabhängige Emissionskennzahlen für einzelne Flugzeugtypen zurückgegriffen werden (siehe Kapitel 3). Entsprechende Flugleistungsdaten sind beim Statistischen Bundesamt für gewerbliche Flüge von ausgewählten Flughäfen vorhanden und konnten für dieses Vorhaben zur Verfügung gestellt werden.

Entsprechend der Aufgabenstellung wurden beim Statistischen Bundesamt zwei Datenpakete bestellt:

- **Teil A** zur Berechnung der Emissionen des von Deutschland abgehenden Flugverkehrs (rund 880.000 einzelne Datensätze)
- **Teil B** zur Berechnung der LTO-Emissionen auf den 27 ausgewählten Flugplätzen in Deutschland

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Struktur der Datenpakete.

**Tab. 1 Beschreibung der DESTATIS-Daten für die Emissionsberechnungen**

Parameter	räumlich-zeitlicher Bezug	Flugzeugtypen	Relation	Distanzklassen
<b>Teil A</b>				
Starts Passagiere Fracht Post	Deutschland 1990 – 2009	244	National / International	100 km bis 2.000 km (Abstand: 100 km) 2.000 km bis >10.000 km (Abstand: 500 km) insgesamt 37 Klassen Basis: Großkreisentfernung
<b>Teil B</b>				
Starts	27 Verkehrsflughäfen in Deutschland 1990 – 2009	244	-	-
Anmerkungen: Abgehender (outgoing) gewerblicher Verkehr von ausgewählten Flugplätzen; Anzahl Passagiere sowie Fracht und Post in Tonnen nach „flight stage“ Abgrenzung				

Insgesamt wurden damit für Teil A 880.000 Datensätze und für Teil B 130.000 Datensätze zur Verfügung gestellt. Ausgewählte Ergebnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt.

Für den **nicht-gewerblichen Flugverkehr** und den **gewerblichen Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen** werden vom Statistischen Bundesamt dagegen nur Gesamtwerte für die Flugbewegungen erfasst (siehe Kap. 2.3). Diese eignen sich nicht für eine detaillierte



Emissionsberechnung. Allerdings hat dieses Segment des Flugverkehrs nur einen geringen Anteil an den Emissionen des Flugverkehrs.

## **2.2 Abgehender gewerblicher Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen**

Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistungen des gewerblichen Flugverkehrs werden vom Statistischen Bundesamt in der Fachserie 8, Reihen 6.1 und 6.2 regelmäßig publiziert. Für die Emissionsberechnungen liegen die Daten des Statistischen Bundesamts zum Teil differenzierter (nach Flugzeugtypen), zum Teil in anderer Struktur (Distanzklassen statt Relationen zwischen Ländern und ausgewählten Flugplätzen) vor. Dabei wird das Flight Stage Konzept zugrunde gelegt (siehe Anhang, Kapitel 7.1).

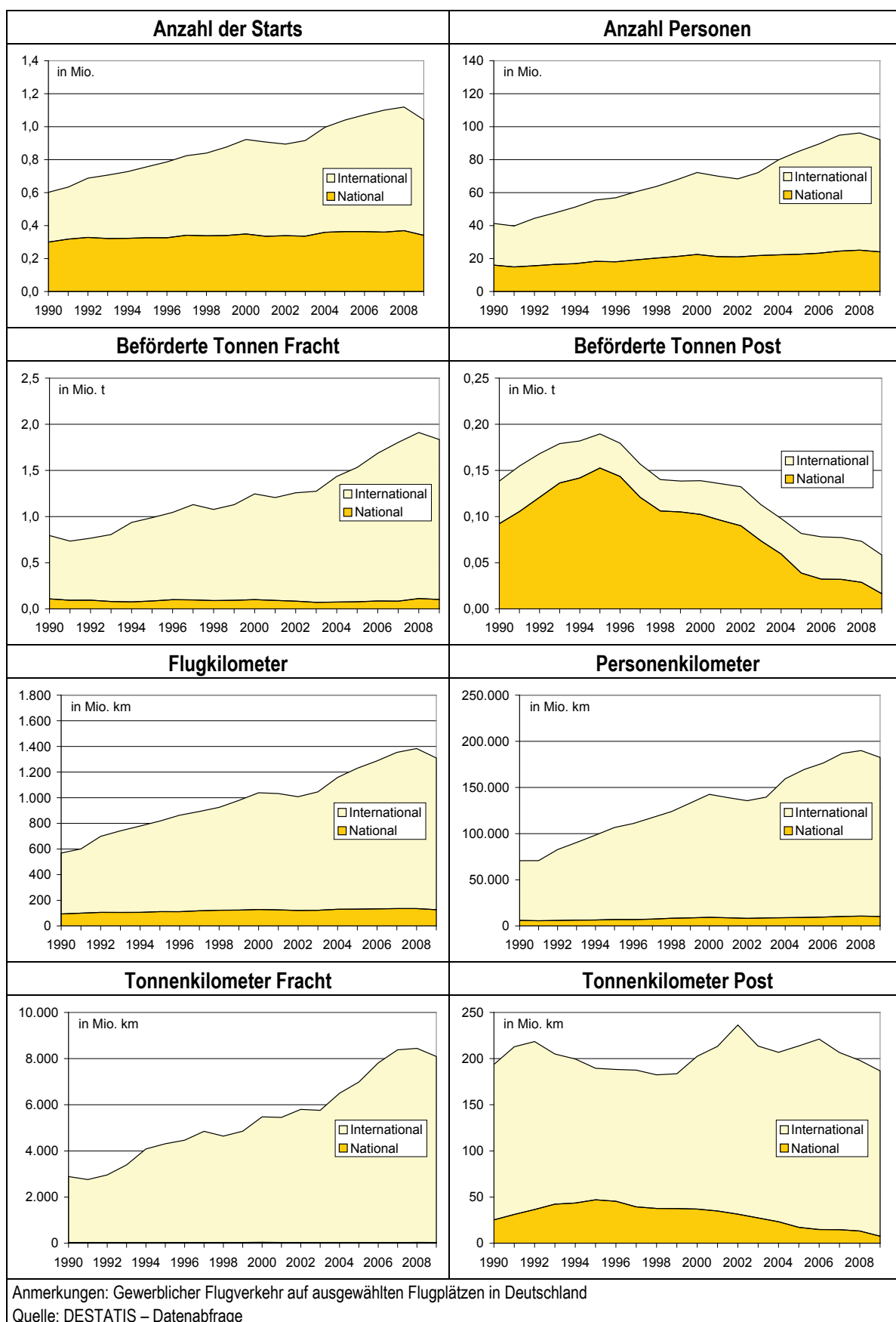
Die zur Verfügung stehenden Daten (Starts, Anzahl der Passagiere, beförderte Tonnen Fracht und Post) geben Auskunft über das Verkehrsaufkommen. Die Berechnung der Verkehrsleistungen (Flug-, Personen-, Tonnenkilometer) erfolgt in der Statistik auf Grundlage der Großkreisentfernungen (Great Circle Distances). Dementsprechend wurden die Flüge in der Datenabfrage für diese Untersuchung den Distanzklassen zugeordnet. Da mit dieser Unterteilung die Information über die mittlere geflogene Entfernung je Distanzklasse nicht mehr zur Verfügung steht, wurden für die Aufbereitung der Detaildaten in diesem Kapitel der arithmetische Mittelwert je Distanzklasse verwendet. Es zeigt sich, dass man mit dieser Annahme recht nahe an die von DESTATIS veröffentlichten Werte herankommt (siehe Abb. 1 bis Abb. 3).

Die Statistik bildet die Verkehrsleistungen für den Idealfall der kürzest möglichen Entfernung ab. In der Realität muss von längeren zurückgelegten Distanzen ausgegangen werden: Zum einen folgen die Flugkorridore nicht der Ideallinie, zum anderen treten außerplanmäßige Umwege und Warteschleifen auf. Dies muss bei der Berechnung der Emissionen berücksichtigt werden. Die dafür verwendeten Quellen und Annahmen sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 1 bis Abb. 3) geben einen Überblick über die Entwicklung der wichtigsten verkehrlichen Größen des gewerblichen Flugverkehrs in Deutschland von 1990 bis 2009.

### **Wichtige Ergebnisse:**

- Der gewerbliche Flugverkehr hat in Deutschland seit 1990 deutlich zugenommen. So stieg die Anzahl der Starts von 1990 bis 2008 um 86 %, die Passagierzahl um 133 % und die beförderte Menge an Fracht und Post um 113 %. Die wesentlichen Zuwächse lagen im internationalen Verkehr (Abb. 1).
- Die starke Zunahme bei den längeren Distanzen wird bei den Verkehrsleistungen deutlich. So stiegen die Flugkilometer von 1990 bis 2008 um 143 %, die Personenkilometer um 169 % und die Tonnenkilometer (Fracht und Post) um 180 % (Abb. 2).
- Der Anteil der großen Flugzeuge nahm im Zeitraum von 1990 bis 2008 deutlich zu (Abb. 3). Dies erklärt den deutlich stärkeren Zuwachs der Personen- und Güterverkehrsleistungen gegenüber den Flugkilometern.
- Im Jahr 2009 gab es konjunkturbedingt einen Rückgang aller Flugverkehrsleistungen.



**Abb. 1 Entwicklung des gewerblichen Flugverkehrs - national und international**

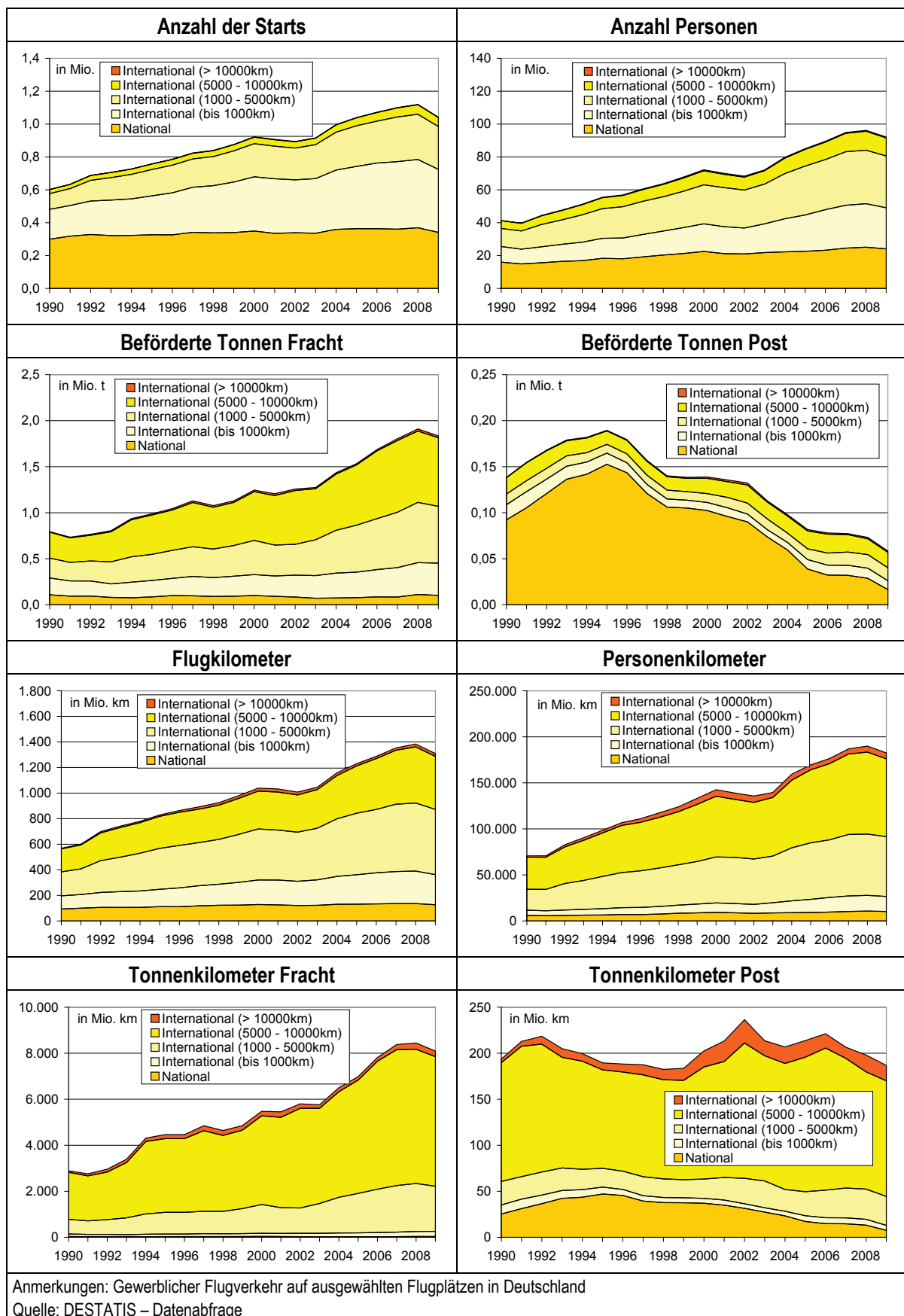


Abb. 2 Entwicklung des gewerblichen Flugverkehrs nach Distanzklassen

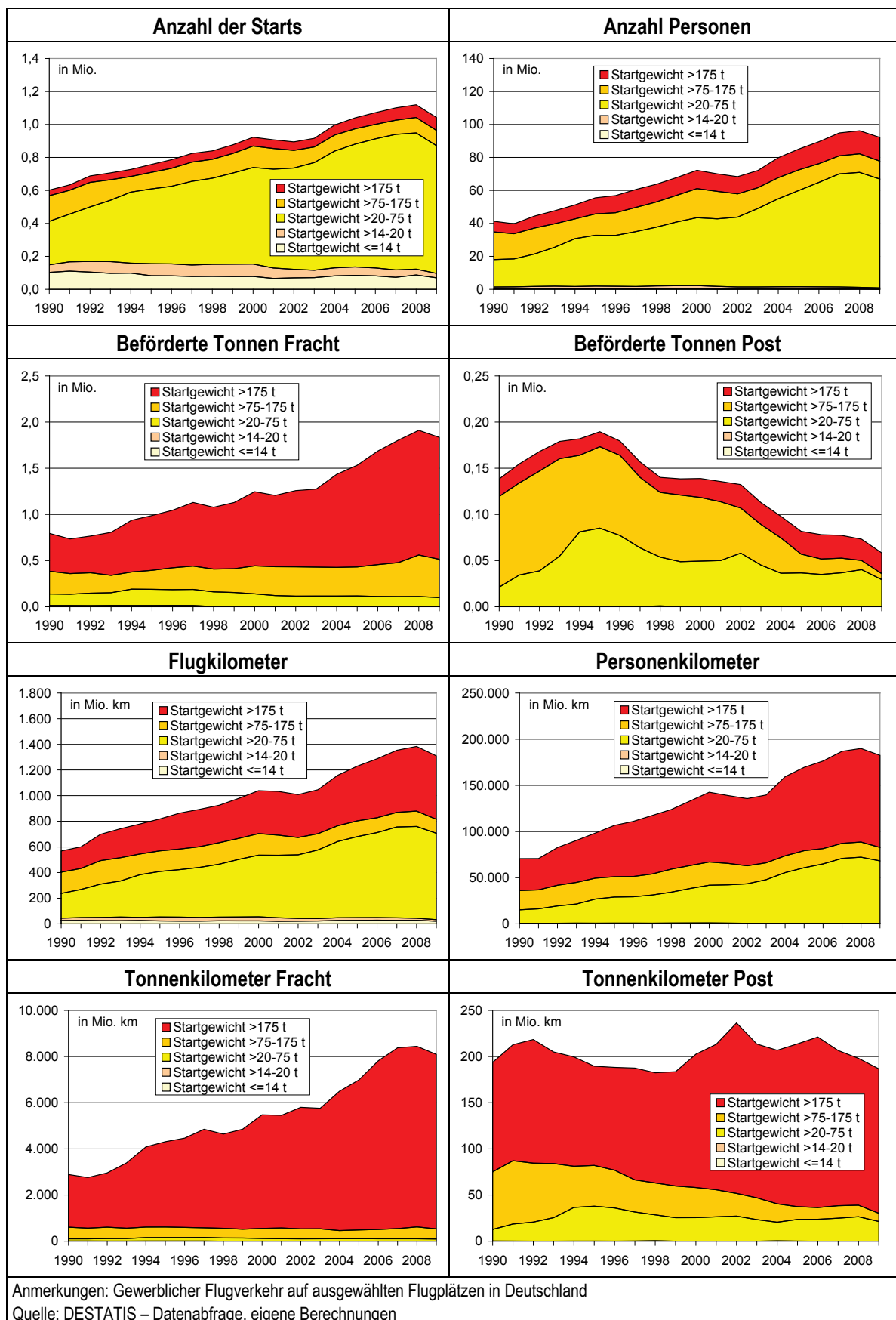


Abb. 3 Entwicklung des gewerblichen Flugverkehrs nach Startgewichtsklassen

## 2.3 Sonstiger Flugverkehr

### 2.3.1 Gewerblicher Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen

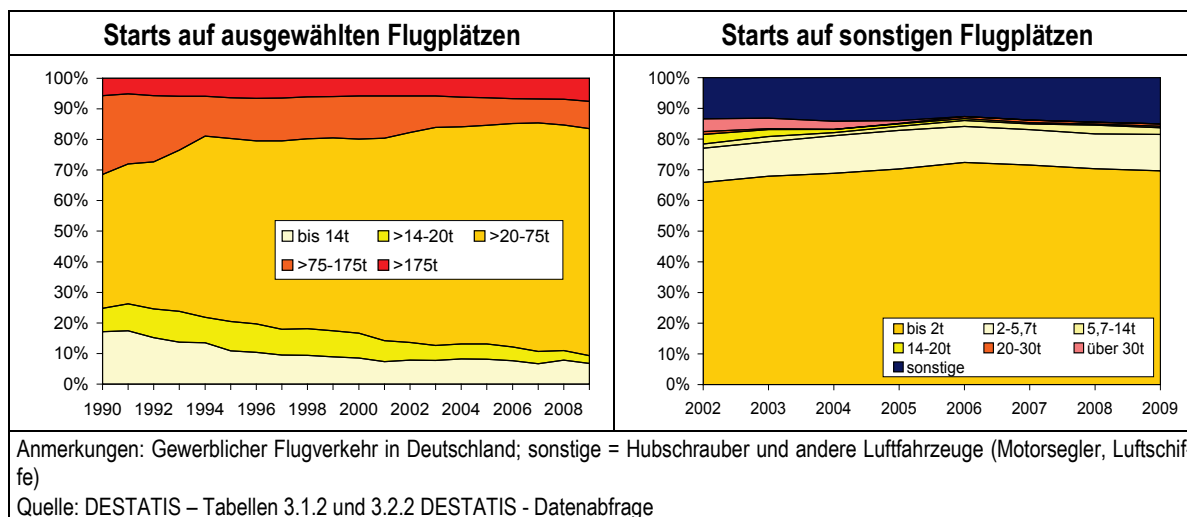
Der gewerbliche Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen ist sowohl nationaler als auch internationaler Verkehr und war in den vergangenen Jahren rückläufig, was im Wesentlichen auf die Aufnahme einzelner Flughäfen in die Bilanz der ausgewählten Flugplätze zurückgeführt werden kann (siehe Kapitel 2.4). Die Anzahl der Flüge auf sonstigen Flugplätzen wird vom Statistischen Bundesamt nicht nach Herkunfts- und Zielorten erfasst. Damit ist eine genaue Trennung national/international nicht möglich. Im Jahr 2009 wurden knapp 30 % der abgehenden Flüge (Starts) aber nur 0,7 % der Personen auf sonstigen Flugplätzen abgefertigt.

**Tab. 2: Gewerblicher Flugverkehr auf ausgewählten und sonstigen Flugplätzen**

Verkehrsart	Anzahl der Starts							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Gewerblicher Verkehr .....	1.484.969	1.513.521	1.435.245	1.476.864	1.480.284	1.585.879	1.592.414	1.470.563
auf ausgewählten Flugplätzen .....	894.241	915.869	996.720	1.039.654	1.071.806	1.100.352	1.119.500	1.042.120
auf sonstigen Flugplätzen .....	590.728	597.652	438.525	437.210	408.478	485.527	472.914	428.443
Verkehrsart	Anzahl der Personen							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Gewerblicher Verkehr .....	70.561.363	74.109.257	80.525.272	85.481.169	89.814.093	95.436.429	96.774.533	92.761.900
auf ausgewählten Flugplätzen .....	68.325.681	72.097.776	79.835.599	85.058.672	89.522.567	94.871.089	96.193.248	92.152.176
auf sonstigen Flugplätzen .....	2.235.682	2.011.481	689.673	422.497	291.526	565.340	581.285	609.724

Quelle: Statistisches Bundesamt 2002 – 2009, Reihe 6.2, Tabelle 1 und DESTATIS - Datenabfrage

Bei den Flugzeugtypen auf den sonstigen Flugplätzen handelt es sich zum weit überwiegenden Teil um kleinere Maschinen, die auf den ausgewählten Flugplätzen nur einen geringen Anteil an den Flugbewegungen ausmachen (siehe folgende Abbildung).



**Abb. 4 Verteilung der Starts des gewerblichen Flugverkehrs nach Startgewichtsklassen**

Die kleinen Maschinen sind überwiegend Propellerflugzeuge, die mit Flugbenzin angetrieben werden. Diese werden in der Emissionsbilanzierung über den Kraftstoffabsatz von Flugbenzin und entsprechende kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren berücksichtigt. Die geringe Anzahl an Flügen mit Strahltriebwerk- und Turboprop-Maschinen wird nicht eigens bilanziert (siehe Kapitel 3.3.1).

### 2.3.2 Nicht gewerblicher Flugverkehr

Der nicht-gewerbliche Flugverkehr umfasst alle übrigen Flugbewegungen mit Motorflugzeugen, Hubschraubern, Segelflugzeugen, Ultraleichtflugzeugen und bemannten Ballonen. Dementsprechend ist die erfasste Anzahl an Flügen sehr hoch: Im Jahr 2009 wurden über 1,1 Millionen nicht-gewerbliche Motorflüge registriert gegenüber 2,2 Millionen gewerblichen Flügen bzw. 1,5 Millionen gewerblichen Starts. Hinzu kommen noch rund 1,5 Millionen sonstige Flüge mit Segel- und Ultraleichtflugzeugen sowie Ballonen.

