

TEXTE

32/2010

Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs

Förderkennzeichen 360 16 019
UBA-FB 001364

Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs

von

Jakob Graichen

Sabine Gores

Anke Herold

Öko-Institut e.V., Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3949 verfügbar.

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

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 3.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Frank Wetzel
Fachgebiet I 2.6 Emissionssituation
Michael Kotzulla

Dessau-Roßlau, Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Methodik	6
3	Beschreibung des Berechnungsmodells.....	7
3.1	Verbrauchsangaben zum Flugtreibstoff	7
3.2	Prozentsatz für inländische Flüge	7
3.3	Aufteilung des Kerosinverbrauchs auf die beiden Flugphasen.....	9
3.4	Ermittlung der Schadstoffe durch Kerosin.....	11
3.5	Emissions- und Korrekturfaktoren von Kerosin.....	12
3.6	Ergebnisse der Emissionsberechnung für Kerosin	21
3.7	Behandlung von Ottokraftstoff.....	25
3.8	Übergabe an das ZSE.....	27
3.9	Eingabehilfen, Sicherheitsabfragen und Blatt mit Abweichungen zu Vorjahren	27
3.10	Unsicherheiten.....	28
3.11	Ausblick	30
4	Literatur-Bericht.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1	Anteil nationaler Flugverkehr am gesamten Kerosinverbrauch.....	9
Abbildung 3-2	Verlauf der NO _x -Emissionsfaktoren für den nationalen Flugverkehr	17
Abbildung 3-3	Verlauf der NO _x -Emissionsfaktoren für den internationalen Flugverkehr	18
Abbildung 3-4	CO ₂ -Emissionen in den beiden Flugphasen	21
Abbildung 3-5	Vergleich der Methan-Emissionen mit der bisherigen Berechnung.....	22
Abbildung 3-6	Vergleich der Lachgas-Emissionen mit der bisherigen Berechnung.....	23
Abbildung 3-7	Vergleich der NO _x -Emissionen mit denen von Eurocontrol und den bisherigen Berechnungen	24
Abbildung 3-8	Vergleich der SO ₂ -Emissionen mit der bisherigen Berechnung.....	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Gestartete Flugzeugtypen im Jahr 2008 im gewerblichen Flugverkehr, Starts von ausgewählten Flugplätzen	10
Tabelle 3-2	Emissionsfaktoren aus der IPCC-Emissionsfaktoren Datenbank.....	13
Tabelle 3-3	Emissionsfaktoren für NO _x , CO und HC aus IPCC 1999.....	15
Tabelle 3-4	Emissionsfaktoren für NO _x und CO nach Flugphasen aus IPCC (2006)	16
Tabelle 3-5	Verhältnis der nationalen zu internationalen Emissionsfaktoren nach IPCC	16
Tabelle 3-6	Koeffizienten zur Berechnung der VOC und TOG	19
Tabelle 3-7	Emissionsfaktoren für Kerosin	20
Tabelle 3-8	Emissionsfaktoren für Flugbenzin (1990-2008)	27
Tabelle 3-9	Gesamt- und Teilunsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren.....	29

1 Einleitung

Im vorhergehenden F+E Vorhaben 201 42 258 wurde durch das Öko-Institut ein Excel-basiertes Berechnungsinstrument zur Ermittlung der flugbedingten Treibhausgasemissionen erstellt. Trotz mehrmaliger Verlängerung konnte innerhalb dieses Vorhabens aufgrund noch laufender Verhandlungen zwischen Eurocontrol und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit noch nicht auf durch Eurocontrol übermittelte Daten zugegriffen werden.

In diesem F+E-Vorhaben sollten die Daten nach abgeschlossener Verhandlung mit Eurocontrol aktualisiert und das Berechnungsinstrument weiterentwickelt werden. Die Verhandlungen mit Eurocontrol konnten im Projektzeitraum jedoch erneut nicht positiv abgeschlossen werden, so dass die Daten noch immer nicht für die Berechnung des deutschen Treibhausgasinventars zur Verfügung stehen.

Zur Erfüllung verschiedener Berichtsverpflichtungen ist das Berechnungstool nun in der Form erweitert worden, dass eine Berechnung nach Tier 2a durchgeführt wird, also alle Aktivitätsraten und Emissionen zusätzlich zu der Trennung nach nationalen und internationalen Flügen auch getrennt nach den beiden Flugphasen LTO-Zyklus (Landing/Take-Off Zyklus) und Cruise berichtet werden können. Außerdem erfolgte eine Anpassung der Ausgabeformate des Tools, um einen fehlerfreien und einfachen Datenaustausch mit dem Zentralen System Emissionen (ZSE) zu gewährleisten. Zu diesem Zweck ist die Übergabe von aus den Emissionen zurückgerechneten Emissionsfaktoren (Implied Emission Factors) vorgesehen, die es innerhalb des ZSE ermöglichen, entsprechende Emissionen zu berechnen. Außerdem ist im Übergabeformat für das ZSE eine Dokumentation jedes einzelnen Wertes vorgesehen, sowie die Angabe von Fehlerwahrscheinlichkeiten.

Generell ist das Excel-Tool anwenderfreundlicher und übersichtlicher gestaltet und so erweitert worden, dass es in dieser Form für die Berichterstattung bis zum Jahr 2020 vorbereitet ist.

Der Bericht ist untergliedert in eine kurze Einführung in die Methodik, einer anschließenden detaillierten Beschreibung der Berechnungen und des Modells sowie einem Kapitel, das als Berichtsteil im kommenden Inventarbericht dienen soll.

2 Methodik

Zur Emissionsberichterstattung ist geplant, dass Deutschland als Pilotnutzer Daten und Modelle der europäischen Luftsicherheitsbehörde Eurocontrol verwendet. Eurocontrol verfügt über detaillierte und aufbereitete Daten der geflogenen Wegstrecken in allen Partnerstaaten und hat, ausgehend von diesen Daten, zwei Methoden implementiert, um Emissionen des Luftverkehrs zu berechnen: ANCAT 3 und das Advanced Emission Model 3 (AEM 3). ANCAT 3 entspricht dem Tier 3a-Verfahren der IPCC Guidelines 2006, AEM 3 dem Tier 3b-Verfahren (IPCC 2006a, S. 3.61). Beide Methoden berechnen die Emissionen auf Grundlage von einzelnen Flugbewegungen ohne den Treibstoffverbrauch mit nationalen Energiebilanzen abzugleichen.

Bislang liegen nur Daten für 2003 bis 2006 vor, die für einen von Norwegen und der EEA organisierten Workshop im Jahr 2007 durch Eurocontrol zur Verfügung gestellt wurden (ETC/ACC 2007). Diese Daten wurden nur für die Berechnung des Verhältnisses des Kerosinverbrauchs für den nationalen Flugverkehr zum gesamten Kerosinverbrauch verwendet. Die Berechnung aller Emissionen erfolgt nach der Tier 2a-Methode (IPCC 2006a+b), also unter getrennter Betrachtung der Flugbetriebszustände LTO-Zyklus (Landing/Take-off-Zyklus, d.h. Flugbewegungen bis 3.000 Fuß bzw. ca. 915 m) und Cruise (über 915 m). Die Emissionen werden dabei durch die Multiplikation des jeweiligen Treibstoffverbrauchs mit den Emissionsfaktoren nach Betriebszuständen ermittelt. Als Grundlage des jeweiligen Treibstoffverbrauchs dient der jährliche Kerosinabsatz nach der Energiebilanz (AG Energiebilanzen 2007) sowie den Daten des BAFA (2007+2008). Die Aufteilung des Kerosinverbrauchs in einen nationalen und internationalen Anteil wird in Kapitel 3.2 detailliert erläutert, die Aufteilung auf die beiden Flugphasen erfolgt auf Basis der Anzahl der Starts nach den Angaben des Statistischen Bundesamtes (siehe Kapitel 3.3).

CO₂, H₂O und SO₂- Emissionen sind unabhängig von der verwendeten Tier-Methode, da sie allein auf der Menge bzw. den Eigenschaften des eingesetzten Treibstoffs beruhen. Emissionen von NMVOC, CH₄, CO, HC, NO_x und N₂O hingegen sind abhängig von Motoren, Flughöhen, Flugphasen u.a. und werden mit höheren Tier-Methoden genauer beschrieben. NO_x, CO und HC werden durch das AEM 3-Modell ermittelt. Sobald diese Daten für die deutsche Inventarberichterstattung verfügbar sind, wird die Emissionsberichterstattung auf diesen basieren.