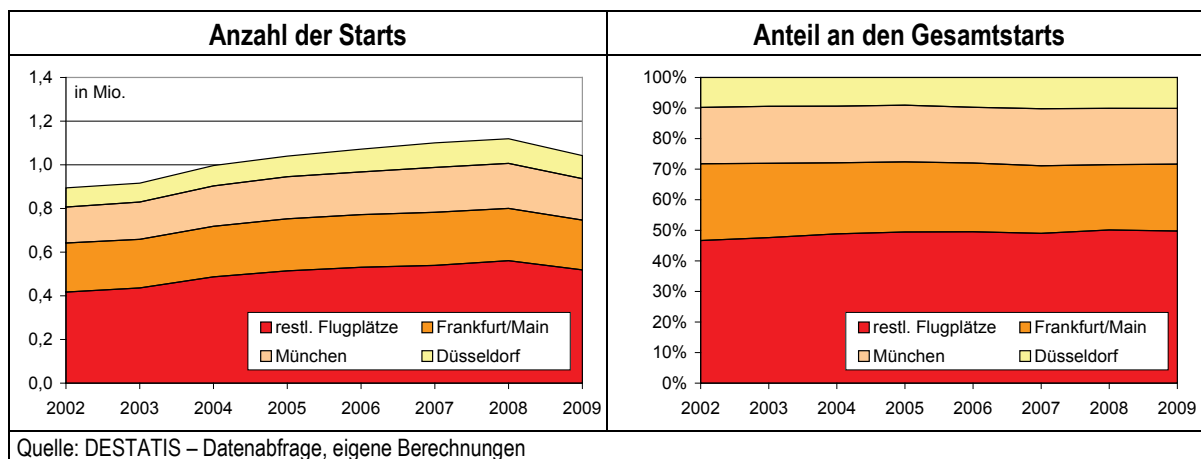
**Tab. 3: Übersicht nichtgewerblicher Verkehr**

Verkehrsart	Anzahl der Starts							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>Insgesamt</b> .....	1.368.542	1.400.993	1.230.224	1.232.824	1.244.201	1.198.332	1.195.777	1.106.229
nach Flugplatzart .....								
auf Flugplätzen .....	1.196.257	1.219.892	1.055.387	1.053.124	1.054.780	1.013.994	1.019.393	964.297
auf Hubschrauberlandeplätzen .....	63.424	67.148	66.230	71.848	80.635	80.498	82.905	81.418
auf Segelfluggeländen .....	863	112.671	107.766	107.707	106.637	102.765	90.652	58.291
auf Ultraleichtfluggeländen .....	0	1.282	841	145	2.149	1.075	2.827	2.223
nach Größenklassen .....								
bis 2t .....			1.000.779	1.013.067	998.166	946.715	941.091	862.272
2 bis 5,7t .....			47.485	41.769	49.820	50.268	46.805	51.419
über 5,7t .....			47.169	45.320	49.809	58.529	56.688	44.373
Hubschrauber und Luftschiffe .....			134.791	132.659	146.406	143.826	151.193	148.165
Segelflüge .....	742.943	790.515	689.846	717.238	662.153	696.906	677.273	751.599
Motorsegelflüge .....	363.931	385.289	311.503	300.255	290.145	271.608	270.312	261.521
Flüge mit Ultraleichtflugzeugen .....	404.857	475.977	417.887	461.316	461.661	477.907	493.601	523.124
Bemannte Ballone .....	3.858	3.729	3.127	3.585	2.883	3.557	2.536	2.392
Anmerkungen: <sup>1)</sup> Passagier- und Nichtpassagierflüge (z. B. Arbeitsflüge, gewerbliche Schulflüge); Starts nach Größenklassen lagen uns für 2002 und 2003 nicht vor								
Quelle: Statistisches Bundesamt 2002 – 2009, Reihe 6.2, Tabelle 1 und 9.2								

Leistungsdaten liegen für den nicht-gewerblichen Verkehr nicht vor. Sofern Motorflugzeuge eingesetzt werden, handelt es sich fast ausschließlich um benzinbetriebene Propellerflugzeuge. Der nicht-gewerbliche Verkehr wird daher - wie auch der gewerbliche Verkehr auf sonstigen Flugplätzen - emissionsseitig als Bestandteil des Kraftstoffabsatzes von Flugbenzin und mit entsprechenden kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren erfasst (siehe Kapitel 3.3.1).

### 2.4 Starts auf ausgewählten Flugplätzen

Zur Bestimmung der LTO-Emissionen auf den ausgewählten Flugplätzen wurde bei DESTATIS zusätzlich für jeden Flugplatz die Anzahl der Starts abgefragt. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Starts seit 2002 insgesamt sowie auf den drei aufkommensstärksten Flugplätzen Frankfurt, München und Düsseldorf, die zusammen rund die Hälfte aller Starts auf ausgewählten Flugplätzen erbrachten.



**Abb. 5 Anzahl der Starts auf den ausgewählten Flugplätzen in Deutschland**

Die Liste der ausgewählten Flughäfen wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich erweitert: Seit 2002 kamen die Flughäfen Dortmund, Friedrichshafen, Frankfurt-Hahn, Karlsruhe/Baden-Baden, Lübeck, Memmingen, Niederrhein, Paderborn/Lippstadt, Rostock und Zweibrücken hinzu. Insgesamt zählten im Jahr 2009 26 Flugplätze zu den ausgewählten Flughäfen, nachdem Berlin Tempelhof ab 2009 nicht mehr angeflogen wird. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der Starts auf den ausgewählten Flugplätzen von 2002 bis 2009.

Flugplatz	Anzahl der Starts							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Berlin-Schönefeld	12.374	12.432	19.310	25.959	28.991	28.928	29.879	32.467
Berlin-Tegel	60.597	67.286	65.951	68.659	67.176	72.725	77.259	73.772
Berlin-Tempelhof	18.812	14.042	13.130	12.860	15.578	12.059	10.369	-
Bremen	17.157	16.136	17.051	16.999	15.905	18.181	19.062	17.932
Dortmund	-	-	8.546	11.547	11.831	11.504	13.734	11.076
Dresden	13.393	12.438	13.901	14.414	14.579	14.456	14.700	13.568
Düsseldorf	87.730	86.333	93.577	94.327	104.397	112.403	113.024	105.571
Erfurt	6.304	7.285	7.125	6.440	5.812	5.847	6.163	5.316
Frankfurt/Main	224.442	222.663	231.576	238.389	241.053	243.121	239.323	227.988
Friedrichshafen	-	-	4.831	5.710	6.025	5.958	6.943	6.178
Hahn	-	10.336	11.219	12.873	16.254	17.327	16.824	16.317
Hamburg	62.498	63.302	64.854	67.069	72.833	75.679	75.132	68.848
Hannover	37.764	38.403	38.568	39.812	37.513	36.115	35.853	31.820
Karlsruhe/Baden-Baden	-	-	11.504	13.215	14.583	11.780	12.903	12.197
Köln/Bonn	60.720	67.138	67.695	70.033	69.226	69.082	64.070	60.080
Leipzig/Halle	15.002	15.795	15.510	15.144	16.766	20.800	27.322	27.841
Lübeck	-	-	3.216	3.733	3.701	3.374	3.609	4.036
Memmingen	-	-	-	-	-	-	4.017	5.060
München	164.792	170.853	184.690	192.775	195.628	205.471	206.231	189.864
Münster/Osnabrück	16.481	15.969	12.980	14.424	13.968	13.316	13.842	13.291
Niederrhein	-	431	1.855	2.724	2.446	3.457	5.993	9.507
Nürnberg	29.832	28.103	28.416	29.692	30.995	31.367	29.537	27.698
Paderborn/Lippstadt	-	-	7.929	7.716	7.483	7.405	6.483	5.349
Rostock	-	-	-	-	1.597	1.790	1.456	1.297
Saarbrücken	5.703	5.690	5.179	5.223	5.371	5.324	6.859	6.076
Stuttgart	60.640	61.234	68.107	69.917	72.095	72.883	70.700	62.724
Zweibrücken	-	-	-	-	-	-	8.213	6.247
Gesamt:	894.241	915.869	996.720	1.039.654	1.071.806	1.100.352	1.119.500	1.042.120

Quelle: Destatis, eigene Berechnungen

**Abb. 6: Anzahl der Flugzeugstarts auf ausgewählten Flugplätzen von 2002 bis 2009**

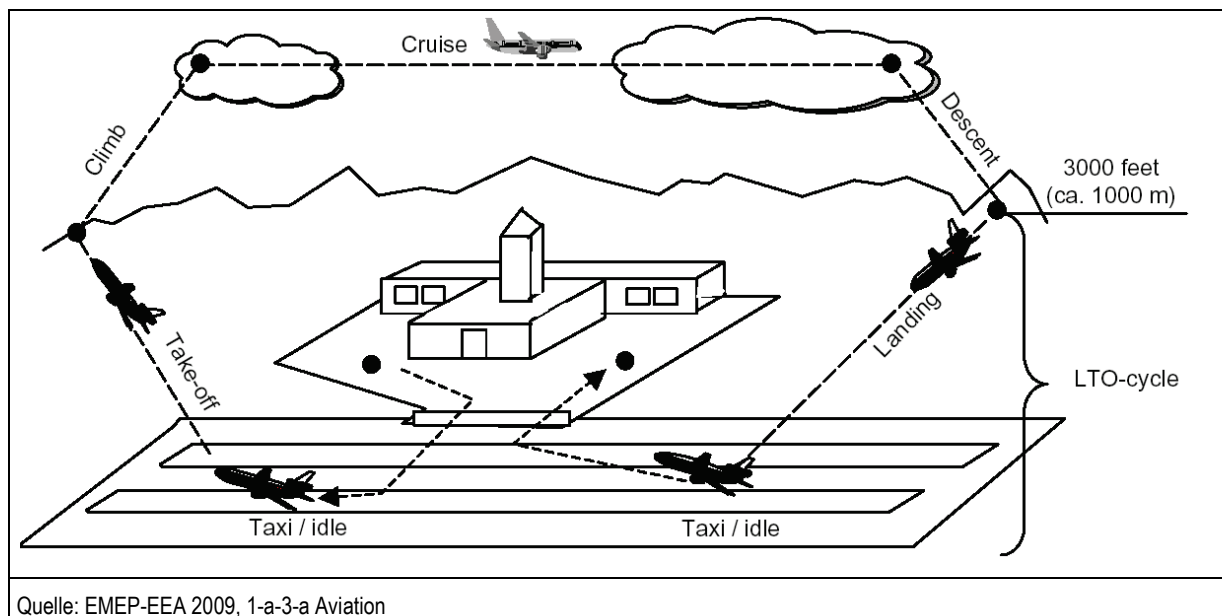
### 3 Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Flugzeugen

#### 3.1 Flugzyklen

Die Flugzyklen werden in TREMOD entsprechend der Abgrenzung in [EMEP-EEA 2009] definiert:

- **LTO (landing and take-off cycle):** beinhaltet alle Aktivitäten im Bereich des Flughafens unterhalb einer Höhe von 3.000 Fuß (914 Metern). Eingeschlossen sind Leerlauf (idle), die Taxi-Verkehre am Boden (taxi-in, taxi out), die Startphase bis 914 Meter und die Landephase ab 914 Metern.
- **CCD (climb, cruise, descend)** beinhaltet die Reiseflugphase einschließlich der Steig- und Sinkphasen oberhalb von 914 Metern.

Diese Abgrenzung deckt sich mit den Anforderungen der Emissionserfassung nach IPCC und wird so im ZSE erfasst. Dementsprechend wurden auch die Emissionen für einzelne Flugzeugtypen in dieser Differenzierung in [EMEP-EEA 2009] aufbereitet.



**Abb. 7 Definition des Flugzyklus mit den einzelnen Phasen**

#### 3.2 Flugzeugtypen

Für den Antrieb von Flugzeugen gibt es heutzutage im Wesentlichen drei Konzepte:

- Antrieb mit „Turbofan“ oder Strahltriebwerk (umgangssprachlich häufig als Jet-Triebwerk bezeichnet),
- Antrieb mit „Turboprop“ (Strahltriebwerk, welches einen Propeller antreibt) und
- Antrieb mit Kolbenmotor (welcher einen Propeller antreibt).

Strahltriebwerke und Turboprops verbrennen Kerosin (jet fuel), Flugzeug-Kolbenmotoren fast ausschließlich Flugbenzin (AvGas). Der größte Teil des Flugtreibstoffs wird von großen Flugzeugen mit entsprechend großen Triebwerken (meist Turbofans) umgesetzt. Flugzeug-Kolbenmotoren hingegen finden sich fast ausschließlich in Kleinflugzeugen und

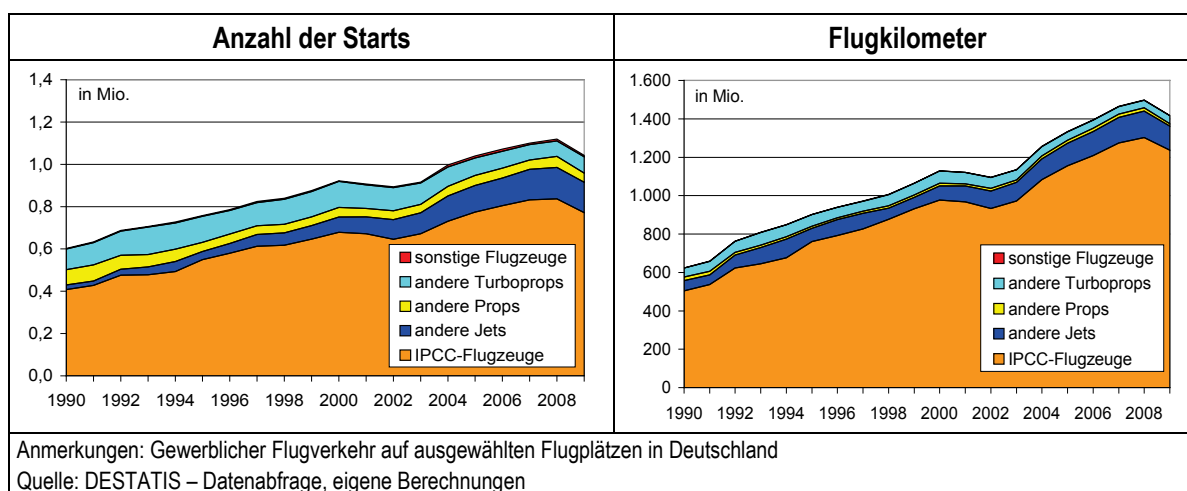


haben global gesehen nur einen verschwindend kleinen Anteil am Treibstoffverbrauch [BAZL 2007].

Im Rahmen dieses Projekts soll für die Emissionsberechnung möglichst nach IPCC-Flugzeugtypen differenziert werden. IPCC unterscheidet 51 Typen mit Strahltriebwerk und Turbopropeller, also ausschließlich Kerosin-betriebene Maschinen (siehe Anhang; Kapitel 7.2). Für die meisten dieser Typen liegen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für beide Flugphasen, differenziert nach Distanzklassen, in [EMEP-EEA 2009] vor. Für die fehlenden Typen können zumindest Emissions- und Verbrauchsfaktoren für den LTO-Zyklus aus der IPCC-Datenbank [IPCC 2006a] verwendet werden. Für den Reiseflug (CCD) ist das nicht möglich, da Verbrauchsangaben je Distanzklasse fehlen und nur pauschale Kraftstoff-bezogene Emissionsfaktoren angegeben werden. Diese Kennzahlen müssen hier entsprechend geschätzt werden (siehe Anhang, Kapitel 3.4).

DESTATIS unterscheidet hingegen 244 Flugzeugtypen, wobei verschiedene Typen bereits zu Gruppen aggregiert werden. Für diese liegen bei DESTATIS Angaben über das Startgewicht und den Antrieb vor. Im Gegensatz zum IPCC sind auch benzinbetriebene Flugzeugtypen in der Untergliederung enthalten (siehe Anhang, Kapitel 7.2).

Der überwiegende Teil der von DESTATIS unterschiedenen Flugzeugtypen kann direkt den Typen gemäß IPCC zugeordnet werden. Dieser Anteil ist im betrachteten Zeitraum jedoch leicht rückläufig (siehe Abb. 8). Im Jahr 2009 wurden so rund 73 % der Starts und 86 % der Flugkilometer mit Flugzeugtypen geflogen, die nach IPCC definiert werden können.



**Abb. 8 Entwicklung des gewerblichen Flugverkehrs nach IPCC-Typen und sonstigen Flugzeugen**

Für die Flugzeugtypen des gewerblichen Flugverkehrs, die nicht direkt den IPCC-Typen zuordnenbar sind, ist eine Schätzung der Emissionskennzahlen erforderlich.

### 3.3 Emissionsdaten

#### 3.3.1 Übersicht

Emissionsfaktoren (EF) für den Flugverkehr liegen aus verschiedenen Quellen in verschiedener Differenzierung vor. Zu unterscheiden sind der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen  $\text{NO}_x$ , NMVOC und  $\text{CO}$ , die teilweise differenziert nach Typen und Flugzyklen vorliegen (Gruppe 1), weitere Abgasemissionen wie etwa PM,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{CH}_4$ ,

die nur pauschal ermittelt werden können (Gruppe 2) und schließlich Emissionen, die sich direkt aus dem Kraftstoffverbrauch ableiten lassen (v.a. CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Blei).

Abhängig von der Datenverfügbarkeit müssen verschiedene Berechnungsverfahren gewählt werden. In [EMEP-EEA 2009] wurden z.B. drei Stufen der Emissionsberechnung definiert (Tier 1, 2, 3).

**Tab. 4: Stufen verschiedener Genauigkeit für die Emissionsberechnung**

	Aktivität	Technologische Gliederung
Tier 1	Kraftstoffabsatz unterteilt in nationalen und internationalen Verkehr Anzahl Starts (LTO) für nationalen und internationalen Verkehr	Durchschnittlicher Flottenmix, z.B. allgemeiner Flugzeugtyp und durchschnittliche Faktoren für LTO und CCD
Tier 2	Kraftstoffabsatz unterteilt in nationalen und internationalen Verkehr (wie Tier 1) Anzahl Starts (LTOs) für nationalen und internationalen Verkehr nach Flugzeugtypen	Flugzeugspezifische LTO-Faktoren und mittlere Faktoren für CCD
Tier 3	Informationen zu Flugzeugtyp und Flugentfernung, unterteilt in nationalen und internationalen Verkehr, vorhanden	Flugzeugspezifische Faktoren (z.B. aus der EMEP EEA-Datenbank)
Quelle: EMEP-EEA 2009, 1-a-3-a Aviation		

In TREMOD-AV können Kraftstoffverbrauch und verschiedene Emissionen des gewerblichen Flugverkehrs auf ausgewählten Flugplätzen nach Tier 3 berechnet werden, da sowohl Verkehrsleistungs- als auch Emissionsdaten nach Flugzeugtypen differenziert werden. Allerdings liegen nicht für alle DESTATIS-Flugzeugtypen entsprechende Emissionsdaten vor. In diesen Fällen wurden, wenn möglich, die vorhandenen Emissionsdaten ähnlicher Typen verwendet. Für DESTATIS-Typen, bei denen wenig oder keine Ähnlichkeit mit denjenigen Typen besteht, für die detaillierte Emissionsfaktoren vorliegen, wurden Emissionsdaten aus dem Datenpool funktionell abgeleitet. Damit beinhaltet die TREMOD-Berechnung nach Tier 3 verschiedene Qualitätsstufen (siehe Kapitel 3.4.1). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in TREMOD-AV verwendeten Berechnungsstufen.

**Tab. 5: Verwendete Stufen der Emissionsberechnung in TREMOD-AV**

		Kraftstoffverbrauch und KV-abhängige Emissionen  KV, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Emissionen Gruppe 1  HC, CO, NO <sub>x</sub>	Emissionen Gruppe 2  PM, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>
1	Gewerblicher Verkehr auf ausgewählten Flugplätzen			
A	Kerosin	Tier 3 (verschiedene Qualitäten)		Tier 1 (mittlere EF aus Literatur)
B	Flugbenzin	Tier 3 (verschiedene Qualitäten)		Tier 1 (mittlere EF aus Literatur)
2+3	Gewerblicher Verkehr auf sonstigen Flugplätzen und sonstiger Flugverkehr			
A	Kerosin	Nicht detailliert berechnet (wird unter 1A erfasst)		
B	Flugbenzin	Tier 1 (Energiebilanz minus 1B)	Tier 1 (mittlere EF aus 1B)	Tier 1 (mittlere EF aus Literatur)

### 3.3.2 Direkt verfügbare Emissionsdaten von Flugzeugtypen

Wichtigste Basis der TREMOD-Berechnung sind die in der Datenbank von EMEP-EEA enthaltenen Emissionskennzahlen nach Flugzeugtypen sowie die LTO-Werte aus der IPCC-Datenbank [IPCC 2006a]. Außerdem wurden weitere Datenbanken (DLR, Piano u.a.) mit einbezogen. Die von IFEU durchgeführten Analysen der weiteren Quellen sind im Anhang Kapitel 7.3 dargestellt.

In den folgenden Kapiteln werden daher nur jene Kennzahlen und Quellen dargestellt, die bisher für die Berechnungen in TREMOD-AV verwendet wurden.

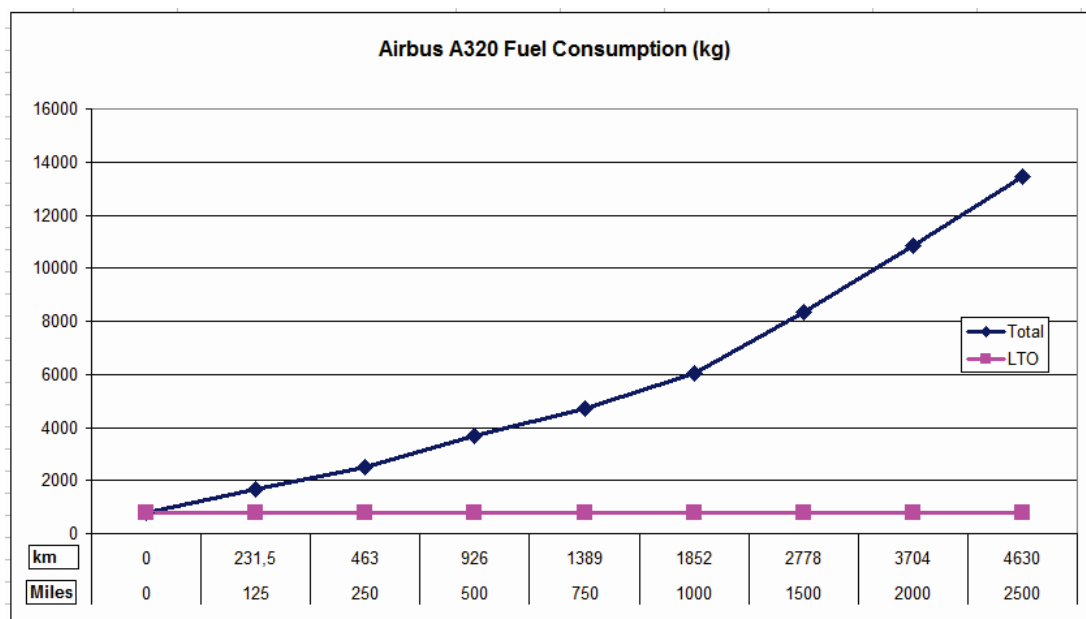
#### 3.3.2.1 Flugzeuge mit Strahltriebwerk (Jets)

Die EMEP-EEA-Datenbank enthält insgesamt 19 der wichtigsten Flugzeugtypen mit Strahltriebwerk. Erfasst werden Kraftstoffverbrauch und die NO<sub>x</sub>-, HC- und CO-Emissionen für LTO und CCD in verschiedenen Distanzklassen. Die folgende Tabelle fasst die vorhandenen Daten zusammen.

**Tab. 6: Übersicht der JET-Flugzeugtypen aus der EMEP-Datenbank**

IDEM_Model	Flugzeugtyp	Distanz (NM)	Komponenten
86	Boeing B 737-100	125-2000	Treibstoffverbrauch und Emissionen von NO <sub>x</sub> , HC, CO
94	Boeing B 737-400	125-2000	
102	Douglas DC 9 All Series	125-2000	
111	Mc Donnell MD 82	125-2000	
117	Fokker F28 Fellowship	125-1500	
118	Fokker F100	125-1500	
120	BAE-146 All Series	125-1000	
130	Airbus A320 All Series	125-2500	
134	BAC1-11 All Series	125-2000	
170	Boeing 727	125-2500	
174	Boeing 757 All Series	125-2500	
184	Airbus A310 All Series	125-3500	
209	Boeing B 747-400	125-6500	
215	Boeing B 767-300	125-5000	
218	Boeing 777 All Series	125-6000	
222	Douglas DC 10	125-5000	
228	Airbus A330 All Series	125-4000	
202	Boeing B 747 All Series	125-5500	
231	Airbus A340 All Series	125-6000	
NM: nautische Meilen Quelle: EMEP-EEA 2009			

Die folgende Darstellung zeigt beispielhaft den Kerosinverbrauch während des LTO-Zyklus sowie den gesamten Kerosinverbrauch je Distanzklasse (Total = LTO + CCD).



**Abb. 9 Struktur der Emissionsdatenbank von EMEP-EEA am Beispiel Kraftstoffverbrauch des Airbus A320**

### 3.3.2.2 Turbopropeller-Flugzeuge

Für insgesamt sechzehn Turboprop-Typen liefert die EMEP-EEA-Datenbank Verbrauchs- und Emissionswerte für LTO und CCD nach verschiedenen Distanzklassen und in gleicher Struktur und Datentiefe wie für die Jets. Die folgende Tabelle fasst die vorhandenen Daten zusammen.

**Tab. 7: Übersicht der Turbopropeller-Flugzeugtypen aus der EMEP-Datenbank**

IDEM_Model	Flugzeugtyp	Distanz (NM)	Komponenten
6	Beech 200 Super King Air	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
13	Swearingen Metro III/400	125-1000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
15	BAe Jetstream 31	125-1000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
17	BAe Jetstream 41	125-1000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
20	Embraer 110P2A	125-750	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
21	Beech 1900C Airliner	125-2000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
23	Dornier 328-110	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , CO
39	De Havilland Dash 7	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
44	ATR 42-320	125-2000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , CO
58	Fokker 27 Friendship	125-2000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
60	Fokker 50 Srs 100	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , CO
62	Saab 2000 3740 hp	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
63	ATR 72-200	125-2500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , CO
65	Antonov 26	125-2000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
73	Lockheed C-130H Hercules	125-4000	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO
78	Dash 8 Q400 4580 hp	125-1500	Kraftstoff, NO <sub>x</sub> , HC, CO

NM: nautische Meilen  
Quelle: EMEP-EEA 2009

### 3.3.2.3 Motorflugzeuge mit Propellerantrieb, Drehflügler und sonstige

Für Motorflugzeuge mit Propellerantrieb und Drehflügler wurden Emissionsdaten vom Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz (BAZL) aufbereitet und veröffentlicht [BAZL 2007].

Es handelt sich um Emissionskennzahlen für einzelne Typen oder Startgewichtsklassen, jeweils für LTO und Reiseflug, bezogen auf eine Flugstunde.

### 3.3.3 Sonstige Emissionsfaktoren

Die sonstigen Emissionsfaktoren der Gruppe 2 (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, PM) und die kraftstoffabhängigen Werte (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) wurden, da keine neuen Erkenntnisse zu diesen Stoffen vorliegen, aus dem Inventartool des Öko-Instituts übernommen. Die Kennzahlen sind im Detail für Kerosin im Kapitel 3.4.5 und für Flugbenzin im Kapitel 3.4.6 dargestellt.

## 3.4 Aufbereitung der Emissionsdaten

### 3.4.1 Übersicht

Jedem Flugzeugtyp der DESTATIS-Verkehrsdatenbank muss ein Set an Emissionsfaktoren zugeordnet werden. Hierzu wird eine Zuordnungstabelle erstellt. Vier „Qualitäten“ werden unterschieden:

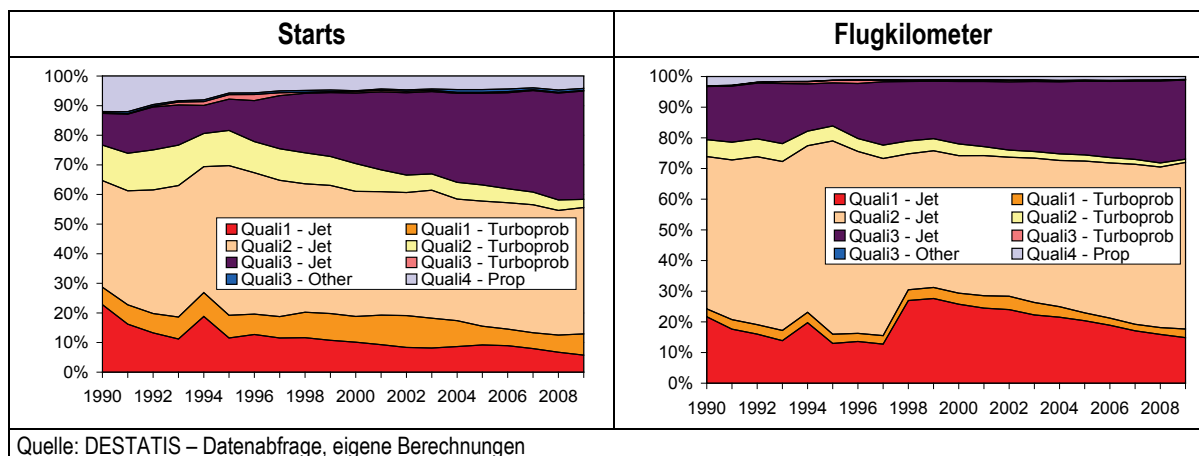
1. direkte Zuordnung von Emissionsfaktoren für einen Typ möglich.
2. Emissionsfaktoren eines Typs können einem anderen Typ zugeordnet werden.
3. Emissionsfaktoren werden über Emissionsfunktionen zugeordnet, die den Emissionsfaktor je Triebwerkstyp in Abhängigkeit des Startgewichts berechnen. Basis der Funktionen sind die Emissionsfaktoren der vorhandenen Typen.
4. Zuordnung pauschaler Emissionswerte aus der Literatur.

Die folgende Vorgehensweise wird dabei angewendet (siehe Tab. 8):

**Tab. 8:** Übersicht zur Qualität der Emissionsfaktoren

Qualität	Kategoriebeschreibung	Bemerkungen
1	Zuordnung: Typ direkt verfügbar	Direkte Zuordnung der EF für diverse Flugzeugtypen anhand von vorhandenen EMEP-Daten.
2	Zuordnung: Flugzeuge deren techn. Daten wie Startgewicht etc. ähnlich sind	Zuordnung der EF zu Flugzeugtypen der gleichen Typserie oder mit identischem Startgewicht bzw. gleicher Triebwerksausstattung.
3	Zuordnung: Regressionsberechnung	Regressionsberechnung mit den vorhandenen EMEP-Emissionsdaten. Bei den Drehflüglern Regressionsberechnung anhand von BAZL-Daten.
4	Pauschale EF	Propellerflugzeugen wurden pauschale EF zugewiesen. Daten stammen aus BAZL 2007.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Einteilung der 244 DESTATIS-Flugzeugtypen in verschiedene Qualitätsstufen und deren Anteile an den Starts und Flugkilometern 1990-2009. Generell ist im zeitlichen Verlauf ein steigender Anteil an Flugzeugtypen mit geringeren Qualitätsstufen zu erkennen, besonders bei der Anzahl der Starts. Dies ist begründet durch den steigenden Anteil neuerer Flugzeugtypen, die in den vorliegenden Datenbanken noch nicht so detailliert erfasst sind wie die älteren Typen. Die Zuordnung für jeden DESTATIS-Flugzeugtyp ist im Anhang (Kapitel 7.3) dargestellt.



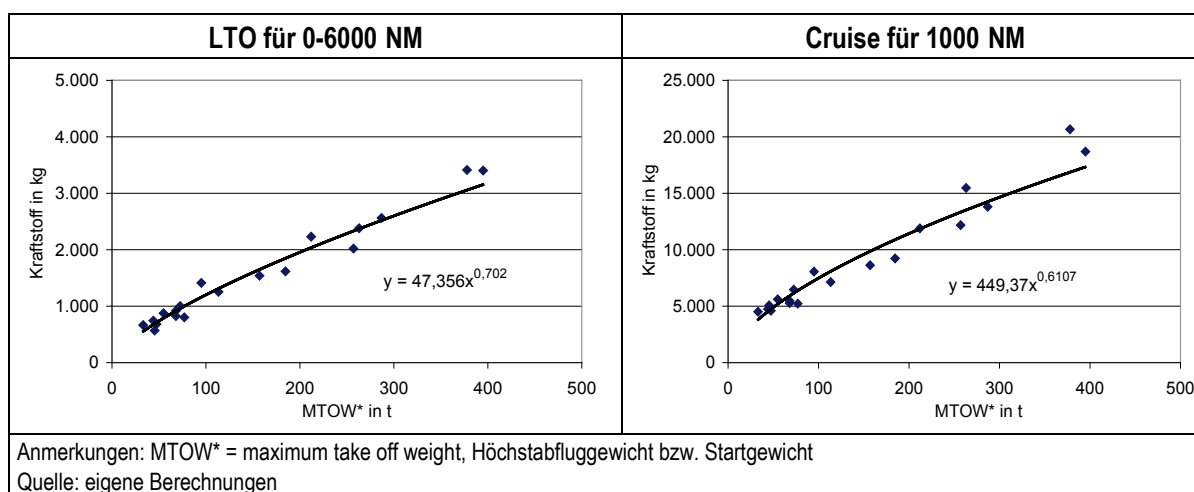
**Abb. 10: DESTATIS-Flugzeugtypen in den verschiedenen Qualitätsstufen, Anteil der Starts und Flugkilometer von 1990-2009**

### 3.4.2 Emissionsfunktionen für Turboprop und Jet

Kraftstoffverbrauch und Emissionen eines Flugzeugs sind im Wesentlichen von dessen technischem Konzept (Antrieb, technischer Stand bzw. Alter) und der Flugzeuggröße abhängig. Einige wichtige Komponenten (Kraftstoffverbrauch und kraftstoffabhängige Emissionen, Stickstoffoxid) können in erster Näherung mit der Flugzeuggröße korreliert werden, wenn keine Informationen über das Emissionsverhalten eines Typs vorliegen. Daher wurden in dieser Untersuchung aus dem vorhandenen Datenpool von [EMEP-EEA 2009] Emissionsfunktionen abgeleitet.

Anhand der vorhandenen Emissionsdaten wurden für den Kraftstoffverbrauch und die Komponenten  $\text{NO}_x$ , HC und CO, unterschieden nach Flugzeugart (Turboprop und Jet), Distanzklasse und Flugphase, potenzielle Regressionsfunktionen  $y = a \cdot x^b$  aus den vorhandenen EMEP-Emissionskennzahlen entwickelt (Abb. 11).

Diese Funktionen ermöglichen eine Emissionsberechnung auch für die Flugzeugtypen, für welche keine originalen Emissionsfaktoren vorliegen und bei denen keine eindeutige Zuordnung möglich ist. Dafür wird der Wert des spezifischen Gewichtes  $x$  eines Flugzeugtyps eingesetzt um dessen jeweilige Schadstoffemission  $y$  zu ermitteln.



**Abb. 11: Beispiel Verbrauchsfunktion für Kraftstoff der Flugphasen Cruise und LTO für Jet-Flugzeuge**

### 3.4.3 Emissionsfunktionen für Drehflügler

Bis heute sind individuelle Emissionsdaten von Helikoptertriebwerken kaum öffentlich zugänglich und es gibt keine detaillierte Methode für die Berechnung von Helikopteremissionen. Das Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz (BAZL) hat deshalb eine eigene Berechnungsmethode für die Bestimmung der Emissionen von Helikoptern entwickelt.

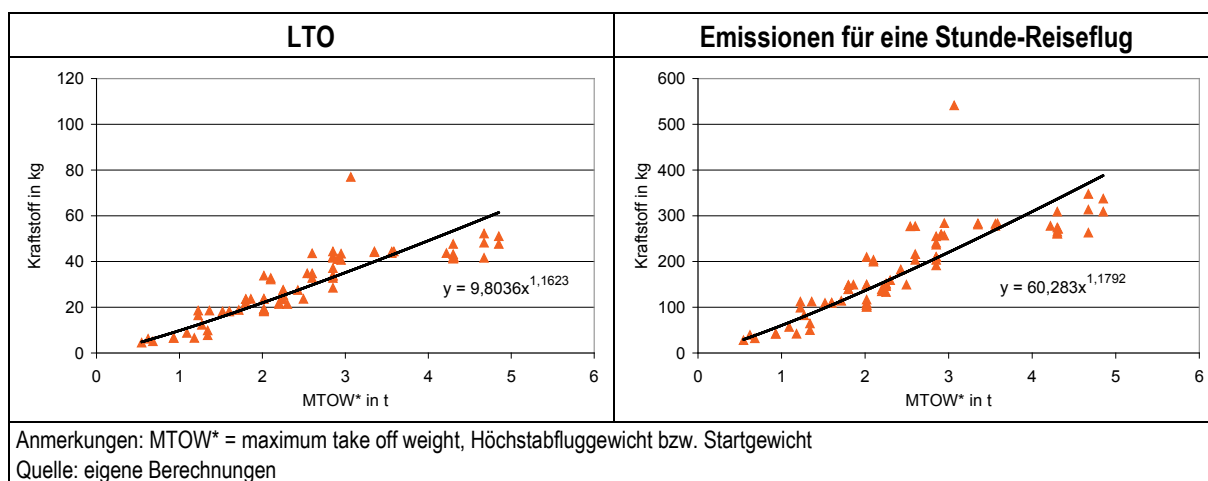
Als Grundlage für die Entwicklung der Methode dienten dem BAZL in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) durchgeführte Abgasmessungen an Helikoptertriebwerken, vertrauliche Herstellerdaten, Betriebshandbücher von Helikoptern und Flugversuche. In der „Guidance on the determination of helicopter emissions“ werden sämtliche Elemente der Methode und ihre Grundlagen näher beschrieben [FOCA 2009].

Mit Hilfe der vorhandenen BAZL-Emissionsdaten wird für die verschiedenen Schadstoffe ( $\text{NO}_x$ , HC, usw.) unter Berücksichtigung der Größenklasse („bis 5,7 t“ und „5,7 bis 14 t“) und Flugphasen (LTO und CCD) eine potenzielle Regressionsfunktion ( $y = a \cdot x^b$ ) aus den vorhandenen Emissionswerten bestimmt. In die berechneten Regressionsfunktionen für LTO und CCD wird für die Größenklasse „bis 5,7 t“ ein mittleres Gewicht von 2,5 t für  $x$  eingesetzt und so die EF für beide Flugphasen bestimmt. Analog wird bei der Größenklasse „5,7-14 t“ für  $x$  ein mittleres Gewicht von 11,5 t eingesetzt.

Da die Emissionsfaktoren (EF) pro Reiseflugstunde gelten, wird für alle festgelegten Distanzklassen anhand einer angenommen durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit (217 km/h für die Größenklasse „bis 5,7 t“, 252 km/h für die Größenklasse „5,7-14 t“) ein spezifischer Faktor für jede Distanzklasse ermittelt. Durch Multiplikation dieses Distanzklassen-Faktors mit dem Emissionsfaktor wird für die einzelnen Distanzklassen der spezifische Emissionsfaktor bestimmt.

Die EF der Drehflügler werden ermittelt für jede Komponente:

- jeweils für die Größenklasse „bis 5,7 t“ und „5,7 bis 14 t“,
- differenziert nach LTO und CCD und
- nach Distanzklassen.



**Abb. 12: Beispiel Emissionsfunktion für Kraftstoff pro Reiseflugstunde und LTO für Drehflügler der Größenklasse bis 5,7 t**

### 3.4.4 Emissionsfaktoren für Motorflugzeuge mit Kolbenmotor

Für alle in TREMOD-AV definierten Propellerflugzeuge mit Kolbenmotor werden die für das zweimotorige Hochleistungsflugzeug verwendeten Emissionsfaktoren übernommen (Tab. 9). Da die Emissionsfaktoren pro Reiseflugstunde gelten, wird für die festgelegten Distanzklassen mittels der angenommen durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit (443 km/h) ein spezifischer Faktor für jede Distanzklasse berechnet. Dieser spezifische Faktor wird mit dem EF multipliziert, um so den spezifischen EF für die einzelnen Distanzklassen zu ermitteln.

**Tab. 9: Treibstoffverbrauch und Emissionen für LTO und pro Reiseflugstunde von Flugzeugen mit Kolbenmotor(en)**

Phase	Typ	Fuel [kg]	HC [g]	CO [g]	NOx [g]	Ruß <sup>1)</sup> [g]	Blei [g]
LTO	Ultraleichtflugzeug	1,4	47	940	33	0,002	0
LTO	Einmotoriges Schulflugzeug (150PS)	3,2	47	2.397	28	0,17	2,5
LTO	Viersitzer mit Kolbenmotor (180PS)	3,9	71	3.930	12	0,2	3,1
LTO	Einmotoriges Hochleistungsflugzeug (300PS)	7,5	174	7.327	24	0,39	6
LTO	Zweimotoriges Hochleistungsflugzeug (2x325PS)	21,6	244	19.330	46	1,12	17,2
Phase	Typ	Fuel [kg/h]	HC [g/h]	CO [g/h]	NOx [g/h]	Ruß <sup>1)</sup> [g/h]	Blei [g/h]
CRUISE	Ultraleichtflugzeug	8,7	67	1.090	243	0,009	0
CRUISE	Einmotoriges Schulflugzeug (150PS)	20,9	243	8.557	772	1,09	16,6
CRUISE	Viersitzer mit Kolbenmotor (180PS)	23	197	6.743	903	1,2	18,3
CRUISE	Einmotoriges Hochleistungsflugzeug (300PS)	49,7	268	23.490	1149	2,58	39,5
CRUISE	Zweimotoriges Hochleistungsflugzeug (2x325PS)	106	766	60.088	1648	5,51	84,2

Anmerkungen: <sup>1)</sup> Rußemissionen sind abgeschätzt  
 Quelle: BAZL 2007

### 3.4.5 Übrige Emissionsfaktoren für Kerosin

Die ausgewerteten Datenbanken und -quellen liefern differenzierte Werte für den Kraftstoffverbrauch sowie die NO<sub>x</sub>-, HC- und CO-Emissionen. Das Öko-Institut hat kürzlich weitere Emissionsfaktoren für das Flugverkehrs-Inventartool abgeleitet [Öko-Institut 2009]. Als Grundlage dienten dabei die IPCC Emissionsfaktoren-Datenbank [IPCC 2006a], der IPCC-Bericht von 1999 „Aviation and the Global Atmosphere“ [IPCC 1999] sowie die Corinair Guidelines 2006 [Corinair 2006].

Da uns keine neuen Erkenntnisse vorliegen, werden die Emissionswerte aus dem Inventartool beibehalten und in TREMOD-AV übernommen. Es handelt sich um die folgenden Komponenten:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- Methan (CH<sub>4</sub>)
- Distickstoffoxid, Lachgas (N<sub>2</sub>O)
- Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
- Wasserdampf
- Ammoniak (NH<sub>3</sub>)
- Feinstaub (PM)

Details können im Bericht des Öko-Instituts nachgelesen werden.



**Tab. 10 Emissionsfaktoren für Kerosin, in [g/kg]**

Schadstoffe	national		international		Bemerkung zur Quelle bzw. Berechnung
	LTO	CCD	LTO	CCD	
CO <sub>2</sub>	3.150	3.150	3.150	3.150	IPCC- EF-Datenbank 2006
CH <sub>4</sub>	0,35	0	0,13	0	IPCC- EF-Datenbank 2006
N <sub>2</sub> O	0,12	0,1	0,09	0,1	IPCC- EF-Datenbank 2006
SO <sub>2</sub>	0,2 – 1,08	0,2 – 1,08	0,2 – 1,08	0,2 – 1,08	lineare zeitliche Abnahme angenommen
H <sub>2</sub> O	1.237	1.237	1.237	1.237	Corinair 2007
NM VOC	HC – CH <sub>4</sub>	HC – CH <sub>4</sub>	HC – CH <sub>4</sub>	HC – CH <sub>4</sub>	Differenz HC - CH <sub>4</sub>
NH <sub>3</sub>	0,172	0,172	0,172	0,172	NIR 2009
PM	0,08	0,2	0,09	0,2	Corinair 2007
Quelle: Öko-Institut 2009					

### 3.4.6 Übrige Emissionsfaktoren für Flugbenzin

In dieser Untersuchung wurden Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, HC und CO für benzinbetriebene Motorflugzeuge und Hubschrauber abgeleitet. Die übrigen Emissionsfaktoren werden wie bei Kerosin aus der aktuellen Untersuchung des Öko-Institut übernommen.

Tab. 11 zeigt zusammenfassend die verwendeten Emissionsfaktoren für Flugbenzin. Otto-kraftstoff wird im Flugverkehr ausschließlich für kleine Flugzeuge genutzt, die hauptsächlich im Inlandsverkehr eingesetzt werden. Die hier angegebenen Emissionsfaktoren werden in TREMOD-AV jedoch auch für internationale Flugbewegungen verwendet.

**Tab. 11: Emissionsfaktoren für Flugbenzin, in [g/kg]**

Schadstoff	EF	Bemerkung zur Quelle/Berechnung
CO <sub>2</sub>	3.070	IPCC Guidelines 2006 Table 3.6.4
CH <sub>4</sub>	0,36	EF Kerosin, LTO national 2008
N <sub>2</sub> O	0,1	EF Kerosin, Cruise, national 2008
SO <sub>2</sub>	0,02	Ein Zehntel des EF Kerosin, Cruise, national 2008
H <sub>2</sub> O	1.258	EF Kerosin, Cruise, national 2008
NM VOC	HC – CH <sub>4</sub>	Differenz HC - CH <sub>4</sub>
PM	1,2	Berechnet aus Bleigehalt von AvGas 100 LL
Blei	0,75	Berechnet aus dem max. Bleigehalt AvGas 100 LL
Quelle: Öko-Institut 2009		

## 4 Emissionsberechnung des Flugverkehrs mit TREMOD-AV

### 4.1 Zuordnung Distanzklassen

Die nach Flugzeugtypen differenzierten Energie- und Emissionsdaten des EMEP-EEA-Handbuchs liegen für LTO und CCD für bestimmte Flugdistanzen vor. Um sie für beliebige Flugentfernungen und konkret für die mittleren Flugentfernungen der Entfernungsklassen nach DESTATIS verwenden zu können, müssen sie entsprechend aufbereitet werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen (siehe Abbildung unten):

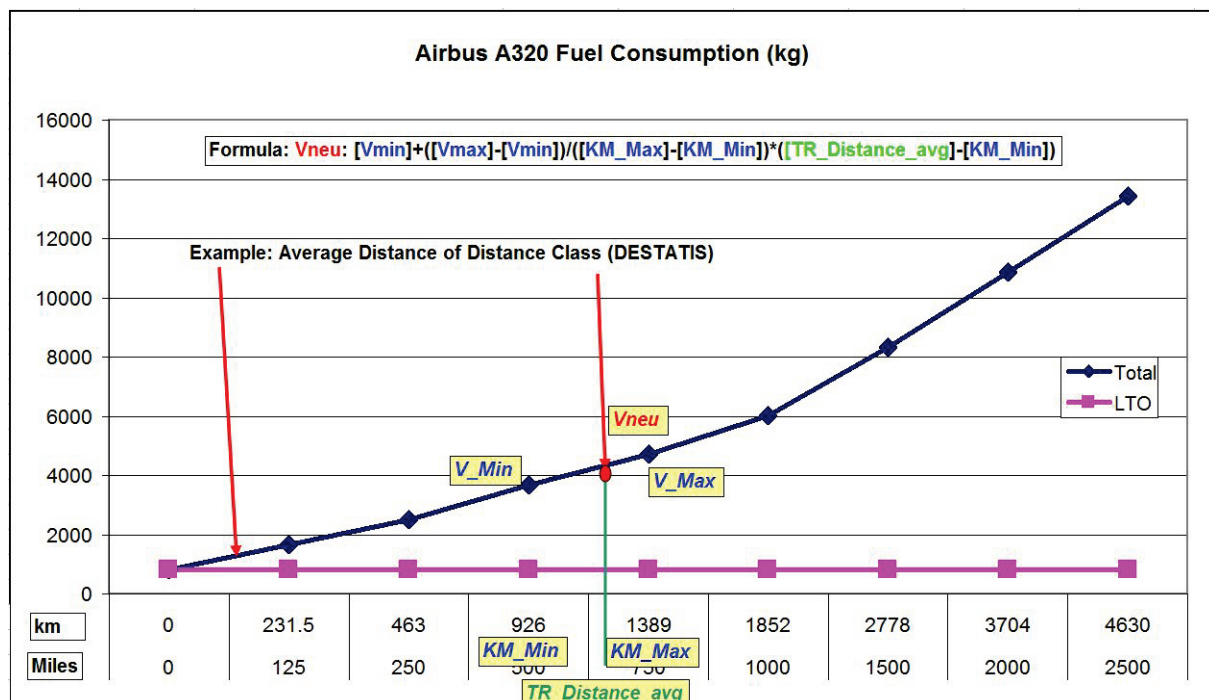
- Die Emissionsdaten werden als abschnittsweise definierte lineare Funktionen interpretiert. Die Emissionen lassen sich so für jede beliebige Fluglänge ( $TR_{Distance}$ ) für LTO und CCD aus der Funktion bestimmen.
- Jeder Funktionsabschnitt wird durch eine untere und obere Distanzklasse ( $EM_{Distance}$ )  $KM_{Min}$  und  $KM_{Max}$  sowie die zugehörigen Emissionswerte ( $V_{min}$  und  $V_{max}$ ) definiert.
- Die Distanzklassen ( $TR_{Distance}$ ) der Verkehrsdaten aus DESTATIS sind durch ihre mittlere Entfernung definiert ( $TR_{Distance_{avg}}$ ). Für diese mittlere Entfernung wird der entsprechende Abschnitt der Funktion gesucht, für den gilt:

$$KM_{Min} < TR_{Distance_{avg}} < KM_{Max}$$

- Emissionen bzw. Kraftstoffverbrauch ( $V_{neu}$ ) werden für jede Distanzklasse ( $TR_{Distance}$ ) nach der Formel

$$V_{neu} = [V_{min}] + \frac{[V_{max}] - [V_{min}]}{[KM_{Max}] - [KM_{Min}]} * ([TR_{Distance_{avg}}] - [KM_{Min}])$$

berechnet.