Der eingesetzte Ottokraftstoff (Flugbenzin) wird seit dem Jahr 2007 nicht mehr dem verbrauchten Kerosin zugerechnet sondern eigenständig berichtet. Diese Flugverkehrsemissionen werden mit angepassten Emissionsfaktoren und Heizwerten separat nach Tier 1 berechnet, wie in IPCC 2006a vorgeschlagen. Eine Aufteilung in einen nationalen und internationalen Anteil ist hier nicht erforderlich, denn Flugbenzin findet nur in kleineren, hauptsächlich inländisch verkehrenden Flugzeugen Verwendung. Diese konservative Annahme führt allerdings zu einer leichten Überschätzung der nationalen Emissionen.

3 Beschreibung des Berechnungsmodells

3.1 Verbrauchsangaben zum Flugtreibstoff

Die Verbrauchsangaben für Kerosin und Flugbenzin basieren auf den Daten der Energiebilanz. Selbst bei einer erfolgten Datenlieferung von Eurocontrol werden diese nicht für die Ermittlung des Brennstoffverbrauchs verwendet, da diese nicht exakt die gleichen Flugbewegungen abdecken, wie für das Inventar erforderlich ist. So werden von Eurocontrol nur die Flüge erfasst, die von der zivilen Luftsicherung kontrolliert werden bzw. Überfluggebühren bezahlen müssen. Nicht enthalten sind z.B. Regierungsflüge, Trainings- und Rundflüge. Außerdem sind die Daten für internationale Flüge mit größeren Unsicherheiten behaftet, da diese mit Doppelzählungen/Auslassungen durch Berichterstattung unterschiedlicher nationaler Flugsicherheitsorganisationen behaftet sind und außerhalb des europäischen Luftraums nicht die vollständige Flugstrecke überwacht wird. Auch in Hinblick auf die grundsätzliche Harmonisierung des deutschen Inventars ist eine Verwendung der Daten der Energiebilanz unerlässlich. Diese schließen zudem militärische Flüge vollständig aus, bei Eurocontrol hingegen ist ein nicht definierter Anteil an militärischen Flügen aus methodischen Gründen mit erfasst. Deshalb wird durch die Verwendung des Treibstoffverbrauchs aus der Energiebilanz sichergestellt, dass der gesamte Kerosinabsatz für den zivilen Luftverkehr im Inventar berichtet wird.

Da die vollständige Energiebilanz oftmals erst mit größerer Verzögerung zur Verfügung steht (das bedeutet zum Zeitpunkt des Schreibens des Berichts nur bis zum Jahr 2006), werden für die Jahre 2007 und 2008 mit guter Näherung die Angaben zum Kerosinverbrauch aus den amtlichen Mineralöl-daten für die Bundesrepublik Deutschland verwendet, die vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) veröffentlicht werden.

Für Ottokraftstoff, der hauptsächlich im nationalen Flugverkehr zum Einsatz kommt, werden analog die Daten aus der vollständigen Energiebilanz übernommen sowie für die Jahre 2007 und 2008 aus den BAFA-Tabellen.

Im Berechnungstool wurde den Energiebilanz-Daten Priorität eingeräumt, das heißt, dass diese, sobald sie verfügbar sind und an entsprechender Stelle eingetragen wurden, anstelle der BAFA-Daten verwendet werden und damit eine Neuberechnung des betreffenden Jahres stattfindet.

3.2 Prozentsatz für inländische Flüge

Gemäß dem bottom-up Ansatz der IPCC-Richtlinien ist zur Ermittlung der Aufteilung des gesamten Flugverkehrs in nationale und internationale Flüge der für die jeweiligen Flüge verwendete Flug-Treibstoff zu verwenden (IPCC 2006a, S. 3.65). Eurocontrol wird dort als geeignete Datenbasis bezeichnet.

Für die Jahre 2003 bis 2008 liegen Daten von Eurocontrol für den Treibstoffverbrauch im nationalen und internationalen Flugverkehr nach dem ANCAT-Modell vor, die zum

einen (2003 bis 2006) für einen von Norwegen und der EEA organisierten Workshop im Jahr 2007 zur Verfügung gestellt (ETC/ACC 2007), zum anderen (für 2007 und 2008) auf Anfrage übermittelt wurden. Werden diese entsprechend dem IPCC-Ansatz ins Verhältnis gesetzt, erhält man Anteile von 9,5 bis 7,9 % für den inländischen Flugverkehr, also Werte deutlich unter der alten Annahme von 20 %.

Für die Jahre 1996-2001 sind nur CO₂-Emissionen von Eurocontrol veröffentlicht worden, die mit erheblich größeren Unsicherheiten behaftet sind. Unter Verwendung des über die Jahre 2003 bis 2006 konstanten Emissionsfaktors von 3,15 t CO₂ pro t Treibstoff ist eine Berechnung des Kerosinverbrauchs für Inlandsflüge möglich.

Wegen der Ungenauigkeiten insbesondere der internationalen Daten von Eurocontrol wird für diese Jahre ein Abgleich über die nationale Energiebilanz durchgeführt. Dazu werden die Angaben der Energiebilanz über den gesamten Kerosinverbrauch als Basis verwendet, um mit dem von Eurocontrol errechneten Verbrauch für inländische Flüge den prozentualen Anteil am gesamten Verbrauch zu berechnen:

Formel 1

$$\text{Anteil}_{national} = \frac{\text{Verbrauch}_{Eurocontrol,national}}{\text{Verbrauch}_{Energiebilanz,gesamt}}$$

Der auf diese Weise ermittelte Anteil inländischer Flüge ergibt Werte von 11,4 bis 13,1 %. In Abbildung 3-1 sind diese Werte grafisch dargestellt. Wird eine exponentielle Trendfunktion durch diese aus den Daten von Eurocontrol (und der Energiebilanz) ermittelten Punkte gelegt, ergibt sich für das Basisjahr ein Wert von 20 %, der sich mit dem aus der UBA-Studie (UBA, 2001) deckt. Die Verwendung einer exponentiellen Funktion ist berechtigt, da auch der Anteil der nationalen Flugpassagiere an den gesamten Passagieren ein exponentielles Verhältnis aufzeigt.

Dieser Wert wird damit für das Basisjahr bestätigt und weiter genutzt. Für die Jahre 2003 und folgende wird der Anteil der nationalen Emissionen direkt von Eurocontrol übernommen.

Für die Jahre von 1991 bis 2002 wird die Trendfunktion verwendet, um den Anteil inländischer Flüge am Gesamt-Treibstoffverbrauch zu ermitteln. Für die Jahre 1996 bis 2001 werden nicht die berechneten Werte genutzt, da diese durch die Unsicherheiten der Berechnung keine größere Genauigkeit aufweisen als die Trendfunktion. Sollten für diese Jahre doch noch mit dem AEM 3-Modell berechnete Daten durch Eurocontrol zur Verfügung gestellt werden können, sollten diese verwendet werden. Eine Neuberechnung der Trendfunktion für die dann fehlenden Jahre könnte dann erforderlich werden.