**Abb. 13: Bestimmung der Emissionen für jede DESTATIS Distanzklasse aus [EMEP-EEA 2009]**

## 4.2 Berücksichtigung der tatsächlichen Flugstrecke

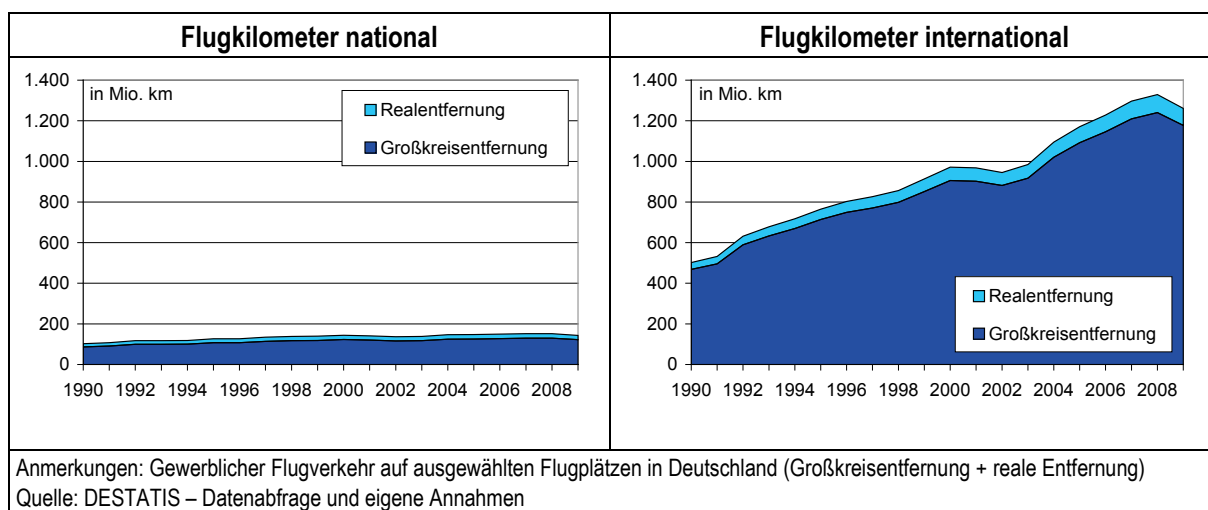
Die Distanzklassen und damit die Verkehrsleistungen von DESTATIS beziehen sich auf die Großkreisentfernung. Bei der Emissionsberechnung soll die real geflogene Entfernung berücksichtigt werden. Ein Ansatz zur Bestimmung der realen Flugstrecke wurde vom Öko-Institut aufgrund verschiedener Quellen abgeleitet. Er wird aktuell z.B. in EcoTransIT World [EcoTransIT 2010] verwendet und wird auch in TREMOD-AV übernommen. Die Analyse der verschiedenen Quellen kommt zu folgendem Ergebnis:

Der mittlere Umweg von realen Flügen gegenüber der Großkreisentfernung beträgt mindestens 60 km, ab 100 Meilen (185,2 km) ist die reale Flugentfernung für jede zusätzliche Meile um 4 % höher als die Großkreisentfernung. Die folgende Tabelle zeigt die verwendeten Berechnungsformeln.

**Tab. 12: Berechnung der tatsächlichen Flugstrecke in Abhängigkeit der Großkreisentfernung**

$\text{Reale Flugentfernung (GCD > 185,2 km)} = (\text{GCD} - 185,2 \text{ km}) \times 1,04 + 185,2 \text{ km} + 60 \text{ km}$ $\text{Reale Flugentfernung (GCD \leq 185,2 km)} = \text{GCD} + 60 \text{ km}$
GCD = Great Circle Distance (Großkreisentfernung) Quelle: EcoTransIT 2010

Durch die Berücksichtigung der tatsächlich geflogenen Strecken erhöhen sich die Flugkilometer im nationalen Verkehr um 17 bis 19 %, im internationalen Verkehr um ca. 7 % gegenüber den Angaben in der Flugverkehrsstatistik von DESTATIS (siehe folgende Abbildung).



**Abb. 14 Entwicklung der Flugkilometer - Großkreisentfernung und real geflogene Entfernung**

### **4.3 Berechnung und Aufbereitung der Ergebnisse**

Kraftstoffverbrauch und Emissionen des Flugverkehrs werden berechnet, indem die Verkehrsleistungen (Kapitel 2.2) unter Berücksichtigung der realen Flugentfernung (Kapitel 4.2) mit den spezifischen Emissionswerten und -funktionen (Kapitel 3) gemäß der Zuordnungsregel für die Distanzklassen (Kapitel 4.1) miteinander verknüpft werden. Für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen erhält man so für jedes Bezugsjahr nach Flugphasen, Flugzeugtypen und Distanzklassen differenzierte Ergebnisse.

Für den gewerblichen Verkehr auf sonstigen Flugplätzen und den nicht-gewerblichen Flugverkehr liegen nur wenige Angaben zur Verkehrsleistung vor (siehe Kapitel 2.3). Zur Überprüfung der Relevanz dieser Verkehre für die Emissionen werden daher plausible Annahmen für die Berechnung getroffen (siehe Kapitel 4.3.1).

Zur Kontrolle der Ergebnisse wird zunächst der berechnete Kraftstoffverbrauch herangezogen. Dieser wird dem statistisch ermittelten Kraftstoffabsatz aus der Energiebilanz gegenübergestellt, der außerdem die relevante Kenngröße für die Berichterstattung im nationalen Inventarbericht ist. Dies hat zur Folge, dass die Emissionen, die mit TREMOD-AV berechnet werden, für die Berichterstattung ebenfalls auf den Kraftstoffabsatz abgestimmt werden müssen.

#### **4.3.1 Kraftstoffverbrauch des Flugverkehrs**

##### **Kraftstoffabsatz**

Der Kraftstoffabsatz für den Flugverkehr wird in der Energiebilanz der AG Energiebilanzen (AGEB) dokumentiert. Da die endgültige Energiebilanz in der Vergangenheit erst nach dem Stichtag für die Emissionsberichterstattung vorlag, werden für die aktuellen Jahre die in die Energiebilanzen einfließenden, aber deutlich früher verfügbaren Kennzahlen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verwendet.

Für die Berichterstattung des Emissionsinventars maßgeblich ist die Energiebilanz in der Einheit Terajoule. Da die aktuellen Absatzzahlen des BAFA immer in Tonnen angegeben werden, erfolgt eine Umrechnung der Werte in Terajoule mit den aktuell gültigen Heizwerten.

Die nachfolgende Tabelle fasst die aktuell für den Flugverkehr verwendeten Absatzzahlen zusammen.

**Tab. 13: Absatz an Flugkraftstoffen in Deutschland 1990-2009**

	Kerosin			Flugbenzin		
	Verbrauch kt	Heizwert TJ MJ/kg		Verbrauch kt	Heizwert TJ MJ/kg	
1990	4528	193329	42,696	56	2438	43,543
1991	4440	189610	42,705	55	2395	43,543
1992	4786	204386	42,705	39	1698	43,543
1993	5036	216548	43,000	28	1219	43,543
1994	5236	225148	43,000	27	1175	43,543
1995	5429	233437	43,000	26	1142	43,543
1996	5689	244610	43,000	22	946	43,543
1997	5903	253849	43,000	27	1162	43,543
1998	6074	261185	43,000	24	1029	43,543
1999	6517	280244	43,000	25	1110	43,543
2000	6913	297258	43,000	26	1120	43,543
2001	6739	289768	43,000	23	984	43,543
2002	6684	287394	43,000	19	823	43,543
2003	6787	291827	43,000	18	766	43,543
2004	7388	316211	42,800	15	659	43,543
2005	8033	343827	42,800	16	698	43,543
2006	8440	361233	42,800	15	653	43,543
2007	8748	374428	42,800	14	611	43,543
2008	8840	378346	42,800	15	638	43,543
2009	8580	367234	42,800	14	595	43,543

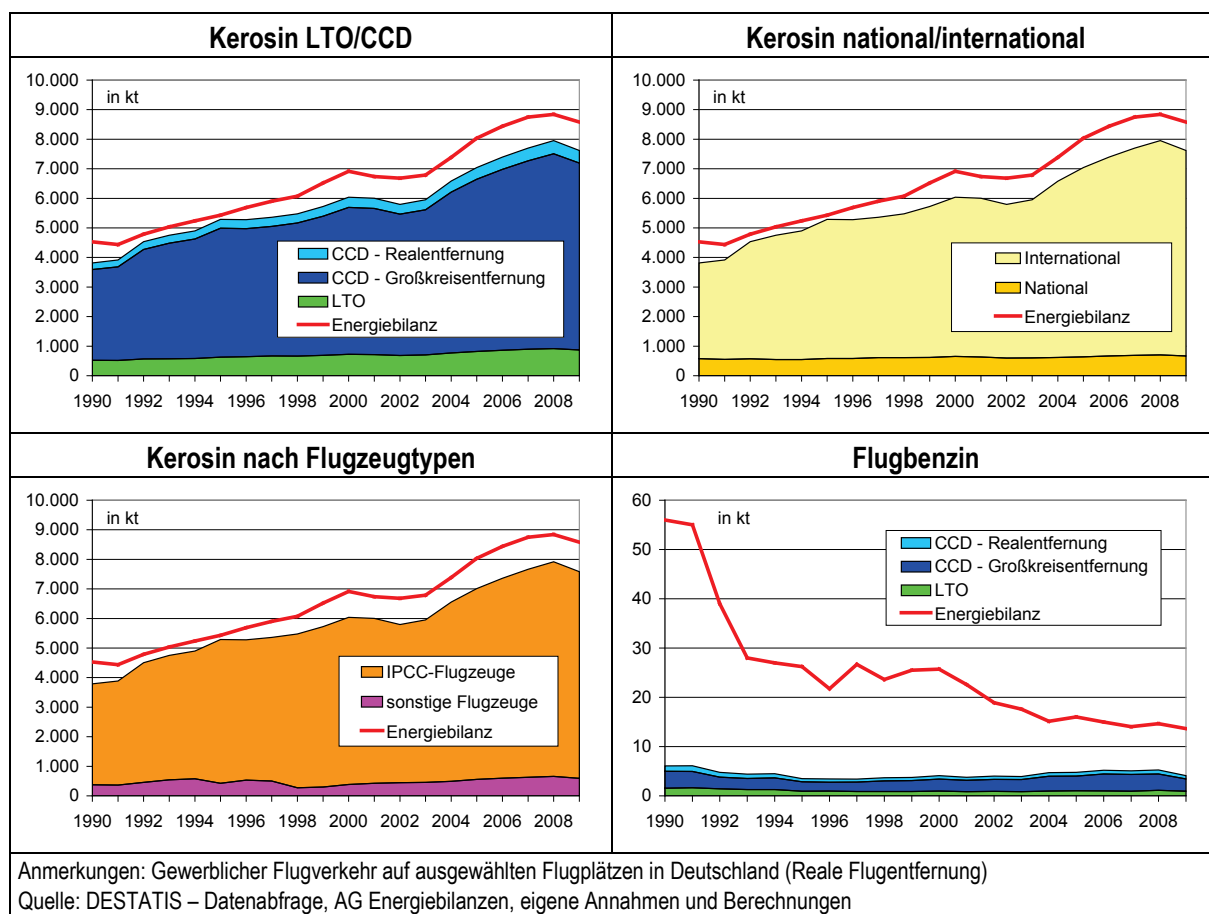
Quellen: AG Energiebilanzen (bis 2007); 2008 und 2009: BAFA, Dezember 2008/2009, Tabelle 7j  
Kerosin 2007 korrigiert auf BAFA

### Gewerblicher Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen

Der mit TREMOD-AV berechnete Kraftstoffverbrauch für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen ist in Abb. 15 in der Zeitreihe 1990-2009 nach verschiedenen Kriterien differenziert aufgeführt. Zusätzlich ist der Kraftstoffabsatz nach Energiebilanz zum Vergleich dargestellt.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Der gewerbliche Verkehr auf ausgewählten Flugplätzen verbrauchte in der Zeitreihe 1990-2009 den überwiegenden Anteil des getankten Kerosins und einen geringeren Anteil des Flugbenzins.
- Der größte Anteil am Energieumsatz erfolgt im Reiseflug (CCD). Das Verhältnis zwischen LTO und Reiseflug liegt im internationalen Verkehr bei etwa 1:10. Beim nationalen Verkehr liegt das Verhältnis erwartungsgemäß niedriger, nämlich zwischen 1:1,7 (1990) und 1:2 (2009).
- Der Energieumsatz für die real geflogene Entfernung inklusive LTO liegt gegenüber der Großkreisentfernung um ca. 5,5 % im internationalen und um 11 % im nationalen Flugverkehr höher.
- Dennoch besteht beim Kerosin eine Differenz zum Kraftstoffabsatz, die zwischen 3 % und 16 % und im Mittel über die Jahre 1990 bis 2009 bei 10 % liegt.
- Der Flugbenzinverbrauch gemäß der Energiebilanz liegt erheblich über dem berechneten Absatz, mit deutlich abnehmender Tendenz.



**Abb. 15 Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs des gewerblichen Flugverkehrs auf ausgewählten Flugplätzen 1990-2009**

### Gewerblicher Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen

Der Kraftstoffverbrauch des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen wird anhand der statistisch nachgewiesenen Starts nach Startgewichtsklassen abgeschätzt. Dazu wird für jede Startgewichtsklasse ein mittlerer Treibstoffverbrauch für LTO und Reiseflug anhand der vorhandenen Verbrauchskennzahlen der relevanten Flugzeugtypen angenommen. Basis sind die Mittelwerte der Flugzeugtypen je Startgewichtsklasse im gewerblichen Verkehr auf den ausgewählten Flugplätzen. Damit wird unterstellt, dass die Typenzusammensetzung je Startgewichtsklasse sowie die durchschnittlichen Distanzen auf den sonstigen Flugplätzen denen auf den ausgewählten Flugplätzen entsprechen.

In der Realität ist davon auszugehen, dass die Typzusammensetzung abweicht und dass die mittleren Distanzen auf den sonstigen Flugplätzen eher geringer sind als auf den ausgewählten Flugplätzen. Außerdem treten bei den sonstigen Flugplätzen aufgrund statistischer Änderungen Schwankungen in Anzahl und Eigenschaft der Flüge auf. Ein Beispiel ist hier die Aufnahme des Flughafens Frankfurt-Hahn in die Kategorie der ausgewählten Flugplätze im Jahr 2004 mit überwiegend internationalen Flügen auf europäischen Relationen. Hier wird deutlich, dass eine eindeutige Kategorisierung der gewerblichen Flüge auf sonstigen Flugplätzen hinsichtlich der Einordnung in nationale und internationale Flüge derzeit nicht möglich ist.

Kleine Flugzeuge bis zum Startgewicht von 5,7 Tonnen sind in der Regel Propellermaschinen, die mit Flugbenzin angetrieben werden. Bei Maschinen über 14 Tonnen handelt es sich fast ausschließlich um Turbopropeller- oder Düsenflugzeuge, die mit Kerosin betrieben werden. Lediglich in der Startgewichtsklasse 5,7-14 t kommen mehrere Antriebsarten zum Einsatz. Im Jahr 2009 fanden im gewerblichen Verkehr der ausgewählten Flugplätze 63 % der Starts mit Flugbenzin-betriebenen Flugzeugen statt und entsprechend 37 % mit Kerosin. Diese Annahmen werden ebenfalls für die Schätzung des Kraftstoffverbrauchs auf den sonstigen Flugplätzen übernommen.

Auf dieser Basis wurde der Kraftstoffverbrauch des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen für verschiedene Bezugsjahre berechnet. Die Ergebnisse der Berechnung sind beispielhaft für das Jahr 2009 in der Tab. 14 und Abb. 16 dargestellt.

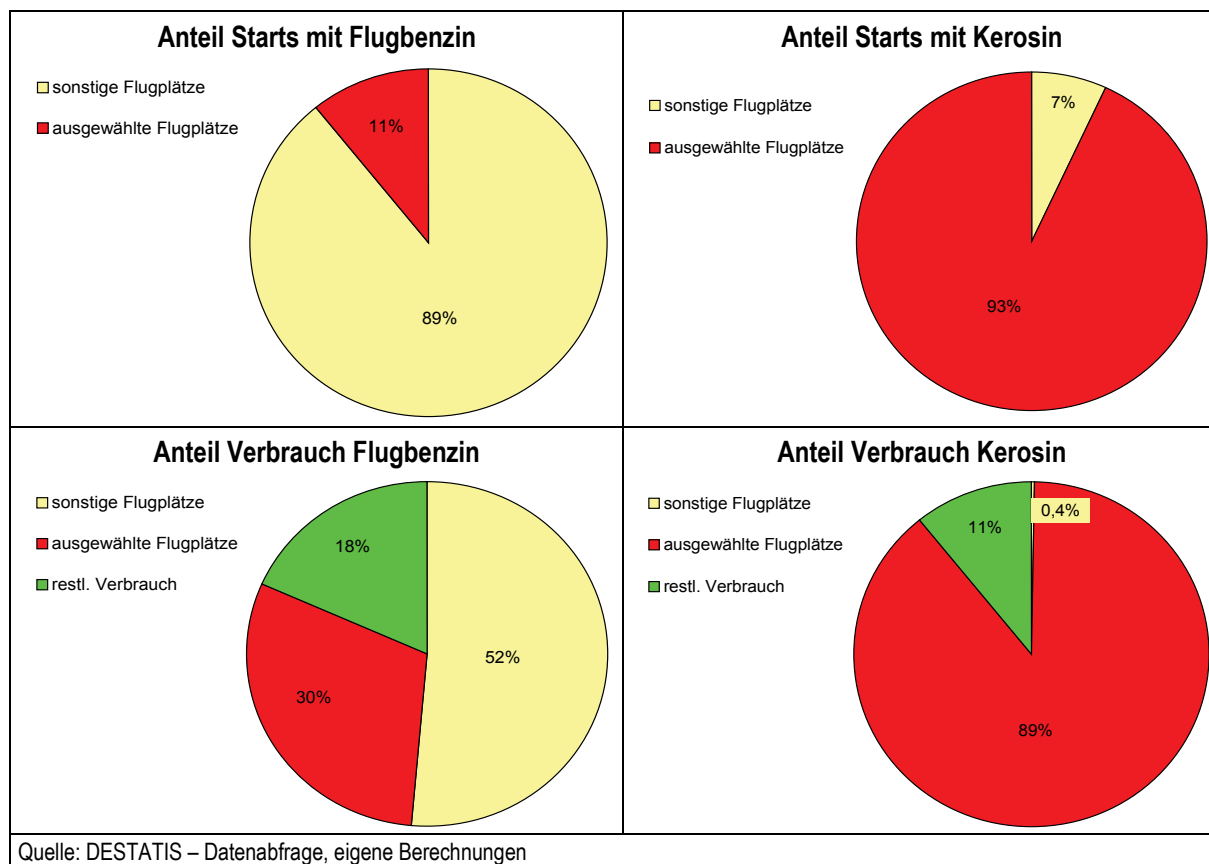
Als wichtige Ergebnisse der Schätzung lässt sich festhalten:

- Der Anteil des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen ist gering. Nach unseren Schätzungen wurden im Jahr 1990 lediglich 0,4 % des gesamten Kerosins durch Starts auf sonstigen Flugplätzen verbraucht.
- Bis zum Jahr 2002 steigt der Anteil der sonstigen Flugplätze am Kerosinverbrauch auf ca. 3 %. Dieser Anteil sinkt in den Folgejahren aufgrund der Aufnahme verschiedener verkehrsstarker Flughäfen in die Gruppe der ausgewählten Flughäfen.
- Im Jahr 2009 liegt der Anteil wieder bei 0,4 % bei einem Anteil an den Starts von 7 %.
- Aufgrund der getroffenen Annahmen, insbesondere die Gleichsetzung der mittleren Distanzen mit denen der ausgewählten Flugplätze, stellen die ermittelten Kraftstoffverbrauchswerte eher eine Überschätzung dar.
- Die Aufteilung des gewerblichen Flugverkehrs auf den sonstigen Flugplätzen in nationalen und internationalen Verkehr ist ohne detaillierte Auswertung von Einzelstatistiken der Flughäfen nicht zu bestimmen und in verschiedenen Bezugsjahren aufgrund der statistischen Änderungen sehr unterschiedlich.
- Im Unterschied zu Kerosin lassen sich beim Flugbenzin große Mengen des Kraftstoffabsatzes dem gewerblichen Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen zuordnen.

**Tab. 14 Kraftstoffverbrauch des gewerblicher Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen im Vergleich zum Gesamtverbrauch im Jahr 2009**

Location	Größenklasse	Anzahl Starts	LTO-Verbrauch in kg/Start	CCD-Verbrauch	Kraftstoffverbrauch in t
<b>Flugbenzin</b>					
sonstige Flugplätze	bis 2t	298.369	3,2	10,1	3.962
sonstige Flugplätze	2-5,7t	50.813	21,6	27,7	2.503
sonstige Flugplätze	5,7-14t	5.809	21,6	72,4	546
sonstige Flugplätze	Luftschiffe	264	21,6	55,3	20
sonstige Flugplätze	Gesamt	355.255			7.031
ausgewählte Flugplätze	Gesamt	43.742	21,6	72,4	4.111
Differenz zur Energiebilanz					2.514
<b>Insgesamt</b>		<b>398.997</b>			<b>13.656</b>
<b>Kerosin</b>					
sonstige Flugplätze	5,7-14t	3.486	113,8	390,8	1.759
sonstige Flugplätze	14-20t	2.102	140,6	531,4	1.413
sonstige Flugplätze	> 20t	3.354	721,3	2761,8	11.682
sonstige Flugplätze	Hubschrauber	64.246	28,4	189,5	14.000
sonstige Flugplätze	Gesamt	73.188	1.004	3.874	28.854
ausgewählte Flugplätze	Gesamt	998.378			7.618.877
Differenz zur Energiebilanz					932.514
<b>Insgesamt</b>		<b>1.071.566</b>			<b>8.580.245</b>

Quelle: DESTATIS – Datenabfrage, eigene Berechnungen

**Abb. 16: Anteile des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen im Vergleich am Gesamtverbrauch im Jahr 2009**



## Nichtgewerblicher Flugverkehr

Beim nichtgewerblichen Flugverkehr haben die kleinen, mit Benzin betriebenen Propellerflugzeuge den höchsten Anteil, gefolgt von den Hubschraubern. Nach unseren Schätzungen könnten somit - wenn man gleiche Distanzen unterstellt wie im gewerblichen Flugverkehr - im Jahr 2009 bis zu 15 kt Flugbenzin und bis zu 30 kt Kerosin im nicht-gewerblichen Flugverkehr verbraucht worden sein. In der Realität dürften diese Mengen jedoch geringer ausfallen. Dies wird auch darin sichtbar, dass der Flugbenzinverbrauch gemäß Energiebilanz im Jahr 2009 insgesamt nur bei 14 kt lag. Die mit den pauschalen Annahmen berechnete Menge an Flugbenzin übersteigt also den tatsächlichen Kraftstoffabsatz, wobei nicht klar ist, in welcher Menge normaler Otto-Kraftstoff für Flüge getankt wurde. Dies gilt für nahezu alle Jahre; lediglich vor 1994 übersteigt der dokumentierte Absatz in der Energiebilanz den berechneten Verbrauch.

## Bewertung der Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der überwiegende Anteil des Verbrauchs an **Kerosin** aus dem gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen stammt. Der Anteil des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen sowie des nicht gewerblichen Flugverkehrs liegt zu Beginn und am Ende des betrachteten Zeitraums (1990, 2009) bei weniger als einem Prozent und der maximale Anteil, im Jahr 2002, bei rund drei Prozent. Diese geringen Anteile sind wahrscheinlich aufgrund der getroffenen Annahmen (je Startgewichtsklasse gleiche Typzusammensetzung und mittlere Distanzen wie auf den ausgewählten Flugplätzen) eher eine Überschätzung des tatsächlichen Verbrauchs. Aus diesem Grund wird auf eine gesonderte Berechnung der Emissionen dieser beiden Sektoren in TREMOD-AV verzichtet.