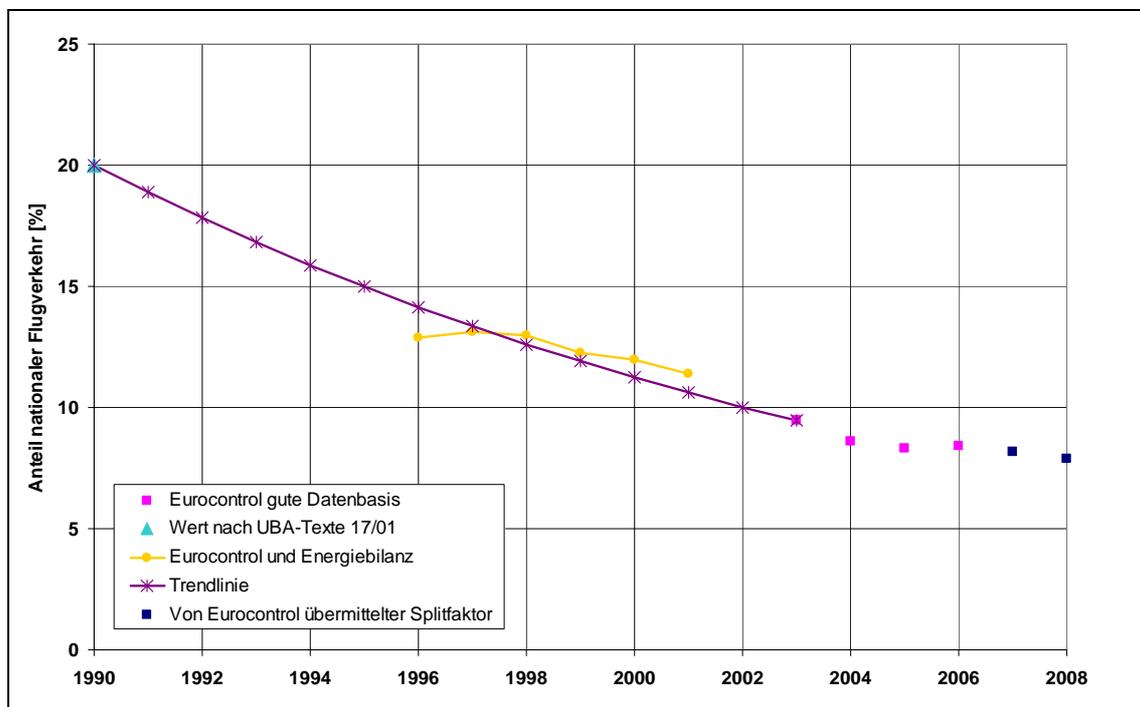
Im Folgenden werden die Schritte zur Berechnung der konsistenten Zeitreihe des Anteils der nationalen Emissionen an den Gesamtemissionen des Flugverkehrs nochmals dargestellt:

- 1) für 1990 wird ein Anteil von 20 % für den nationalen Flugverkehr angenommen

- 2) für 1991 bis 2002 wird eine exponentielle Trendfunktion verwendet, die auf den Werten für 1990, 2003 sowie den über die Energiebilanz skalierten Werten für 1996 bis 2001 basiert.
- 3) Für die Jahre 2003 und folgende wird der von Eurocontrol berichtete Wert direkt verwendet. (Damit wird auch der im vorangegangenen Inventar verwendete durch Extrapolation erzeugte Wert für 2007 durch einen originären Eurocontrol-Wert ersetzt.)

Abbildung 3-1 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Schritte sowie die gesamte Zeitreihe.

Abbildung 3-1 Anteil nationaler Flugverkehr am gesamten Kerosinverbrauch



Quellen: UBA 2001; Eurocontrol; AG Energiebilanzen (2007a+b); eigene Darstellung

3.3 Aufteilung des Kerosinverbrauchs auf die beiden Flugphasen

Durch Multiplikation des Kerosinverbrauchs aus der Energiebilanz bzw. den BAFA-Daten mit dem in Kapitel 3.2 berechneten Prozentsatz wird der nationale Kerosinverbrauch ermittelt. Die sich ergebende Differenz ist der internationale Kerosinverbrauch.

Die Aufteilung nach den beiden Flugphasen LTO-Zyklus und Cruise erfolgt auf Basis der Anzahl der Flugverkehrsbewegungen. Diese werden jeweils für die nationalen und internationalen Flüge von Destatis übermittelt. Destatis unterscheidet zwischen ausgewählten und nicht ausgewählten Flugplätzen. Der Anteil der nicht ausgewählten Flugplätze am Verkehr innerhalb Deutschlands beträgt laut Statistischem Bundesamt

(StBA) 2008, Tabelle 3.1.7 im Jahr 2007 0,8 % bezogen auf die Fluggäste und bezogen auf den Frachtverkehr 0,4 %. Im internationalen Flugverkehr liegt der ausgewiesene Prozentsatz im Jahr 2007 bei 0 %, sowohl bezogen auf den Passagier- als auch Frachtverkehr. Des Weiteren wird beim Statistischen Bundesamt zwischen gewerblichen und nichtgewerblichen Flügen unterschieden. Der nichtgewerbliche Flugbetrieb besteht nach Tabelle 9.1 (StBA 2008) ausschließlich aus Motorflugzeugen, Hubschraubern und sonstigen Luftfahrzeugen. In der Kategorie „Motorflugzeuge“ sind auch kerosinbetriebene Flugzeugtypen enthalten, deren Anteil nicht bekannt ist¹.

Übermittelt wurden durch Destatis die Starts des gewerblichen Flugverkehrs für innerdeutsche Flüge von allen Flugplätzen sowie die Starts gewerblicher Flüge ins Ausland von ausgewählten Flugplätzen. Es wird hier davon ausgegangen, dass der Anteil der kerosinbetriebenen Flugzeugtypen im nicht-gewerblichen Verkehr gering und insbesondere durch kleine Flugzeuge gekennzeichnet ist (z.B. auch Hubschrauber). Die Vernachlässigung dieser Flugbewegungen ist aus dem letztgenannten Grund hier auch gewünscht, da ein durchschnittlicher Betrag für den Kerosinverbrauch im LTO-Zyklus angesetzt wird, der für kleine Maschinen zu hoch wäre. Auch die Beschränkung der internationalen Flüge auf die ausgewählten Flugplätze erscheint nach dem oben angestellten Abgleich mit StBA 2008, Tabelle 3.1.7 völlig ausreichend. Allein der Anteil des motorbetriebenen gewerblichen Flugverkehrs erscheint hier als nicht genau quantifizierbare Größe. Das statistische Bundesamt hat dafür Daten für das Jahr 2008 zur Verfügung gestellt, die einen groben Überblick über die Verteilung der Flugzeugtypen erlauben (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 3-1 Gestartete Flugzeugtypen im Jahr 2008 im gewerblichen Flugverkehr, Starts von ausgewählten Flugplätzen

Flugzeugtyp Klasse	Kategorie nach Destatis	Anzahl der Starts 2008			
		national [-]	international [-]	national [%]	international [%]
Gesamt		389.143	749.972	100	100
Kleinere Flz. bis 14t	0	86.482	18.311	22	2
Prop.- und Strahltrieb. Flz. 14-20t	1+2	12.443	23.532	3	3
Prop.Flz. (Turbo+Kolbenmotor) 20-75t	3+4	13.944	38.757	4	5
Prop.Flz. (Turbo+Kolbenmotor) über 75t	5	7	25	0	0
Strahltrieb. Flz. (Airbus/Sonst.) 75-175t	7	30.283	40.783	8	5
Strahltrieb. Flz. (Boeing) 75-175t	7	2.688	20.066	1	3
Strahltrieb. Flz. 20-75t	6	242.615	531.862	62	71
Strahltrieb. Flz. über 175t	8	681	76.636	0	10
Summe Kategorie 6-8		276.267	669.347	71	89

Quelle: Statistisches Bundesamt, persönliche Kommunikation mit Frau Walter

Diese Untergliederung ermöglicht leider keine genaue Unterscheidung der Flugzeugtypen nach Brennstoffart, allein in den Kategorien 6 bis 8 sind ausschließlich kerosinbetriebene Flugzeugtypen enthalten. Eine genauere Untergliederung ist prinzipiell mög-

¹ Gespräch mit Frau Walter vom Statistischen Bundesamt am 30.6.2009.

lich, wäre jedoch zeitaufwendig und kostenpflichtig. In den Kategorien 0 bis 5 befinden sich keine Flugzeugtypen, die einer Auswahl von wichtigen Typen nach IPCC 2006 S. 3-70 und 71 zuordenbar wären. Es ist anzunehmen, dass diese Typen erheblich geringere Verbräuche im LTO-Zyklus aufweisen als der hier angesetzte durchschnittliche Kerosinverbrauch. Um möglichst ausschließlich die Anzahl der Starts der kerosinbetriebenen Flugzeuge zu erhalten, werden die jährlichen Starts um durchschnittliche, prozentuale Werte reduziert, basierend auf den Angaben für das Jahr 2008 (eine zeitliche Differenzierung ist im Augenblick nicht möglich, erscheint aber auch nicht unbedingt erforderlich). Es wird deshalb angenommen, dass 75 % der nationalen und 90 % der gewerblichen internationalen Starts von kerosinbetriebenen Flugzeugtypen stammen. Die Zahlen sind etwas großzügiger geschätzt als die reinen Summen der Kategorien 6 bis 8, um einen Anteil von kerosinbetriebenen Flugzeugtypen in den Kategorien 0 bis 5 zu berücksichtigen.