**Flugbenzin** wird dagegen überwiegend auf sonstigen Flugplätzen und im nicht-gewerblichen Flugverkehr eingesetzt. Die abgesetzte Kraftstoffmenge lässt sich nicht konsistent unter Einbeziehung des nicht gewerblichen Flugverkehrs und der sonstigen Flughäfen berechnen. Nach den Ergebnissen der Berechnungen liegt der Verbrauch nach unseren Schätzungen sogar eher höher als der Absatz. Hier könnte zum Tragen kommen, dass für den Flugverkehr mit Kleinflugzeugen z.T. auch normaler Otto-Kraftstoff verwendet wird.

Ein wesentlich größerer Posten ist die **Differenz der Berechnungsergebnisse zur Energiebilanz**. Mögliche Ursachen für die Abweichung zur Energiebilanz sind vor allem die folgenden:

- Die tatsächlich geflogene Entfernung ist höher als angenommen.
- Es wird im Durchschnitt mehr getankt als für die abgehenden Strecken, d.h. für die vollständigen Start-Landezyklen, benötigt wird. Dies könnte im Wesentlichen dann eine Ursache sein, wenn Kraftstoff in Deutschland tendenziell preiswerter ist als in Quell- und Zielgebieten. Ansonsten ist davon auszugehen, dass sich die Übertankung zwischen den Flughäfen im Mittel ausgleicht.
- Es finden relevante außerplanmäßige Verbräuche statt, etwa durch Warteschleifen oder durch das Ablassen von Treibstoff.
- Die verwendeten Verbrauchswerte für die Flugzyklen LTO und CCD sind zu niedrig, etwa aufgrund zu günstig angenommener Flugzyklen oder Beladungsgrade.
- Zum Jahreswechsel befinden sich von Jahr zu Jahr unterschiedliche Kraftstoffmengen im Lagerbestand der Flughäfen, so dass Kraftstoffabsatz und Verbrauch

nicht ins gleiche Jahr fallen. Dieser Punkt würde sich aber über die Jahre ausgleichen.

Im Rahmen dieses Vorhabens konnten die möglichen Einflussfaktoren nicht weiter quantifiziert werden. Allerdings gibt es Anhaltspunkte, dass die verwendeten spezifischen Verbrauchswerte zu niedrig sein könnten. So sind etwa die Verbrauchsangaben der DLR für vergleichbare Flugzeugtypen teilweise höher (siehe Anhang, Kapitel 7.3, Tab. 24).

#### **4.3.2 Aufbereitung der Ergebnisse für die Emissionsberichterstattung**

Für die Berichterstattung im Rahmen des nationalen Emissionsinventars müssen die mit TREMOD-AV berechneten Ergebnisse an den Kraftstoffabsatz nach der Energiebilanz angepasst werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

1. Maßgeblich für die Berichterstattung ist der Kraftstoffabsatz von Kerosin und Flugbenzin entsprechend der Energiebilanz.
2. Der Jahresverbrauch Kerosin aus der Energiebilanz wird auf den nationalen und internationalen Verkehr entsprechend dem im folgenden Abschnitt vorgestellten Vorgehen aufgeteilt.
3. Der mit TREMOD-AV berechnete Kraftstoffverbrauch im LTO-Zyklus wird für alle nationalen und internationalen Starts unverändert übernommen.
4. Die Differenz zwischen dem Kraftstoffabsatz nach Energiebilanz und dem Kraftstoffverbrauch im LTO-Zyklus wird als Kraftstoffverbrauch für den Reiseflug (CCD) angenommen.
5. Die Kraftstoff-bezogenen Emissionsfaktoren werden für die Bereiche national und international und weiter differenziert für LTO und CCD berechnet aus dem Quotienten der berechneten Emissionen der jeweiligen Kategorie und dem zugehörigen Kraftstoffverbrauch. Grundlage sind die Ergebnisse für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen.
6. Für Flugbenzin wird der Absatz nach Energiebilanz dem nationalen Flugverkehr zugeordnet.
7. Die Kraftstoff-bezogenen Emissionsfaktoren für Flugbenzin werden aus den berechneten Gesamtemissionen für alle erfassten Flüge des gewerblichen Flugverkehrs auf ausgewählten Flugplätzen und dem entsprechenden gesamten Flugbenzinverbrauch zurückgerechnet.

#### **Aufteilung nationaler und internationaler Flugverkehr**

Eine wichtige Kenngröße für die Berichterstattung ist die Aufteilung des Kerosinverbrauchs auf den nationalen und internationalen Verkehr. Hierbei wurde in der Vergangenheit angenommen, dass der Anteil des nationalen Flugverkehrs am Kraftstoffverbrauch des Flugverkehrs im Jahr 1990 bei 20 % lag. Ab dem Jahr 2003 liegen Angaben von Eurocontrol [Eurocontrol 2010] vor.

Bisher wurden im nationalen Inventarbericht die genannte Annahme für 1990 und die Angaben von Eurocontrol seit 2003 verwendet. Die Jahre zwischen 1990 und 2003 wurden linear interpoliert [Öko-Institut 2009].

Im Rahmen der Neuberechnung für TREMOD-AV konnte nun der Kraftstoffverbrauch für den nationalen und internationalen Flugverkehr auf Basis der detaillierten Verkehrsleis-

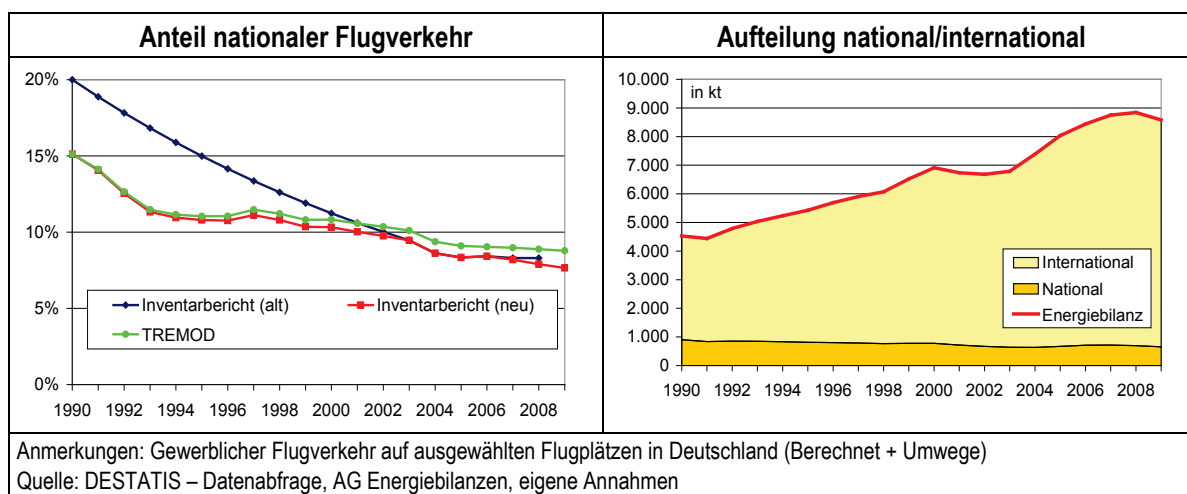
tungs- und Verbrauchsdaten berechnet werden. Danach lag der Anteil des nationalen Flugverkehrs am Kerosinverbrauch im Jahr 1990 bei 15 % und ging dann innerhalb weniger Jahre auf unter 11 % im Jahr 1994 zurück. In der Folge blieb er einige Jahre auf etwa gleichem Niveau. Seit 1998 geht der Anteil des nationalen Flugverkehrs weiter zurück (siehe Abb. 17).

Ab 2003 liegen von Eurocontrol Angaben zum Anteil des nationalen Flugverkehrs vor. Die Eurocontrol-Werte liegen etwas niedriger als die mit TREMOD-AV berechneten Werte, die Differenzen sind aber angesichts der vorhandenen Unsicherheiten der Modellierung akzeptabel.

Die Anteilswerte für die Emissionsberichterstattung werden daher wie folgt festgelegt:

- Für das Jahr 1990 wird ab dem Inventarbericht 2010 der neue mit TREMOD-AV berechnete Anteilswert verwendet.
- Wegen der internationalen Vergleichbarkeit werden ab 2003 die Eurocontrol-Werte übernommen.
- Die Entwicklung zwischen 1990 und 2003 orientiert sich an den TREMOD-Werten. Dabei wird die Differenz zwischen den TREMOD-Ergebnissen und dem neu festgelegten Verlauf von Jahr zu Jahr linear so vergrößert, dass der neue Wert im Jahr 2003 genau die Vorgabe von Eurocontrol trifft.

Die bisherigen und aktuellen Anteilswerte sind in Abb. 17 links dargestellt. Die gleiche Abbildung rechts zeigt den resultierenden Kraftstoffverbrauch im nationalen Inventarbericht.



**Abb. 17 Aufteilung des Kerosinverbrauchs in nationalen und internationalen Verkehr für den nationalen Inventarbericht**

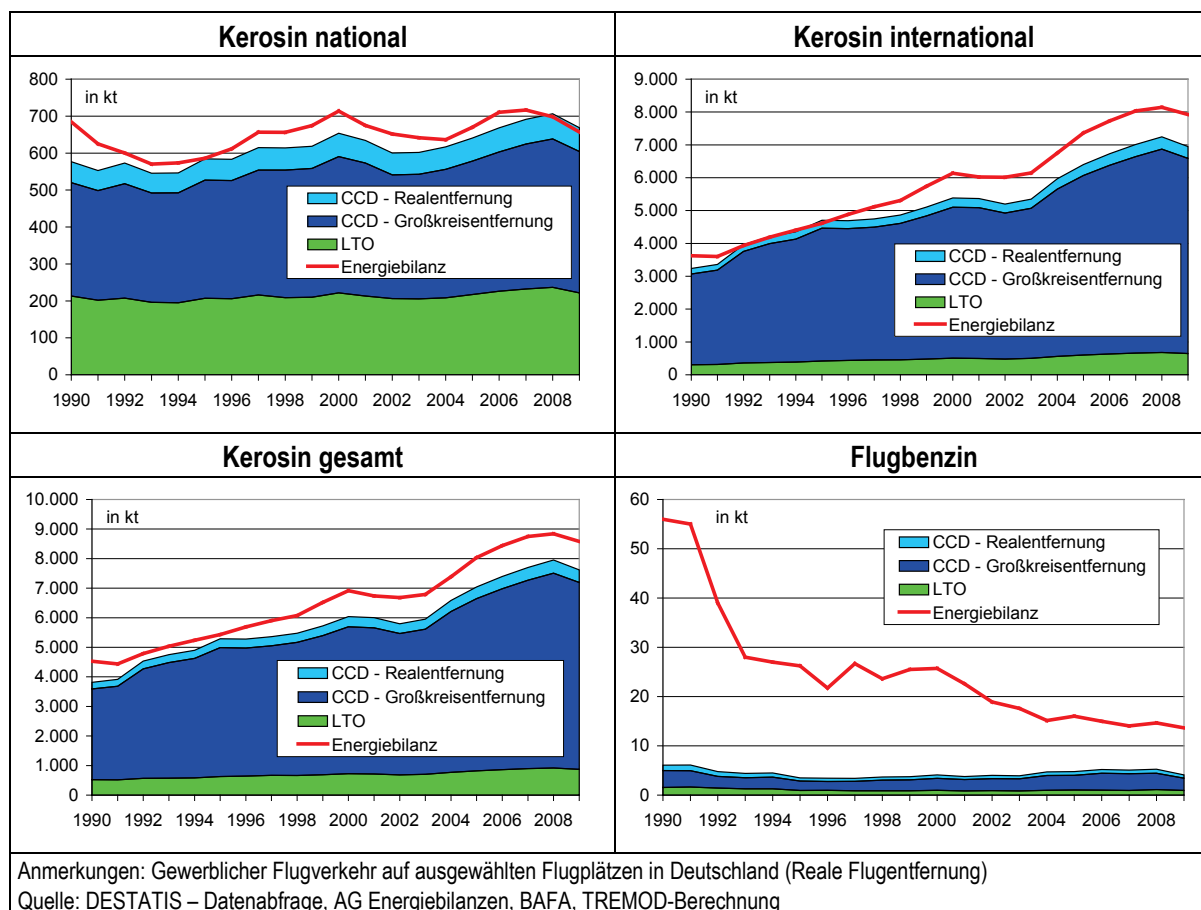
Die folgenden Abbildungen zeigen noch einmal zusammenfassend die Verläufe für den Kraftstoffverbrauch 1990-2009 für den nationalen und internationalen Flugverkehr nach TREMOD-AV, der sich aus dem LTO, dem CCD-Großkreis und dem CCD real zusammensetzt. Für die Emissionsinventare werden der Gesamtwert aus der Energiebilanz und der LTO-Verbrauch gemäß TREMOD-AV verwendet.

Wichtige Ergebnisse der Auswertungen sind folgende:

- Der Abstand zwischen berechneten Werten und der Energiebilanz fällt in der Mitte der neunziger Jahre am geringsten aus.
- Bei der Aufteilung auf nationalen und internationalen Verkehr nach Eurocontrol fällt auf, dass der berechnete Verbrauch für den nationalen Verkehr 2007 und 2008

über den Angaben von Eurocontrol liegt. Mögliche Ursachen sind: höhere Verbrauchswerte in TREMOD-AV gegenüber Eurocontrol oder nicht bekannte Abgrenzungsdifferenzen zwischen TREMOD-AV und Eurocontrol. Beides konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden.

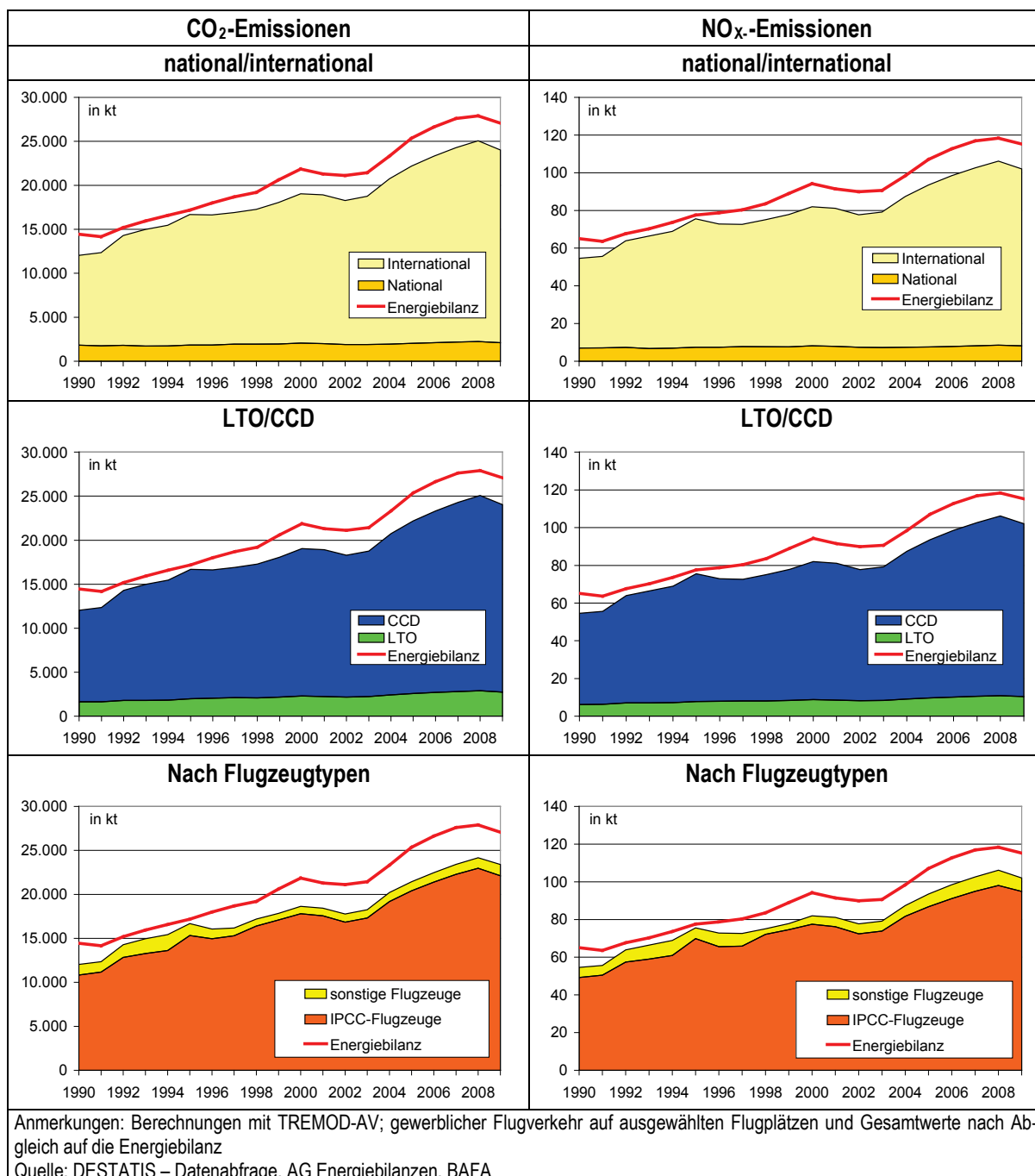
- Anfang der neunziger Jahre wurden bei Kerosin und insbesondere Flugbenzin sehr hohe Absatzmengen bilanziert, die sich durch die erfassten Flugaktivitäten nicht erklären lassen.



**Abb. 18 Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs des gewerblichen Flugverkehrs auf ausgewählten Flugplätzen 1990-2009 - berechnete Ergebnisse und Energiebilanz**

### 4.3.3 Ergebnisse für ausgewählte Emissionskomponenten

Die übrigen Emissionskomponenten werden analog zum Kraftstoffverbrauch mit TREMOD-AV berechnet. In der folgenden Abbildung sind beispielhaft die Emissionsverläufe der TREMOD-Berechnungen für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> dargestellt. Zum Vergleich gibt die rote Linie den Verlauf der gesamten Emissionen nach Abgleich auf die Energiebilanz an.



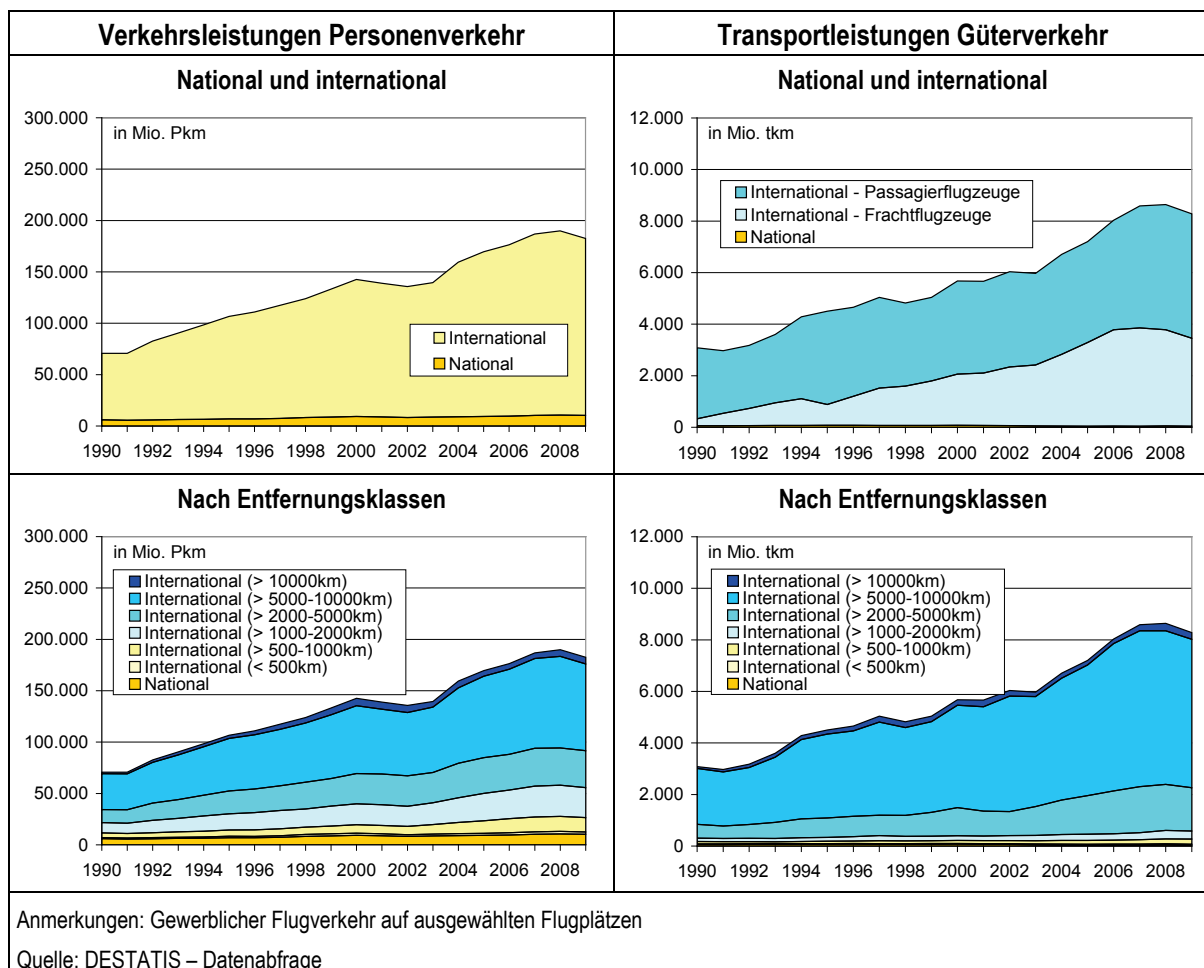
**Abb. 19: Entwicklung der CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen**

#### 4.3.4 Differenzierung in Personen- und Güterverkehr

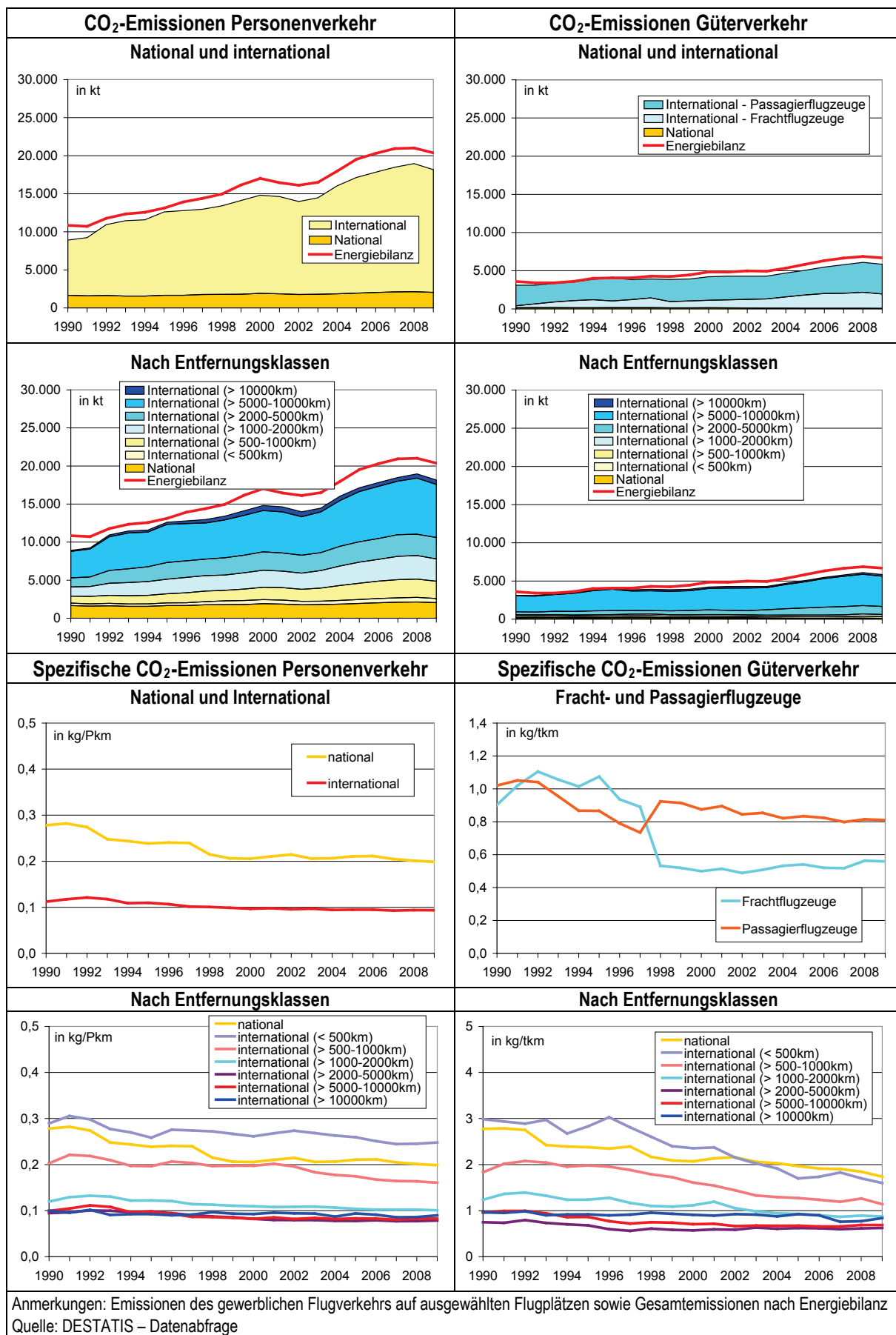
In TREMOD-AV werden Kraftstoffverbrauch und Emissionen dem Personen- und Güterverkehr zugeordnet. Da Passagierflugzeuge häufig Beifracht mitnehmen, muss eine Vorschrift für die Zuordnung der Emissionen auf Personen- und Güterverkehr definiert werden. Wir verwenden die gleiche Zuordnungsmethodik wie das Öko-Institut in [EcoTRansIT 2010] nach der Monitoring-Richtlinie 2009/339/EC [EU 2009]. Diese Methode wird auch von der Deutschen Lufthansa seit 2007 verwendet [LH 2010].

Die Aufteilung erfolgt über die transportierte Masse. Hierbei wird eine Person mit Gepäck mit 100 kg angesetzt. Bisher wurde in TREMOD-AV dem Personenverkehr ein höherer Anteil zugeordnet, indem die Infrastruktur für den Personentransport (Sitze u.a.) mit einem Faktor von 1,7 zusätzlich einbezogen wurde. Mit der neuen Methode entfällt nun auf den Gütertransport, der als Beifracht transportiert wird, ein höherer Anteil der Emissionen als bisher.

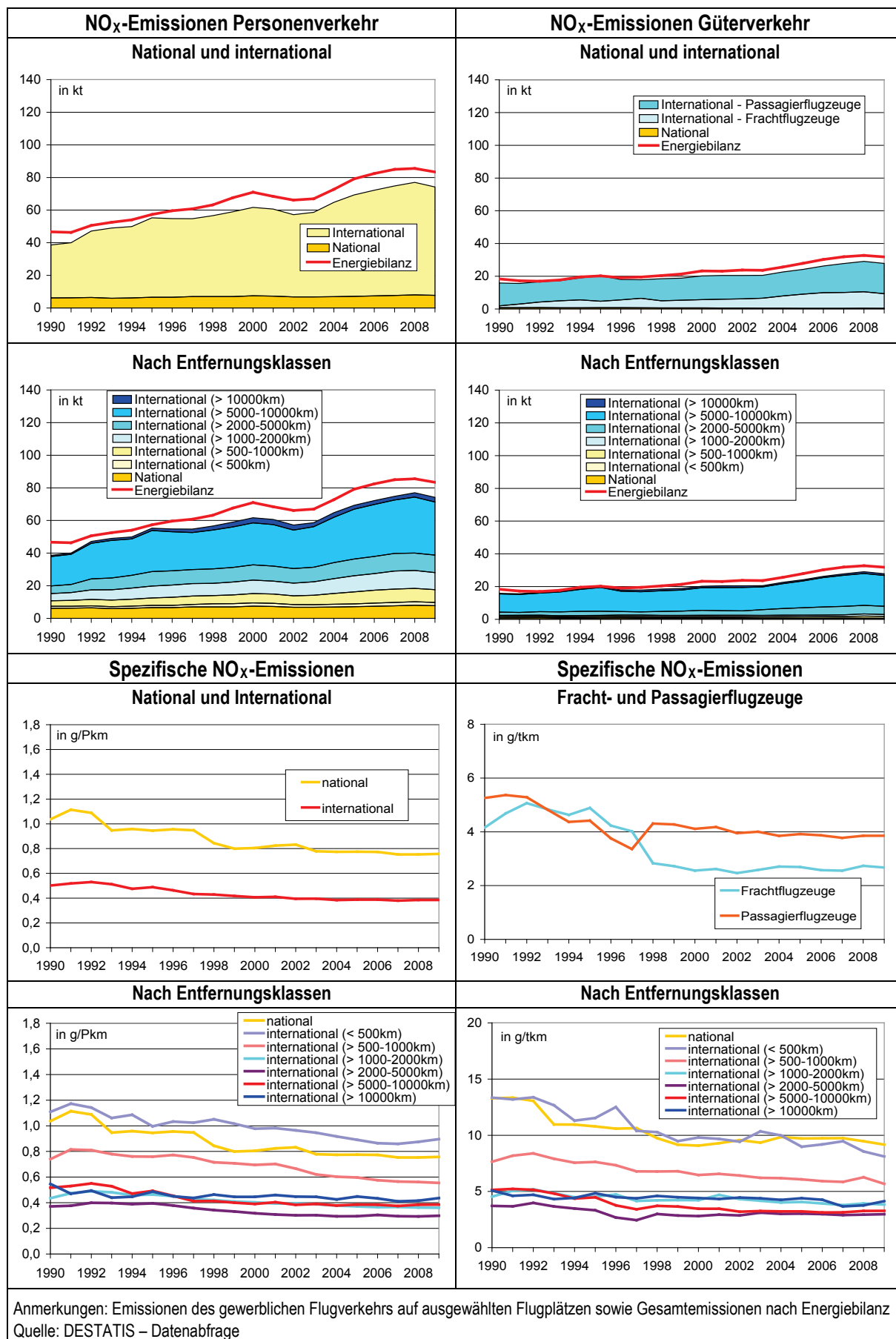
Die folgenden Abbildungen zeigen verschiedene Berechnungsergebnisse für den gewerblichen Flugverkehr in Deutschland 1990-2009 in der Aufteilung Personen- und Güterverkehr und verschiedenen Differenzierungen.



**Abb. 20: Entwicklung der Verkehrsleistungen des Personen- und Güterverkehrs**



**Abb. 21: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Personen- und Güterverkehr**

Abb. 22: Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Personen- und Güterverkehr



## Wichtige Ergebnisse

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen in Deutschland, bezogen auf die Starts und die damit induzierten Verkehrsleistungen im Zeitraum 1990-2009. Sie beziehen sich auf die Diagramme in Abb. 20 bis Abb. 22. Betrachtet werden die TREMOD-Ergebnisse (ohne Energiebilanzabgleich).

- Die Verkehrsleistungen des Personenverkehrs stiegen von 1990 bis 2009 um 158 % an. Dabei ging der Anteil des nationalen Verkehrs von 8,5 % auf 5,6 % zurück.
- Die Transportleistung nahm im betrachteten Zeitraum um 169 % zu. Dabei spielt der nationale Verkehr mit einem Anteil von unter 1 % eine sehr geringe Rolle
- Der Kraftstoffverbrauch und damit die hier dargestellten Kohlendioxidemissionen stiegen im Personenverkehr um 104 %, im Güterverkehr um 88 % an. Der Anstieg war damit geringer als der Anstieg der jeweiligen Verkehrsleistungen.
- Der Anteil des Güterverkehrs an den CO<sub>2</sub>-Emissionen lag mit leichten Schwankungen über den gesamten Zeitraum bei etwa einem Viertel der Gesamtemissionen.

Der geringere Anstieg des Kraftstoffverbrauchs gegenüber den Verkehrsleistungen lässt sich anhand der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen nachvollziehen:

- Beim Personenverkehr gingen die spezifischen Emissionen je Personenkilometer im nationalen Verkehr um 17 % und im internationalen Verkehr um 29 % zurück.
- Beim Güterverkehr lag der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Tonnenkilometer im betrachteten Zeitraum bei den Frachtflugzeugen bei 30 %.

Eine detaillierte Betrachtung der spezifischen Emissionen einzelner Segmente des Flugverkehrs verdeutlicht deren Beitrag. Im Allgemeinen sinken die spezifischen Emissionen mit der Zunahme der geflogenen Entfernung. Wichtige Ergebnisse dieser Betrachtung sind:

- Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des nationalen Personenflugverkehrs lagen im Jahr 2009 um den Faktor 2 höher als im internationalen Flugverkehr.
- Flüge mit Distanzen bis 1.000 km weisen deutlich höhere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als Flüge mit größeren Distanzen. So lag im Jahr 2009 der spezifische CO<sub>2</sub>-Faktor der Distanzklasse bis 500 km um den Faktor 2,5 und von 500 bis 1.000 km um den Faktor 1,6 höher als in der Klasse 1.000-2.000 km. Die niedrigsten spezifischen Werte werden in der Distanzklasse bis 5.000 km erreicht. Bei längeren Distanzen steigen die spezifischen Verbrauchswerte dagegen wieder an. Dies gilt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr.
- Beim Güterverkehr kann zwischen Passagier- und Frachtmaschinen unterschieden werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Frachtmaschinen geringere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen haben als Passagiermaschinen, die Beifracht befördern.<sup>1</sup> Dieser Zusammenhang ergibt sich allerdings aus der verwendeten Allokationsregel.

Bei den Stickstoffoxidemissionen sind die genannten Tendenzen ähnlich. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass im internationalen Flugverkehr eine etwas höhere Minderung der spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen stattgefunden hat als beim Kohlendioxid.

---

<sup>1</sup> Der in Abb. 21 und Abb. 22 dargestellte Verlauf der spezifischen Emissionen von Fracht- und Passagiermaschinen vor 1998 hat seine Ursache in nicht klar differenzierten statistischen Grundlagen

#### 4.3.5 LTO-Emissionen auf ausgewählten Flugplätzen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden von DESTATS die Anzahl der Starts pro Jahr auf den ausgewählten Flugplätzen differenziert nach Flugzeugtypen zur Verfügung gestellt. Damit konnten für jeden Flughafen die jährlichen LTO-Emissionen berechnet werden. Die Berechnungen erfolgten mit den gleichen Energie- und Emissionskennzahlen wie für den gesamten bundesdeutschen Flugverkehr. Allerdings mussten folgende Vereinfachungen getroffen werden.

- Die Emissionsdaten aus EMEP-EEA 2009 weisen für einige Typen leicht unterschiedliche LTO-Emissionsdaten für verschiedene Distanzklassen auf. Da die Starts für die ausgewählten Flughäfen nicht nach Distanzklassen differenziert vorliegen, wurden die Emissionen mit den Werten der Distanzklasse „125 Meilen“ berechnet.
- Die verwendeten Kraftstoff-bezogenen LTO-Emissionsfaktoren sind z.T. für den nationalen und internationalen Verkehr unterschiedlich. Da die Starts für die ausgewählten Flugplätze nicht in nationalen und internationalen Verkehr unterschieden sind, wurden für die Berechnung die Emissionswerte des nationalen Flugverkehrs gewählt.

Die folgenden Tabellen zeigen die Starts und die Ergebnisse für die NO<sub>x</sub>- und HC-Emissionen.

**Abb. 23: Anzahl der Flugzeugstarts auf ausgewählten Flugplätzen von 1990 bis 2009**

Flugplatz	Anzahl der Starts							
	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Berlin-Schönefeld	265	14.974	16.711	25.959	28.991	28.928	29.879	32.467
Berlin-Tegel	51.014	55.306	63.592	68.659	67.176	72.725	77.259	73.772
Berlin-Tempelhof	-	15.399	17.201	12.860	15.578	12.059	10.369	-
Bremen	19.312	18.557	19.812	16.999	15.905	18.181	19.062	17.932
Dortmund	-	-	-	11.547	11.831	11.504	13.734	11.076
Dresden	1.610	17.901	15.091	14.414	14.579	14.456	14.700	13.568
Düsseldorf	68.252	83.544	89.494	94.327	104.397	112.403	113.024	105.571
Erfurt	157	4.627	5.255	6.440	5.812	5.847	6.163	5.316
Frankfurt/Main	155.711	183.140	223.639	238.389	241.053	243.121	239.323	227.988
Friedrichshafen	-	-	-	5.710	6.025	5.958	6.943	6.178
Hahn	-	-	-	12.873	16.254	17.327	16.824	16.317
Hamburg	56.673	58.563	68.571	67.069	72.833	75.679	75.132	68.848
Hannover	32.480	34.841	43.504	39.812	37.513	36.115	35.853	31.820
Karlsruhe/Baden-Baden	-	-	-	13.215	14.583	11.780	12.903	12.197
Köln/Bonn	48.432	55.634	67.442	70.033	69.226	69.082	64.070	60.080
Leipzig/Halle	1.720	21.405	17.833	15.144	16.766	20.800	27.322	27.841
Lübeck	-	-	-	3.733	3.701	3.374	3.609	4.036
Memmingen	-	-	-	-	-	-	4.017	5.060
München	81.682	97.969	150.626	192.775	195.628	205.471	206.231	189.864
Münster/Osnabrück	13.395	14.272	19.969	14.424	13.968	13.316	13.842	13.291
Niederrhein	-	-	-	2.724	2.446	3.457	5.993	9.507
Nürnberg	20.572	27.345	33.580	29.692	30.995	31.367	29.537	27.698
Paderborn/Lippstadt	-	-	-	7.716	7.483	7.405	6.483	5.349
Rostock	-	-	-	-	1.597	1.790	1.456	1.297
Saarbrücken	6.610	7.156	7.924	5.223	5.371	5.324	6.859	6.076
Stuttgart	44.301	47.274	62.113	69.917	72.095	72.883	70.700	62.724
Zweibrücken	-	-	-	-	-	-	8.213	6.247
Gesamt	602.186	757.907	922.357	1.039.654	1.071.806	1.100.352	1.119.500	1.042.120

Quelle: Destatis, eigene Berechnungen

**Abb. 24: NO<sub>x</sub>-Emissionen im LTO-Zyklus ausgewählten Flugplätzen 1990 bis 2009**

Flugplatz	LTO-Emissionen, NO <sub>x</sub> in t							
	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Berlin-Schönefeld	3	166	119	221	249	254	260	262
Berlin-Tegel	390	500	544	537	552	615	664	642
Berlin-Tempelhof	-	20	25	24	29	16	13	-
Bremen	59	69	77	69	65	84	89	87
Dortmund	-	-	-	61	69	76	87	64
Dresden	8	99	81	74	74	75	77	72
Düsseldorf	821	952	919	765	817	860	881	872
Erfurt	0	18	20	19	16	12	13	12
Frankfurt/Main	2.792	3.233	3.684	3.932	3.969	3.969	3.996	3.815
Friedrichshafen	-	-	-	19	21	20	20	19
Hahn	-	-	-	168	217	201	228	231
Hamburg	483	493	525	485	556	596	594	552
Hannover	164	249	267	251	243	236	238	202
Karlsruhe/Baden-Baden	-	-	-	24	28	34	43	40
Köln/Bonn	252	411	496	721	750	775	680	645
Leipzig/Halle	12	140	115	87	127	211	411	432
Lübeck	-	-	-	21	21	20	18	22
Memmingen	-	-	-	-	-	-	18	30
München	837	963	1.278	1.500	1.591	1.716	1.781	1.689
Münster/Osnabrück	15	40	70	54	53	58	58	49
Niederrhein	-	-	-	19	17	26	46	74
Nürnberg	98	144	137	148	159	173	177	170
Paderborn/Lippstadt	-	-	-	43	40	40	34	29
Rostock	-	-	-	-	7	7	6	8
Saarbrücken	10	15	17	19	16	15	24	21
Stuttgart	303	319	438	431	453	467	440	400
Zweibrücken	-	-	-	-	-	-	11	13
Gesamt	6.247	7.829	8.813	9.689	10.140	10.558	10.909	10.451

Quelle: Destatis, eigene Berechnungen

**Abb. 25: HC-Emissionen im LTO-Zyklus ausgewählten Flugplätzen 1990 bis 2009**

Flugplatz	LTO-Emissionen, HC in t							
	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Berlin-Schönefeld	0,8	37,1	20,9	51,7	58,5	62,4	64,2	62,3
Berlin-Tegel	125,9	70,4	85,3	89,9	95,9	108,7	112,0	113,7
Berlin-Tempelhof	-	2,7	6,1	7,5	9,4	7,1	6,1	-
Bremen	17,1	9,6	14,1	12,5	13,1	15,9	15,3	13,6
Dortmund	-	-	-	14,4	16,7	18,6	21,6	14,0
Dresden	2,3	13,7	11,9	13,2	14,6	14,9	16,5	15,6
Düsseldorf	244,7	183,5	145,0	141,4	148,7	160,1	176,5	171,4
Erfurt	0,0	2,7	3,2	3,1	3,4	2,9	2,7	2,5
Frankfurt/Main	1.075,5	930,4	845,9	740,1	774,3	792,2	777,7	757,3
Friedrichshafen	-	-	-	3,1	3,2	3,4	4,7	4,6
Hahn	-	-	-	41,6	52,5	42,7	48,6	50,6
Hamburg	127,2	86,7	97,0	89,1	104,6	123,1	119,9	120,4
Hannover	48,9	45,8	53,6	44,3	41,8	43,2	47,5	42,3
Karlsruhe/Baden-Baden	-	-	-	6,9	7,7	7,2	9,1	8,7
Köln/Bonn	77,9	93,7	109,9	123,0	130,4	129,1	117,4	111,7
Leipzig/Halle	2,8	26,0	18,3	14,6	22,3	35,2	68,6	67,4
Lübeck	-	-	-	2,1	2,3	2,1	2,1	2,5
Memmingen	-	-	-	-	-	-	2,0	2,9
München	234,8	158,5	234,8	356,0	369,0	420,9	429,3	430,5
Münster/Osnabrück	3,1	6,2	10,9	8,7	9,4	10,7	11,4	11,0
Niederrhein	0,0	0,0	0,0	1,7	1,5	2,2	4,0	6,9
Nürnberg	26,6	30,9	20,3	24,4	30,8	34,5	37,1	36,7
Paderborn/Lippstadt	-	-	-	5,1	5,7	6,4	5,5	4,5
Rostock	-	-	-	-	0,8	0,9	1,0	1,6
Saarbrücken	2,1	2,3	2,6	4,3	3,6	3,9	5,7	5,5
Stuttgart	102,7	76,2	70,7	86,7	91,6	97,4	99,3	87,2
Zweibrücken	-	-	-	-	-	-	4,2	3,7
Gesamt	2.092	1.776	1.750	1.885	2.012	2.145	2.210	2.149

Quelle: Destatis, eigene Berechnungen

## 5 Das TREMOD-AV-Modell

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine neue Microsoft Access-Datenbank erstellt, die die sehr differenzierte Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen des Flugverkehrs ermöglicht. Aufgrund der großen Menge an Eingabedaten, der dadurch bedingten Größe der Datenbank und der relativ langen Rechenzeiten schlagen wir vor, die detaillierte Datenbank als TREMOD-AV außerhalb des regulären TREMOD zu belassen und im TREMOD-Gesamtmodell zusammengefasste Ergebnisse, die Aufbereitung für den nationalen Inventarbericht, die Szenarienerstellung und die Klimakorrektur abzulegen.

TREMOD-AV enthält demnach:

- die differenzierten Verkehrsdaten von DESTATIS, aktuell für 1990 bis 2009,
- die detaillierten Emissionsfaktoren
- alle Prozeduren zur Berechnung des Energieverbrauchs und der Emissionen des gewerblichen Flugverkehrs auf ausgewählten Flugplätzen differenziert nach DESTATIS-Flugzeugtypen, national/internationalem Verkehr, Entfernungsklassen, Flugzyklen sowie Personen- und Güterverkehr.
- Übersichten über die Eingabedaten und die Ergebnisse.

Das TREMOD-Gesamtmodell enthält zusammengefasste Ergebnisse des Flugverkehrs aus TREMOD-AV. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden die Daten für die Emissionsberichterstattung aufbereitet und die Berechnung von Flugverkehrs-Szenarien durchgeführt.

TREMOD enthält im Einzelnen:

- Die Berechnungsergebnisse für den Flugverkehr, differenziert nach IPCC-Flugzeugtypen und sonstigen Typen, national/internationalem Verkehr, aggregierte Entfernungsklassen, Flugzyklen sowie Personen- und Güterverkehr
- Die Berechnungsergebnisse für die ZSE-Übergabe (d.h. die Energiebilanz-korrigierten Ergebnisse)
- Möglichkeit der Eingabe eines „Klimafaktors“ (Emission Weighting Factor, siehe Kapitel 7.4)
- Ein Szenarienberechnungstool.

## 6 Zusammenfassung und offene Punkte

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde ein eigenständiges Rechenmodell namens TREMOD-AV für den zivilen Flugverkehr entwickelt. Damit können nun differenzierte und aktuelle Emissionsergebnisse erzeugt werden, die den Anforderungen der Berichterstattung für das nationale Emissionsinventar gerecht werden. Außerdem können die jährlich aktualisierten Emissionsergebnisse direkt in das ZSE übernommen werden.

Die Berechnungen werden nach einem verfeinerten Verfahren auf Basis der einzelnen Flüge nach Flugzeugtypen und Entfernungsklassen durchgeführt (Tier 3a). Basis sind entsprechend differenzierte Flugverkehrsstatistiken für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen in Deutschland von 1990 bis 2009, die vom Statistischen Bundesamt für diese Untersuchung aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden.

Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsdaten wurden vor allem aus der EMEP-EEA-Datenbank [EMEP-EEA 2009] abgeleitet. Fehlende Werte wurden zum Teil funktional ergänzt oder zugeordnet. Für Drehflügler und benzinbetriebene Motorflugzeuge wurden andere Datenquellen verwendet.

Um den gesamten zivilen Flugverkehr abzubilden, wurde der Kraftstoffverbrauch des gewerblichen Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen sowie des sonstigen Flugverkehrs abgeschätzt. Aufgrund des geringen Beitrags dieser Verkehrsbereiche wurde auf ihre Quantifizierung im Rahmen von TREMOD-AV verzichtet.

Mit der differenzierten Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen des Flugverkehrs lassen sich nun für viele Fragestellungen bessere Aussagen treffen. Insbesondere sind das

- der Anteil des nationalen Flugverkehrs am Gesamtverkehr,
- der Beitrag einzelner Flugzeugtypen und der verschiedenen Flugdistanzen,
- die Aufteilung auf Personen- und Güterverkehr sowie der Anteil des Güterverkehrs mit Frachtflugzeugen.

Dennoch bleiben verschiedene Unsicherheiten und offene Punkte bestehen:

- Die TREMOD-Berechnung konnte bisher nicht mit Eurocontrol abgestimmt werden, da von Eurocontrol nur der Anteil des nationalen Flugverkehrs am Kraftstoffverbrauch vorliegt. Dieser wurde in die Modellrechnung übernommen.
- Die verwendeten Verbrauchs- und Emissionswerte sind nicht aktuell, vor allem fehlen neuere Flugzeugtypen.
- Es besteht eine nicht unerhebliche Differenz zwischen den mit TREMOD-AV berechneten Kraftstoffverbräuchen und der Energiebilanz. Die Ursachen konnten im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden. Folgende Gründe könnten verantwortlich sein:
  - Die zugrunde liegenden Verbrauchsfaktoren der EMEP-EEA-Datenbank könnten zu niedrig sein, etwa wenn die den Verbrauchsdaten zugrunde liegenden Flugzyklen und/oder Beladungsfaktoren nicht der Realität entsprechen.
  - Die angenommenen realen Flugdistanzen sind zu niedrig.
  - Es fehlen weitere außerplanmäßige Verbräuche z.B. durch Warteschleifen und Treibstoffablassen.
  - Es bestehen Betankungsdifferenzen zwischen deutschen und ausländischen Flughäfen.

## 7 Anhang

### 7.1 Abgrenzungen Flugverkehrsstatistik

**OFOD und Flight Stage:** Hierbei handelt es sich um zwei verschiedene Klassifizierungsverfahren der Passagier- und Frachtangaben. Dabei heißt OFOD: On-Flight Origin and Destination.