Für die Aufteilung des nationalen und internationalen Kerosinverbrauchs in Flugphasen wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Flugbewegungen der Anzahl der LTO-Zyklen entspricht, da ein LTO-Zyklus sowohl aus Start- als auch Landephase besteht. Über den Ansatz nach den IPCC Guidelines 2006b wird für den nationalen Flugverkehr ein durchschnittlicher Verbrauch von 850 kg Kerosin für den LTO-Zyklus angesetzt. Dieser multipliziert mit der Anzahl der Flugbewegungen ergibt den Kerosinverbrauch für den LTO-Zyklus. Der Verbrauch für die Flugphase Cruise ermittelt sich dann aus der Differenz des Gesamtverbrauchs und des Verbrauchs im LTO-Zyklus.

Für den internationalen Flugverkehr erfolgt diese Berechnung analog. Da jedoch im Durchschnitt eher größere Flugzeugtypen eingesetzt werden, wird ein höherer LTO-Verbrauch verwendet. Dazu wird ein Wert von 1.675 kg Kerosin / LTO angesetzt, siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3.5. Bei internationalen Flügen müssen die Emissionen ermittelt werden, die durch den aus Deutschland abgehenden Flug emittiert werden, d.h. der Take-off in Deutschland sowie die Landung im Ausland. Die Berechnung der Emissionen ist damit identisch zur Berechnung der Emissionen des nationalen Flugverkehrs.

Nach dieser Berechnungsmethodik ergeben sich für den nationalen Flugverkehr Anteile des LTO-Zyklus von 23 bis 40 % am Gesamtkerosinverbrauch, wobei sich der niedrigste Wert im Jahr 1990 errechnet: ausgehend von 23 % erfolgt ein nahezu linearer Anstieg auf 40 % im Jahr 2004. Erwartungsgemäß ist dieser Anteil im internationalen Flugverkehr mit 13 bis 15 % erheblich niedriger. Der maximale Wert wird aber auch hier für das Jahr 2004 berechnet.

Für die Jahre, in denen Daten zum Kerosinverbrauch von Eurocontrol aufgeteilt nach Verbrauch im LTO-Zyklus und Cruise vorliegen, werden die jeweiligen Prozentzahlen auf den nationalen und internationalen Kerosinverbrauch übertragen.

3.4 Ermittlung der Schadstoffe durch Kerosin

Eine Datenlieferung von Eurocontrol fand zum Zeitpunkt der Erstellung des Werkzeugs zur Berechnung der Flugverkehrsemissionen nicht statt. Aufgrund einer telefonischen

Zusage eines Mitarbeiters von Eurocontrol (Stefano Mancini) ist davon auszugehen, dass von Eurocontrol die Emissionen von NO_x, HC und CO (berechnet nach AEM 3-Modell, also nach Tier 3b), jeweils untergliedert nach nationalen und internationalen Emissionen und nach den Betriebszuständen LTO-Zyklus und Cruise, ab dem Jahr 2003 geliefert werden könnten.

Das Berechnungstool ist so aufgebaut, dass, sobald diese vorliegen, Daten von Eurocontrol verwendet werden. Jedoch können die Emissionen auch ohne diese Eingaben ermittelt werden.

Bei Vorhandensein der von Eurocontrol übermittelten Emissionen werden diese nicht direkt in das deutsche Inventar übernommen, sondern zuvor mit einem Anpassungsfaktor skaliert, der das Verhältnis des gesamten Kerosinverbrauchs der Energiebilanz zu den Eurocontrol-Daten darstellt.

Für alle Jahre, in denen keine Eurocontrol Daten vorliegen, werden die Emissionen nach der Tier 2a-Methode ermittelt, also durch Multiplikation der Brennstoffverbräuche für die beiden Betriebsarten mit den entsprechenden Emissionsfaktoren.

3.5 Emissions- und Korrekturfaktoren von Kerosin

Die Emissionsfaktoren vieler Gase unterscheiden sich in den beiden Flugphasen LTO-Zyklus und Cruise. In den vorhergehenden Inventarberechnungen wurden ausschließlich Mittelwerte über alle Flugphasen verwendet, mit der hier durchgeführten Überarbeitung der Berechnung erfolgt eine getrennte Berücksichtigung der Flugphasen. Dafür mussten die Emissionsfaktoren vollständig überarbeitet werden. Als Grundlage dienten dazu die IPCC Emissionsfaktoren-Datenbank, der IPCC Bericht von 1999 „Aviation and the Global Atmosphere“ sowie die Corinair Guidelines 2006.