Beispiel: Ein Flug Prag-Frankfurt-London. 100 Passagiere kommen von Prag, 80 steigen in Frankfurt aus, 40 steigen zu, 60 kommen in London an. Nach OFOD hat der Flug aus Frankfurt 40 Passagiere, nach Flight Stage 60. Die Passagierzahlen liegen nach OFOD und Flight Stage vor. Für die Berechnung der Emissionen wird das Flight Stage Konzept verwendet, da damit die reale Besetzung des Flugzeugs auf dem jeweiligen Flug richtig abgebildet wird.

Für Fracht und Post liegen getrennt nach Flugzeugtypen nur Flight Stage Daten vor, der Unterschied ist hier aber nur marginal. Man kann ihn aus den Tabellen der Jahresveröffentlichung entnehmen: Tab 6.2.1 zeigt OFOD, Tab 4.2.2 zeigt Flight Stage.

## 7.2 Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdatensätze

**Tab. 15 Übersicht der Flugzeugtypen nach IPCC-Code**

IPCC-Code	ICAO	IATA	IPCC-Code	ICAO	IATA	IPCC-Code	ICAO	IATA															
Airbus A300	A30B	AB3	Boeing 737-700	B737	73G	Douglas DC-9	DC9	DC9															
	A306	AB4			73W		DC91	D91															
		AB6	Boeing 737-800	B738	738		DC92	D92															
		ABF			73H		DC93	D93															
		ABX	Boeing 737-900	B739	739		DC94	D94															
		ABY	Boeing 747-100	B741	74T		DC95	D95															
Airbus A310	A310	310		N74S	74L	D9C																	
		312		B74R	74R	D9F																	
		313		B74R	74V	D9X																	
		31F	Boeing 747-200	B742	742	Lockheed L-1011	L101	L10															
31X	74C	L11																					
31Y	74X	L15																					
Airbus A319	A319	319	Boeing 747-300	B743	743			McDonnell Douglas MD11	MD11	L1F													
A318	318	74D			M11																		
Airbus A320	A320	320	Boeing 747-400	B744	747	McDonnell Douglas MD80	MD80			M1F													
Airbus A321		32S			744					M1M													
	A321	321			74E	McDonnel Douglas MD80		MD80	M80														
Airbus A330-200	A330	330			74F			MD81	M81														
	A332	332			74J			MD82	M82														
Airbus A330-300	A330	330			74M			MD83	M83														
	A333	333			74Y		MD87	M87															
Airbus A340-200	A342	342	Boeing 757-200	B752	757	MD88	MD88																
Airbus A340-300	A340	340			75F	McDonnell Douglas MD90	MD90	M90															
	A343	343			75M	Tupolev Tu134	T134	TU3															
Airbus A340-500	A345	345	Boeing 757-300	B753	753	Tupolev Tu154	T154	TU5															
Airbus A340-600	A346	346	Boeing 767-200	B762	762	Avro RJ85	RJ85	AR8															
Boeing 707	B703	703			76X			ARJ															
		707	Boeing 767-300	B763	767	Bae 146	B463	B461	141														
		70F			76F			B462	142														
		70M			763				143														
Boeing 717	B712	717			76Y				146														
Boeing 727-100	B721	721	Boeing 767-400	B764	764			Boeing 727-200	B722	722	Embraer ERJ145	E145	ER4										
		72M	Boeing 777-200	B772	777					772			F100	100									
Boeing 727-200	B722	722	Boeing 777-300	B773	773					Fokker 100/70/28		F28	F70	F70									
		727	Douglas DC-10	DC10	D10								Fokker 100/70/28	F28	F21								
		72C			D11	D1C	D1F	F22															
		72B			D1M	D1X	D1Y	F23															
72F	Boeing 737-100	B731			731	Boeing 737-200	B732	732	Boeing 737-300		B733		737		Boeing 737-400	B734	737	Boeing 737-500	B735	737	Boeing 737-600	B736	736
73M					Boeing 737-300			B733					733				Boeing 737-400			B734			734
73X	Boeing 737-300	B733				73F	Boeing 737-400		B734	73F		Boeing 737-500	B735		73F	Boeing 737-600		B736	73F				
73Y					Boeing 737-300	B733		733		Boeing 737-400				B734	733		Boeing 737-500		B735	733	Boeing 737-600	B736	733
737	Boeing 737-300	B733	737	Boeing 737-400			B734	737	Boeing 737-500		B735	737	Boeing 737-600		B736	737							
738			Boeing 737-300		B733	738		Boeing 737-400		B734		738		Boeing 737-500		B735	738	Boeing 737-600	B736	738			
739	Boeing 737-300	B733		739		Boeing 737-400	B734		739		Boeing 737-500	B735	739		Boeing 737-600		B736			739			
74T			Boeing 737-300	B733	74T			Boeing 737-400	B734	74T			Boeing 737-500	B735		74T		Boeing 737-600	B736	74T			
74L	Boeing 737-300	B733			74L	Boeing 737-400	B734			74L	Boeing 737-500	B735			74L	Boeing 737-600	B736			74L			
74R			Boeing 737-300	B733	74R			Boeing 737-400	B734	74R			Boeing 737-500	B735	74R			Boeing 737-600	B736	74R			
74V	Boeing 737-300	B733			74V	Boeing 737-400	B734			74V	Boeing 737-500	B735			74V	Boeing 737-600	B736			74V			
742			Boeing 737-300	B733	742			Boeing 737-400	B734	742			Boeing 737-500	B735	742			Boeing 737-600	B736	742			
74C	Boeing 737-300	B733			74C	Boeing 737-400	B734			74C	Boeing 737-500	B735			74C	Boeing 737-600	B736			74C			
74X			Boeing 737-300	B733	74X			Boeing 737-400	B734	74X			Boeing 737-500	B735	74X			Boeing 737-600	B736	74X			
743	Boeing 737-300	B733			743	Boeing 737-400	B734			743	Boeing 737-500	B735			743	Boeing 737-600	B736			743			
74D			Boeing 737-300	B733	74D			Boeing 737-400	B734	74D			Boeing 737-500	B735	74D			Boeing 737-600	B736	74D			
747	Boeing 737-300	B733			747	Boeing 737-400	B734			747	Boeing 737-500	B735			747	Boeing 737-600	B736			747			
744			Boeing 737-300	B733	744			Boeing 737-400	B734	744			Boeing 737-500	B735	744			Boeing 737-600	B736	744			
74E	Boeing 737-300	B733			74E	Boeing 737-400	B734			74E	Boeing 737-500	B735			74E	Boeing 737-600	B736			74E			
74F			Boeing 737-300	B733	74F			Boeing 737-400	B734	74F			Boeing 737-500	B735	74F			Boeing 737-600	B736	74F			
74J	Boeing 737-300	B733			74J	Boeing 737-400	B734			74J	Boeing 737-500	B735			74J	Boeing 737-600	B736			74J			
74M			Boeing 737-300	B733	74M			Boeing 737-400	B734	74M			Boeing 737-500	B735	74M			Boeing 737-600	B736	74M			
74Y	Boeing 737-300	B733			74Y	Boeing 737-400	B734			74Y	Boeing 737-500	B735			74Y	Boeing 737-600	B736			74Y			
757			Boeing 737-300	B733	757			Boeing 737-400	B734	757			Boeing 737-500	B735	757			Boeing 737-600	B736	757			
75F	Boeing 737-300	B733			75F	Boeing 737-400	B734			75F	Boeing 737-500	B735			75F	Boeing 737-600	B736			75F			
75M			Boeing 737-300	B733	75M			Boeing 737-400	B734	75M			Boeing 737-500	B735	75M			Boeing 737-600	B736	75M			
762	Boeing 737-300	B733			762	Boeing 737-400	B734			762	Boeing 737-500	B735			762	Boeing 737-600	B736			762			
76X			Boeing 737-300	B733	76X			Boeing 737-400	B734	76X			Boeing 737-500	B735	76X			Boeing 737-600	B736	76X			
767	Boeing 737-300	B733			767	Boeing 737-400	B734			767	Boeing 737-500	B735			767	Boeing 737-600	B736			767			
76F			Boeing 737-300	B733	76F			Boeing 737-400	B734	76F			Boeing 737-500	B735	76F			Boeing 737-600	B736	76F			
763	Boeing 737-300	B733			763	Boeing 737-400	B734			763	Boeing 737-500	B735			763	Boeing 737-600	B736			763			
76Y			Boeing 737-300	B733	76Y			Boeing 737-400	B734	76Y			Boeing 737-500	B735	76Y			Boeing 737-600	B736	76Y			
764	Boeing 737-300	B733			764	Boeing 737-400	B734			764	Boeing 737-500	B735			764	Boeing 737-600	B736			764			
777			Boeing 737-300	B733	777			Boeing 737-400	B734	777			Boeing 737-500	B735	777			Boeing 737-600	B736	777			
772	Boeing 737-300	B733			772	Boeing 737-400	B734			772	Boeing 737-500	B735			772	Boeing 737-600	B736			772			
773			Boeing 737-300	B733	773			Boeing 737-400	B734	773			Boeing 737-500	B735	773			Boeing 737-600	B736	773			
D10	Boeing 737-300	B733			D10	Boeing 737-400	B734			D10	Boeing 737-500	B735			D10	Boeing 737-600	B736			D10			
D11			Boeing 737-300	B733	D11			Boeing 737-400	B734	D11			Boeing 737-500	B735	D11			Boeing 737-600	B736	D11			
D1C	Boeing 737-300	B733			D1C	Boeing 737-400	B734			D1C	Boeing 737-500	B735			D1C	Boeing 737-600	B736			D1C			
D1F			Boeing 737-300	B733	D1F			Boeing 737-400	B734	D1F			Boeing 737-500	B735	D1F			Boeing 737-600	B736	D1F			
D1M	Boeing 737-300	B733			D1M	Boeing 737-400	B734			D1M	Boeing 737-500	B735			D1M	Boeing 737-600	B736			D1M			
D1X			Boeing 737-300	B733	D1X			Boeing 737-400	B734	D1X			Boeing 737-500	B735	D1X			Boeing 737-600	B736	D1X			
D1Y	Boeing 737-300	B733			D1Y	Boeing 737-400	B734			D1Y	Boeing 737-500	B735			D1Y	Boeing 737-600	B736			D1Y			
D8F			Boeing 737-300	B733	D8F			Boeing 737-400	B734	D8F			Boeing 737-500	B735	D8F			Boeing 737-600	B736	D8F			
D8L	Boeing 737-300	B733			D8L	Boeing 737-400	B734			D8L	Boeing 737-500	B735			D8L	Boeing 737-600	B736			D8L			
D8M			Boeing 737-300	B733	D8M			Boeing 737-400	B734	D8M			Boeing 737-500	B735	D8M			Boeing 737-600	B736	D8M			
D8Q	Boeing 737-300	B733			D8Q	Boeing 737-400	B734			D8Q	Boeing 737-500	B735			D8Q	Boeing 737-600	B736			D8Q			
D8T			Boeing 737-300	B733	D8T			Boeing 737-400	B734	D8T			Boeing 737-500	B735	D8T			Boeing 737-600	B736	D8T			
D8X	Boeing 737-300	B733			D8X	Boeing 737-400	B734			D8X	Boeing 737-500	B735			D8X	Boeing 737-600	B736			D8X			
D8Y			Boeing 737-300	B733	D8Y			Boeing 737-400	B734	D8Y			Boeing 737-500	B735	D8Y			Boeing 737-600	B736	D8Y			
Quelle: IPCC 2006a						Donier Do 328	D328			D38													
						Gulfstream IV/V		GRJ															
						Yakovlev	Yak 42	YK2															

Quelle: IPCC 2006a

In den folgenden Tabellen sind die DESTATIS Flugzeugtypen und die in der Emissionsberechnung verwendeten Emissionsdaten (IDEM\_Model) dargestellt.

**Tab. 16: DESTATIS Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdaten für Propellerflugzeuge**

Qualität	IDAC_Model	Flugzeugtyp	IDEM_Model <sup>1)</sup>	Bemerkung
4	1	Flugzeuge bis 2 t	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	2	Flugzeuge über 2 bis 5,7 t	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	7	Cessna 404	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	8	Piper Seneca	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	10	Cessna 402	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	11	Cessna 421	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	12	Flugzeuge über 5,7 bis 14 t - Prop	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	14	Douglas DC3	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	18	Junkers JU52	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	55	Convair 340/440	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	67	Douglas DC 4	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	68	Douglas DC 6	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge
4	69	Douglas DC 7	1010	Pauschale EF für Motorflugzeuge

<sup>1)</sup> IDEM\_Model: gibt den Flugzeugtyp an, für den Emissionsdaten vorhanden sind. Die IDEM-Model entspricht der IDAC\_Model für alle Werte <1000. Bei IDs>1000 sind Funktionen oder Pauschalwerte für die Berechnung der Emissionen hinterlegt



**Tab. 17: DESTATIS Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdaten für Turboprop-Flugzeuge**

Qualität	IDAC_Model	Flugzeugtyp	IDEM_Model <sup>1)</sup>	Bemerkung
2	3	Beech 90	6	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	4	Beech 99	6	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	5	Swearingen Metro II	6	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	6	Beech 200 Super King Air	6	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	9	Beech C99 Airliner	6	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	13	Swearingen Metro III/400	13	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
1	15	Jetstream 31	15	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	16	Saab/Fairshield 340	23	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	17	Jetstream 41	17	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	19	Embraer EMB 120	23	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc., Anmerkung: keine HC-Faktoren vorhanden
1	20	Embraer EMB-110	20	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
1	21	Beech 1900	21	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	22	Dornier 228	13	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	23	Dornier 328-100	23	Zuordnung: Typ direkt verfügbar, Anmerkung: keine HC-Faktoren vorhanden
2	36	Handley Page Herald(HPR-7)	58	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	37	Fokker F27	58	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	38	Fairshield FH227	58	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	39	De Havilland DHC7-100	39	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	40	De Havilland DHC8-100/200	39	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	41	De Havilland DHC8-300	39	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
2	42	Aeritalia ATR-42-100	44	Zuordnung: Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.)
2	43	Aeritalia ATR-42-200	44	Zuordnung: Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.)
1	44	Aeritalia ATR-42-300	44	Zuordnung: Typ direkt verfügbar, Corinair-Bezeichnung: ATR 42-320 (Startgew. mit 42-300 identisch, hat aber andere Motorisierung), Anmerkung: keine HC-Faktoren vorhanden
2	45	Aeritalia ATR-42-500	44	Zuordnung: Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.)
2	46	Aeritalia ATR-42-400	44	Zuordnung: Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.)
3	47	Antonov 140	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	48	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 1	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	49	Yak 40	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	50	Canadair Challenger	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	51	Do328Jet	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	52	Dassault Falcon 50	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	53	Dassault Falcon 2000	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	54	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 2	1003	Zuordnung: über Regressionsberechnung
2	56	Hawker Siddeley HS748	60	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Grö-

				ßenklasse, Gewicht, etc.
3	57	Namco Y11	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
1	58	Fokker F27-500	58	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
2	59	Fokker F27-600	58	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	60	Fokker F50	60	Zuordnung: Typ direkt verfügbar, Anmerkung: keine HC-Faktoren vorhanden
2	61	British Aerospace ATP	60	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	62	Saab 2000 concordino	62	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
1	63	Aeritalia ATR-72	63	Zuordnung: Typ direkt verfügbar, Corinair-Bezeichnung: ATR 72-200, Anmerkung keine HC-Faktoren vorhanden
2	64	Antonov 24	65	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	65	Antonov 26	65	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
3	66	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 3	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	70	Hawker Siddeley Argosy	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	71	Iljuschin IL 18	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
2	72	Lockheed Elektra	73	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
1	73	Lockheed Hercules Frachter	73	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
3	74	Vickers Viscount	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	75	Vickers Viscount	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
2	76	Lockheed Hercules, Pax (L382)	73	Zuordnung: Über Schätzung nach Antrieb, Größenklasse, Gewicht, etc.
3	77	Antonov 12	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
1	78	De Havilland DHC8-402	78	Zuordnung: Typ direkt verfügbar
3	79	Convair 580	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	80	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 4	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	81	Canadair CL-44	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	82	Super-Hercules SH5	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	83	Antonov 22	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
3	84	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 5	1002	Zuordnung: über Regressionsberechnung
<sup>1)</sup> IDEM_Model: gibt den Flugzeugtyp an, für den Emissionsdaten vorhanden sind. Die IDEM-Model entspricht der IDAC_Model für alle Werte <1000. Bei IDs>1000 sind Funktionen oder Pauschalwerte für die Berechnung der Emissionen hinterlegt				

**Tab. 18: DESTATIS Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdaten für Jets**

Qualität	IDAC_Model	Flugzeugtyp	IDEM_Model <sup>1)</sup>	Bemerkung
3	24	Flugzeuge über 5,7 bis 14 t - Jet	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	25	Learjet 35	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	26	Learjet 55	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	27	Cessna Citation	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	28	Dassault Falcon 20c	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	29	Bae 125-100	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	30	Learjet 45	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	31	Learjet 40	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
2	85	Boeing B 737 All Series	94	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B737 - 400
1	86	Boeing B 737-100	86	Corinair-Daten vorhanden
2	87	Boeing B 737-100 F	86	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B737 - 100
2	88	Boeing B 737-200	86	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-100
2	89	Boeing B 737-200 Adv.	86	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-100
2	90	Boeing B 737-200 C	86	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-100
2	91	Boeing B 737-200 F	86	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-100
2	92	Boeing B 737-300	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	93	Boeing B 737-300 F	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
1	94	Boeing B 737-400	94	Corinair-Daten vorhanden
2	95	Boeing B 737-400 F	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	96	Boeing B 737-500	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	97	Boeing B 737-500 F	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	98	Boeing B 737-600	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	99	Boeing B 737-700	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
2	100	Boeing B 737-800	94	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B737-400
3	101	Boeing B 717	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	102	Douglas DC 9 All Series	102	Corinair-Daten vorhanden
2	103	Douglas DC 9 - 10	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	104	Douglas DC 9 - 20	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	105	Douglas DC 9 - 30	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	106	Douglas DC 9 F	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	107	Douglas DC 9 - 40	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	108	Douglas DC 9 - 50	102	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas DC9 All Series
2	109	Mc Donnell MD 80 All Series	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
2	110	Mc Donnell MD 81	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn.

				Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
1	111	Mc Donnell MD 82	111	Corinair-Daten vorhanden
2	112	Mc Donnell MD 83	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
2	113	Mc Donnell MD 87	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
2	114	Mc Donnell MD 88	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
2	115	Mc Donnell MD 90	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
2	116	Mc Donnell MD 95	111	Gleicher Serientyp/Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie MD 82
1	117	Fokker F28 Fellowship	117	Corinair-Daten vorhanden
1	118	Fokker F100	118	Corinair-Daten vorhanden
2	119	Fokker 70	118	Gleicher Hersteller, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie Fokker F100 („verkürzte Variante“)
1	120	BAE-146 All Series	120	Corinair-Daten vorhanden
2	121	BAE-146-100	120	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas BAE-146 All Series
2	122	BAE-146-200	120	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas BAE-146 All Series
2	123	BAE-146-200 F	120	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas BAE-146 All Series
2	124	BAE-146-300	120	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit Douglas BAE-146 All Series
3	125	AVRO RJ70	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	126	AVRO RJ85	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	127	AVRO RJ100	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	128	Airbus A319 All Series	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	129	Airbus A319-100	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	130	Airbus A320 All Series	130	Corinair-Daten vorhanden
2	131	Airbus A320-100	130	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A320 All Series
2	132	Airbus A320-200	130	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A320 All Series
3	133	Airbus A318	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	134	BAC1-11 All Series	134	Corinair-Daten vorhanden
2	135	BAC1-11-200	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	136	BAC1-11-200 F	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	137	BAC1-11-300	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	138	BAC1-11-300 F	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	139	BAC1-11-400	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	140	BAC1-11-400 F	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	141	BAC1-11-500	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series
2	142	BAC1-11-500 F	134	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit BAC1-11 All Series

3	143	Canadair Regional Jet (CRJ200)	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	144	Canadair Regional Jet (CRJ700)	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	145	Canadair Regional Jet (CRJ900)	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	146	Gulfstream II/III/IV	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	147	Gulfstream V	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	148	Hawker Siddeley Trident	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	149	Tupolew 134	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	150	Antonov 72/74	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	151	Embraer EMB - 145	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	152	Embraer EMB-135 (ab 01/2002) - EM3	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	153	Embraer EMB-135 (für 04/03 Antonov 26) - EM3	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	154	Embraer EMB-170 (ab 01/2002) - EM7	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	155	Embraer EMB-170 (bis 12/2001) - EM7	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	156	Embraer EMB - 195	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	157	Embraer EMB - 190	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	158	Dassault Falcon 900	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	159	Embraer EMB-175	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	160	Bombardier Challenger 601	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	161	Bombardier Challenger 604	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	162	Dassault Falcon 7X	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	163	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 6	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	164	AVRO RJ8 Frachter	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	165	Sud-Aviation Caravel.	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	166	Boeing 707	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	167	Boeing 707F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	168	Boeing 720	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	169	Boeing 720F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	170	Boeing 727	170	Corinair-Daten vorhanden
2	171	Boeing 727F	170	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B727 (Frachter)
2	172	Boeing 727-100	170	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B727
2	173	Boeing 727-200	170	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B727
1	174	Boeing 757 All Series	174	Corinair-Daten vorhanden
2	175	Boeing 757-200	174	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B757 All Series
2	176	Boeing 757-200 F	174	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B757 All Series
2	177	Boeing 757-300	174	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B757 All Series
3	178	Boeing 737-900	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	179	Boeing 767-200 All Series	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	180	Airbus A300 All Series	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	181	Airbus A300	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	182	Airbus A300-600	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	183	Airbus A300 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	184	Airbus A310 All Series	184	Corinair-Daten vorhanden
2	185	Airbus A310-200	184	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A310 All Series
2	186	Airbus A310-200 F	184	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A310 All Series

2	187	Airbus A310-300	184	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A310 All Series
2	188	Airbus A310-300 F	184	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit A310 All Series
3	189	Airbus A321 All Series	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	190	Airbus A321-100	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	191	Airbus A321-100 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	192	Airbus A321-200	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	193	Airbus A321-200 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	194	Douglas DC 8	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	195	Douglas DC 8F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	196	Iljuschin IL 62	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	197	Iljuschin IL 62 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	198	Tupolew 154	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	199	Tupolew 154 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	200	Tupolew 204-100	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	201	sonst. Flugzeuge der Typengruppe 7	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	202	Boeing B 747 All Series	202	Corinair-Daten vorhanden
2	203	Boeing B 747-100	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
2	204	Boeing B 747-200	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
2	205	Boeing B 747-200C	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
2	206	Boeing B 747-200 F	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
2	207	Boeing B 747-300	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
2	208	Boeing B 747-300C	202	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 All Series
1	209	Boeing B 747-400	209	Corinair-Daten vorhanden
2	210	Boeing B 747-400 F	209	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 – 400 (Frachter)
2	211	Boeing B 747-400 C	209	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B747 – 400
2	212	Boeing B 747-300 F	202	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B747 - 400
2	213	Boeing B 747-SP	209	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B747 All Series
2	214	Boeing B 747SR	209	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie B747 - 400
1	215	Boeing B 767-300	215	Corinair-Daten vorhanden
2	216	Boeing B 767-300 F	215	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B 767 – 300
2	217	Boeing B 767-400	215	Ähnliches Triebwerk und Gewicht wie B 767 - 300
1	218	Boeing 777 All Series	218	Corinair-Daten vorhanden
2	219	Boeing 777 - 200	218	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B777 All Series
2	220	Boeing 777 F	218	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B777 All Series
2	221	Boeing 777 - 300	218	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit B777 All Series
1	222	Douglas DC 10	222	Corinair-Daten vorhanden
2	223	Douglas DC 10 F	222	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch mit DC 10 (Frachter)
3	224	Douglas MD 11 All Series	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	225	Douglas MD 11	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung

3	226	Douglas MD 11 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	227	Douglas MD 11 C	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
1	228	Airbus A330 All Series	228	Corinair-Daten vorhanden
2	229	Airbus A330 - 200	228	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch
2	230	Airbus A330 - 300	228	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch
1	231	Airbus A340 All Series	231	Corinair-Daten vorhanden
2	232	Airbus A340-200	231	Eine Typserie techn. Daten wie Startgew. sind identisch
2	233	Airbus A340-300	231	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie A340 All Series
2	234	Airbus A340-500	231	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie A340 All Series
2	235	Airbus A340-600	231	Gleicher Serientyp, aber andere techn. Daten (Startgewicht, Triebwerk, Baujahr, usw.) wie A340 All Series
3	236	Airbus A380	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	237	Airbus A380 F	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	238	Lockheed Tristar	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	239	Ilijuschin IL 86	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	240	Ilijuschin 76T	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	241	Antonov AN 124	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	242	Antonov AN 225	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	243	Ilijuschin 96-300	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung
3	244	sonst. Flugzeuge der Typenklasse 8	1003	Zuordnung: Regressionsberechnung

<sup>1)</sup> IDEM\_Model: gibt den Flugzeugtyp an, für den Emissionsdaten vorhanden sind. Die IDEM-Model entspricht der IDAC\_Model für alle Werte <1000. Bei IDs>1000 sind Funktionen oder Pauschalwerte für die Berechnung der Emissionen hinterlegt

**Tab. 19: DESTATIS Flugzeugtypen und verwendete Emissionsdaten für Drehflügler und Luftschiffe**

Qualität	IDAC_Model	Flugzeugtyp	IDEM_Model <sup>1)</sup>	Bemerkung
3	32	Drehflügler bis 5,7 t	32	Regressionsberechnung mit BAZL-Daten
3	33	Drehflügler über 5,7 bis 14 t	33	Regressionsberechnung mit BAZL-Daten
3	34	Drehflügler 5,7-14 t	34	Regressionsberechnung mit BAZL-Daten
3	1010	Luftschiffe & sonstige Luftfahrzeuge	1004	Pauschale EF für Motorflugzeuge
<sup>1)</sup> IDEM_Model: gibt die Zuordnung der Emissionsfaktoren zu den vergleichbaren Flugzeugtyp wieder, wo Emissionsfaktoren vorhanden sind, d.h. also dessen Emissionsfaktor werden übernommen.				



### 7.3 Datenquellen für Emissionsfaktoren und Vergleich

**Abb. 26: EMEP-Beispieldatenset für den Flugzeugtyp B737 400 (JET)**

<b>B737 400</b>		Standard flight distances (nm) [1nm = 1.852 km]						
		<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>750</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
<b>Distance (km)</b>	Climb/cruise/descent	231,5	463	926	1389	1852	2778	3704
<b>Fuel (kg)</b>								
	<b>Flight total</b>	<b>1603,1</b>	<b>2268,0</b>	<b>3612,8</b>	<b>4960,3</b>	<b>6302,6</b>	<b>9187,7</b>	<b>12167,6</b>
	<b>LTO</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>	<b>825,4</b>
	Taxi out	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5
	Take off	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
	Climb out	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0	225,0
	<b>Climb/cruise/descent</b>	<b>777,7</b>	<b>1442,6</b>	<b>2787,4</b>	<b>4134,9</b>	<b>5477,2</b>	<b>8362,3</b>	<b>11342,2</b>
	Approach landing	147,3	147,3	147,3	147,3	147,3	147,3	147,3
	Taxi in	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5
<b>NOx (kg)</b>								
	<b>Flight total</b>	<b>17,7</b>	<b>23,6</b>	<b>36,9</b>	<b>48,7</b>	<b>60,2</b>	<b>86,3</b>	<b>114,4</b>
	<b>LTO</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>
	Taxi out	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784
	Take off	1,591	1,591	1,591	1,591	1,591	1,591	1,591
	Climb out	3,855	3,855	3,855	3,855	3,855	3,855	3,855
	<b>Climb/cruise/descent</b>	<b>9,462</b>	<b>15,392</b>	<b>28,635</b>	<b>40,425</b>	<b>51,952</b>	<b>78,047</b>	<b>106,169</b>
	Approach landing	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240
	Taxi in	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784	0,784
<b>EINOx (g/kg fuel)</b>								
	Taxi out	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27
	Take off	18,51	18,51	18,51	18,51	18,51	18,51	18,51
	Climb out	17,13	17,13	17,13	17,13	17,13	17,13	17,13
	Climb/cruise/descent	12,17	10,67	10,27	9,78	9,49	9,33	9,36
	Approach landing	8,42	8,42	8,42	8,42	8,42	8,42	8,42
	Taxi in	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27
<b>HC (g)</b>								
	<b>Flight total</b>	<b>817,6</b>	<b>912,9</b>	<b>995,8</b>	<b>1065,2</b>	<b>1118,1</b>	<b>1240,4</b>	<b>1374,1</b>
	<b>LTO</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>	<b>666,8</b>
	Taxi out	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18
	Take off	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
	Climb out	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58
	<b>Climb/cruise/descent</b>	<b>150,78</b>	<b>246,13</b>	<b>329,05</b>	<b>398,47</b>	<b>451,33</b>	<b>573,67</b>	<b>707,37</b>
	Approach landing	10,74	10,74	10,74	10,74	10,74	10,74	10,74
	Taxi in	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18	321,18
<b>EIHC (g/kg fuel)</b>								
	Taxi out	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
	Take off	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Climb out	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Climb/cruise/descent	0,19	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06
	Approach landing	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Taxi in	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
<b>CO (g)</b>								
	<b>Flight total</b>	<b>14252,5</b>	<b>15836,0</b>	<b>17525,5</b>	<b>19060,6</b>	<b>20369,3</b>	<b>23298,2</b>	<b>26426,3</b>
	<b>LTO</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>	<b>11830,9</b>
	Taxi out	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45
	Take off	77,19	77,19	77,19	77,19	77,19	77,19	77,19
	Climb out	202,29	202,29	202,29	202,29	202,29	202,29	202,29
	<b>Climb/cruise/descent</b>	<b>2421,54</b>	<b>4005,06</b>	<b>5694,59</b>	<b>7229,65</b>	<b>8538,39</b>	<b>11467,26</b>	<b>14595,41</b>
	Approach landing	500,54	500,54	500,54	500,54	500,54	500,54	500,54
	Taxi in	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45	5525,45
<b>EICO (g/kg fuel)</b>								
	Taxi out	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
	Take off	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	Climb out	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	Climb/cruise/descent	3,11	2,78	2,04	1,75	1,56	1,37	1,29
	Approach landing	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	Taxi in	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11

Quelle: EMEP-EEA 2009

### DLR-Datenbank und Vergleich zu EMEP EEA

Die Emissionsdaten des Flugverkehrs wurden von der DLR im Rahmen eines UBA-Forschungsvorhabens ermittelt [DLR 1997] (für die Studie [TÜV Rheinland 2000]). Ziel war es, für zivile Verkehrsflugzeuge Verbrauchsdaten und Emissionen in Abhängigkeit der geflogenen Strecke und von verschiedenen Nutzlastfaktoren abzuleiten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Daten.

**Tab. 20: Struktur der DLR-Datenbank**

Spalte	Angabe
1	Flugzeugtyp
2	Kurzbezeichnung der Flugzeug/Triebwerk-Kombination nach ICAO 8643
3	Triebwerksbezeichnung
4	Distanzklassen (DKL) 1: 250 km; 2: 500 km; 3: 750 km; 4: 1.000 km; 5: 2.000 km; 6: 4.000 km; 7: 7.000 km; 8: 10.000 km
5	Flugzustand (D: Start- und Steigflug; C: Reiseflug; A: Sink- und Landeanflug)
6	Höhe in [m]
7	Flugstrecke pro Zeile in [m]
8	Kerosinmenge pro Zeile in [kg]
9	NO <sub>x</sub> -Menge pro Zeile in [kg]
10	Summierte Strecke in [km]
11	Summierte Kerosinmenge in [kg]
12	Summierte NO <sub>x</sub> -Menge in [kg]
13	Zeit pro Zeile in [s]
14	CO-Menge pro Zeile in [kg]
15	HC-Menge pro Zeile in [kg]
Quelle: DLR 1997	

Die Flugemissionen wurden mit den vorgegebenen Flugprofilen für die in der Tab. 21 zusammengestellten Flugzeugtypen modelltechnisch nachgebildet und die Energieverbräuche und Abgasemissionen berechnet.

Für insgesamt zehn Typen aus der DLR-Datenbank sind auch Werte in der EMEP-EEA-Datenbank vorhanden. Bei weiteren zehn Typen gibt es in der EMEP-EEA-Datenbank ähnliche Flugzeuge, acht DLR-Typen sind nicht bei EMEP-EEA vorhanden (Tab. 22).

**Tab. 21: Flugzeugtypen und simulierte Triebwerke in der DLR-Datenbank**

Nr.	Flugzeug	Triebwerk	simuliert durch	EMEP-Qualität
1	B737-300	CFM56-3B1	CFM56-3B2 mit $F_{\infty}=89,4$ kN	2
2	MD80	JT8D-217C	JT8D-15 mit $F_{\infty}=92,7$ kN	2
3	A320-200	CFM56-5A1	CFM56-5C2 mit $F_{\infty}=111,2$ kN	2
4	B737-500	CFM56-3B1	CFM56-3B2 mit $F_{\infty}=89,4$ kN	2
5	B737-400	CFM56-3C1	CFM56-3B2 mit $F_{\infty}=104,6$ kN	1
6	B737-100/200	JT8D-15		1
7	B757-200	RB211-535E4	RB211-524B mit $F_{\infty}=176,1$ kN	2
8	A310-300	CF6-80C2A2	CF6-80C2BIF mit $F_{\infty}=233,4$ kN	2
9	B747-100/200/300	CF6-50E2		2
10a	B747-400	CF6-80C2BIF		1
10b	B747-400	RB211-524G	RB211-524B mit $F_{\infty}=253$ kN	1
11	B767-300ER	PW4060		1
12	DC9-50	JT8D-11	JT8D-15 mit $F_{\infty}=66,7$ kN	2
13	B727	JT8D-15		1
14	Fokker 100	TAY MK620-15	TAY MK650-15 mit $F_{\infty}=61,6$ kN	1
15	TU 154	NK8-2U		3
16	BAE 146-200	ALF 502R-5		2
17	MD11	PW4460		3
18	A340-300	CFM56-5C2		2
19	L1011-250	RB211-524B		3
20	DC10-30	CF6-50C2		1
21	Learjet 55 C/LR	TFE731-2-2B	JT15-D5 mit $F_{\infty}=16,5$ kN	3
22	TU 134	D-30-III	JT8D-15 mit $F_{\infty}=66,7$ kN	3
23	BAC 1-11	SPEY MK511	SPEY MK555 mit $F_{\infty}=50,7$ kN	1
24	A330	PW4168	PW4460 mit $F_{\infty}=300$ kN	1
25	DC8	CFM56-2C5	CFM56-3B2 mit $F_{\infty}=97,9$ kN	3
26	IL 86	NK-86		3
27	IL 62	NK-8-2U		3

Anmerkungen: EMEP-Qualität 1: Typ in der EMEP-Datenbank vorhanden; 2: Ähnlicher Typ in der EMEP-Datenbank vorhanden;  
3: Typ in der EMEP-Datenbank nicht vorhanden  
Quelle: DLR 1997

**Tab. 22: Flugzeugtypen in der DLR-Datenbank im Vergleich zur EMEP-EEA-Datenbank**

Flugzeugtyp	EMEP-Qualität	DLR-Flugzeugtyp	EMEP-Qualität	DLR-Flugzeugtyp	EMEP-Qualität
B737-400	1	B737-300	2	TU 154	3
B737-100/200	1	MD80	2	MD11	3
B747-400	1	A320-200	2	L1011-250	3
B747-400	1	B737-500	2	Learjet 55 C/LR	3
B767-300ER	1	B757-200	2	TU 134	3
B727	1	A310-300	2	DC8	3
Fokker 100	1	B747-100/200/300	2	IL 86	3
DC10-30	1	DC9-50	2	IL 62	3
BAC 1-11	1	BAE 146-200	2		
A330	1	A340-300	2		

Anmerkungen: EMEP-Qualität 1: Typ in der EMEP-Datenbank vorhanden; 2: Ähnlicher Typ in der EMEP-Datenbank vorhanden;  
3: Typ in der EMEP-Datenbank nicht vorhanden  
Quelle: DLR 1997

### Anteil der zusätzliche Flugzeugtypen aus der DLR-Datenbank

Zusätzliche Flugzeugtypen, die mit den DLR-Daten ergänzt werden könnten, sind die Flugzeuge mit EMEP-Qualität 2 und 3 (Tab. 21). Tab. 23 zeigt die Relevanz der entsprechenden Flugzeugtypen anhand der Anzahl der Starts und ihren jeweiligen Anteil für 1990 bis 2009.

**Tab. 23: Übersicht über die Anzahl und Anteile der Starts unterschieden nach EMEP-Qualität für den Zeitraum 1990 - 2009**

EMEP-Qualität	Anzahl Starts (1990-2009)	Anteil Starts (1990-2009)
2	4.380.161	25,10 %
3	287.603	1,65 %

Quelle: DESTATIS Datenabfrage, DLR- und EMEP Emissionsdatenbank

Die Auswertung zeigt, dass immerhin rund ein Viertel aller Starts im gesamten Zeitraum mit Flugzeugtypen durchgeführt wurden, die in der DLR-Datenbank direkt verfügbar und für die in der EMEP-EEA-Datenbank nur ähnliche Typen vorhanden sind. Allerdings lassen sich die DLR-Daten, wie die folgende Auswertung zeigt, nicht ohne weiteres mit den EMEP-EEA-Daten vergleichen.

### Vergleich der Emissionsfaktoren gleicher Typen

Die DLR-Daten haben keine Angaben zu Emissionen der Phasen Taxi-in und Taxi-out. Des Weiteren sind die Distanzklassen anders eingeteilt und es wird nicht in so viele Distanzklassen und somit Emissionsfaktoren unterschieden wie bei EMEP. Die Emissionsfaktoren des DLR gelten ausschließlich für JET-Flugzeuge. Bei EMEP hingegen sind auch Emissionsfaktoren für Turbopropellerflugzeuge verfügbar. Zudem scheint die Datenbasis des DLR etwas älter zu sein als die von EMEP.

Zum Vergleich wurden die Emissionsfaktoren für den Reiseflug aus der DLR-Datenbank für Flugzeugtypen, die in beiden Datenbanken vorhanden sind, ermittelt und mit EMEP-EEA verglichen. Die Ergebnisse sind in Tab. 24 zusammengefasst.

**Tab. 24: Vergleich der Emissionswerte für den Reiseflug**

Flugzeugtyp	mkr-EMEP/DLR-Ratio		NO <sub>x</sub> -EMEP/DLR-Ratio		HC-EMEP/DLR-Ratio		CO-EMEP/DLR-Ratio	
	463/500km	926/1.000km	463/500km	926/1000km	463/500km	926/1.000km	463/500km	926/1.000km
B737-100	0,80	n.v.	0,78	n.v.	2,59	n.v.	1,52	n.v.
B737-400	0,89	n.v.	0,90	n.v.	2,57	n.v.	1,10	n.v.
A330	0,82	0,85	1,12	0,78	11,16	10,02	1,75	1,50
B727	0,79	0,82	0,54	0,80	2,37	1,87	1,38	1,46
B747-400	n.v.	0,95	n.v.	1,36	n.v.	2,02	n.v.	1,01
B767-300	0,81	0,90	1,03	1,12	1,52	2,70	1,22	1,02
BAC1-11	0,95	0,96	0,86	0,88	0,06	0,06	0,31	0,33
DC10	0,96	1,06	1,32	1,45	4,05	2,31	1,17	0,75
F100	0,97	1,05	0,91	0,83	0,75	0,73	0,48	0,41

Quelle: IFEU 2010

Die Ergebnisse zeigen, dass die DLR-Daten tendenziell höhere Verbrauchswerte aufweisen als EMEP-EEA. Bei den übrigen Komponenten ist das Bild uneinheitlich.

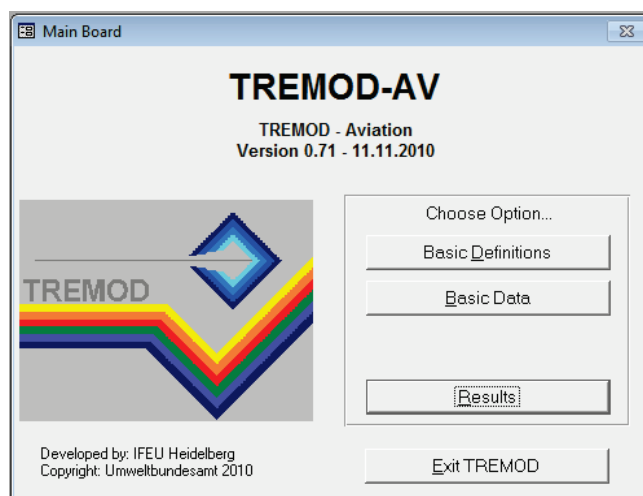
Aufgrund der geringen Vergleichbarkeit der Emissionsdaten und der Tatsache, dass beide Datensätze älteren Datums sind, wird auf eine Übernahme von DLR-Daten in die Emissionsberechnung verzichtet.

## 7.4 Kurzbeschreibung TREMOD-AV

### Installation von TREMOD-AV

- TREMOD-AV wird entpackt und danach mit MS Access gestartet. Es erscheint das Startformular (Tab. 25).
- Zunächst müssen die Ergebnisse berechnet werden. Dazu wird das Formular „Results“ aufgerufen.
- Im Formular Results (Tab. 26) unter „Calculation“ sind nacheinander „Calculate Results“ und „Calculate LTO-Airports“ zu starten. Die Berechnungen können jeweils mehrere Minuten dauern.

**Tab. 25 Startformular von TREMOD-AV**



### Abfrage von Ergebnissen

Das Formular „Results“ ermöglicht die Abfrage von Eingangsdaten (Data Input) und Ergebnissen für den gesamten Flugverkehr (Results) und die LTO-Emissionen auf den Flughäfen (LTO-Emissions Airports).

Vor der Abfrage können zwei Größen geändert werden:

**Real Distance:** Wenn der Haken gesetzt ist, werden die Emissionen für die realen Flugdistanzen berechnet. Ohne Haken wird die Großkreisentfernung verwendet.

**EFW (Emission Weighting Factor):** Gibt an, um welchen Faktor die Klimawirksamkeit in Reiseflughöhe über neun Kilometer höher ist als die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mit dem voreingestellten Faktor 2,4 wird im Gesamtergebnis eine um den Faktor zwei erhöhte Klimawirksamkeit berechnet. Im Ergebnis werden sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne EWF (CO<sub>2</sub>) als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit EWF (CO<sub>2ewf</sub>) ausgegeben. Innerhalb des IPCC wird der Faktor auch „Radiative Forcing Index“ (RFI) genannt. In IPCC (2007) wird der RFI auf einen Wert zwischen 1,9 und 4,7 geschätzt.

**Tab. 26 Ergebnisformular von TREMOD-AV**

**Results**

☒ Real Distance      EWF: **2,4**

Total	+Energy	+PV GV
Per Flight Phase		
Flight Phase and Traffic Relation	+Energy	+ PV GV
Per Quality	+Energy	Quality Pivot Chart
Per Aircraft Type		IPCC Types. Pivot Chart

**Data Input**

Traffic total      Performance Total

Traffic Relation      Performance Relation

T-Relation+Distance      P-Relation+Distance

**Calculation**

Calculate Results

Calculate LTO Airports

Delete Results (save space)

**LTO-Emissions Airports**

Total	+Energy
Per Airport	+Energy
Per Airport and IPCC-Type	Airport/IPCC-Type: Pivot Chart

Back...

## 8 Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen** Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland; Erscheinungsweise jährlich; <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63>
- BAFA** Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Amtliche Mineralölzeiten für die Bundesrepublik Deutschland; Erscheinungsweise monatlich  
[http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel\\_rohoel/amtliche\\_mineraloelzeiten/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/amtliche_mineraloelzeiten/index.html)
- BAZL 2007** Rindlisbacher, T.: Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren, Zusammenfassender Bericht, Juni 2007.
- Corinair 2006** EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2006. EEA technical report No. 11/2006
- DLR 1997** Döpelheuer, A.: F + E - Vorhaben 105 06 085. Emissionsmodellierung. Abschlussbericht, Juli 1997.
- Döpelheuer 2002** Anwendungsorientierte Verfahren zur Bestimmung von CO, HC und Ruß aus Luftfahrttriebwerken, Dissertationsschrift des DLR, Institut für Antriebstechnik, Köln, 2002
- EcoTransIT 2010** IFEU, IVE, Öko-Institut: EcoTransIT Methodology Report; im Auftrag von DB Schenker und UIC; Berlin-Hannover-Heidelberg-Paris; Mai, 2010
- Eurocontrol 2004** Jeline, F.; Carlier, S.; Smith J.: Eurocontrol The Advanced Emission Model (AEM3. EEC Report EEC/SEE/2004/004.
- Eurocontrol 2010** Auswertungen von Eurocontrol für das Umweltbundesamt
- EU 2009** COMMISSION DECISION of 16 April 2009 amending Decision 2007/589/EC as regards the inclusion of monitoring and reporting guidelines for emissions and tonne-kilometre data from aviation activities (notified under document number C(2009) 2887) (Text with EEA relevance) (2009/339/EC)
- EMEP-EEA 2009** Winther, M., Rypdal, K.: EMEP EEA Emission Inventory Guidebook 2009, Civil & Military Aviation (NFR 1.A.3.a, 1.A.5.b); May 2009.
- FOCA 2009** Rindlisbacher, T.: Guidance on the Determination of Helicopter Emissions. Edition 1. March 2009.
- IPCC 1999** Penner, J.E.; et al.: Intergovernmental Panel on Climate Change: Aviation and the Global Atmosphere.
- IPCC 2006a** Datenbank für Emissionsfaktoren vom IPCC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
- IPCC 2006b** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC 2007:** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- LH 2010** Deutsche Lufthansa: Balance – Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit im Lufthansa-Konzern, Ausgabe 2010
- StatBA 6.2** Statistisches Bundesamt: Luftverkehr auf allen Flugplätzen. Fachserie 8, Reihe 6.2; erscheint jährlich
- StatBA 6.1** Statistisches Bundesamt: Luftverkehr auf ausgewählten Flugplätzen. Fachserie 8, Reihe 6.1; erscheint jährlich
- TÜV Rheinland 2000** F + E - Vorhaben 105 06 085. Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs. Endbericht; Januar 2000.
- UBA 2009** Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2007, Umweltbundesamt 2009.
- Öko-Institut 2007** Emissionsberichterstattung im Luftverkehr. Vorläufiger Endbericht zum F+E-Vorhaben 201 42 258. Berlin, November 2007.

**Öko-Institut 2009** Graichen, J.; Gores, S.; Herold, A.: Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs. Endbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 306 16 019 für das Umweltbundesamt, Juli 2009.



## 9 Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AvGas	Flugbenzin
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAZL	Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz
CCD	Climb, Cruise, Descend (= Reiseflug / Cruise oberhalb 3.000 Fuß)
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CORINAIR	CORe INventory of AIR emissions
DESTATIS	Statistisches Bundesamt Deutschland
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
EEA	European Environment Agency
EF	Emissionsfaktor
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
Flight Stage	Flugbezogene Daten
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
IDAC_Model	Nummer des Flugzeugtyps in TREMOD-AV (alle Typen nach DESTATIS)
IDEM_Model	Nummer des Flugzeugtyps mit vorhandenen Emissionsdaten in TREMOD-AV
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LTO	Landing-Take-off-Cycle (Lande-Start-Zyklus ab und bis 3.000 Fuß Flughöhe)
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (= HC abzüglich CH <sub>4</sub> )
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide (Sammelbezeichnung für NO und NO <sub>2</sub> )
OFOD	On-Flight Origin and Destination: streckenbezogene Daten
PM <sub>10</sub>	Particulate Matter (Feinstaub) mit Durchmesser kleiner als 10 µm

Prop	Flugzeug mit Kolbenmotor, meist mit Flugbenzin betrieben
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TREMOT	TRansport Emission MODeI
TREMOT-AV	TRansport Emission MODeI – AViation
Turboprop	Flugzeug mit Strahltriebwerk, welches einen Propeller antreibt
ZSE	Zentrales System Emissionen