Üblicherweise werden die Emissionen für den LTO-Zyklus pauschal für den gesamten Zyklus angegeben, wohingegen für die Cruise-Phase Emissionsfaktoren pro Menge verbrauchten Flugtreibstoffes angegeben werden. In dem Excel-Berechnungstool werden die angegebenen Emissionen pro LTO-Phase mit Hilfe des in der Quelle zu Grunde gelegten Kerosinverbrauchs pro LTO-Zyklus in Emissionsfaktoren umgerechnet. In der folgenden Tabelle sind die Angaben zum LTO-Verbrauch und Emissionsfaktoren in der Cruise-Flugphase aus der IPCC Emissionsfaktoren-Datenbank (IPCC 2006b) dargestellt.

Tabelle 3-2 Emissionsfaktoren aus der IPCC-Emissionsfaktoren Datenbank

	Duchschnittliche Flotte				
	national		international		
	LTO	Cruise	LTO bei Flugzeugtyp mit		Cruise
			850 kg Kerosin / LTO	2.500 kg Kerosin / LTO	
kg/LTO	kg/t	kg/LTO		kg/t	
CO ₂	2.680	3.150	2.680	7.900	3.150
CH ₄	0,30	0,00	0,30	1,50	0,00
N ₂ O	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10
SO ₂	0,80	1,00	0,80	2,50	1,00
NO _x	10,20	11,00	10,20	41,00	11,0 - 17,0
NMVOG	2,60	0,70	2,60	15,00	0,7 - 2,7
CO	8,10	7,00	8,10	50,00	5,0 - 7,0

Quelle: IPCC (2006b)

Für die nationalen Angaben liefert die IPCC-Datenbank jeweils die Information, dass die Daten für Flugzeuge mit einem Kerosinverbrauch von 850 kg/LTO gelten. Für den internationalen Flugverkehr werden zusätzliche Werte für größere Flugzeugtypen angegeben, die einen Kerosinverbrauch von 2.500 kg Kerosin/LTO haben. Die unterschiedlichen Werte für die internationale Cruise-Flugphase werden nicht genauer spezifiziert. Hier wird angenommen, dass die unterschiedlichen Werte sich ebenfalls auf die Kerosinverbräuche beim LTO-Zyklus beziehen. Für die weiteren Berechnungen muss für den internationalen Flugverkehr ein durchschnittlicher Kerosinverbrauch angesetzt werden. Der Mittelwert der beiden angegebenen Flugzeugtypen nach IPCC 2006b beträgt 1.675 kg Kerosin/LTO, und liegt damit etwas über dem Wert der Corinair Guidelines 2006 in Tabelle 8.2. Dort werden Werte von 825 kg für nationale LTO-Zyklen sowie 1.617 kg für internationale Flüge vorgeschlagen (jeweils für die durchschnittliche Flotte). Hier wird der konservativere Ansatz einer etwas größeren Flotte und damit der Wert von 1.675 kg Kerosin/LTO nach IPCC 2006b gewählt.

Im Inventarbericht 2007 wurde ein **CO₂**-Emissionsfaktor von 3.150 g CO₂/kg Kerosin für alle Berichtsjahre, entsprechend den Werten für die Cruise-Flugphase nach IPCC 2006b, verwendet. Rechnet man die Emissionen der LTO-Phase nach der IPCC-Emissionsfaktoren-Datenbank mit Hilfe des Kerosinverbrauchs zurück, ergeben sich Werte von 3.153 und 3.160 g CO₂/kg Kerosin für Flugzeugtypen mit 850 bzw. 2.500 kg Kerosin pro LTO. Da der CO₂-Emissionsfaktor ausschließlich vom eingesetzten Treibstoff abhängt, scheint es sich hier um eine Rechenungenauigkeit zu handeln. Aus diesem Grund wird für beide Flugphasen national und international weiterhin ein CO₂-Emissionsfaktor von 3.150 g CO₂/kg Kerosin verwendet.

Emissionsfaktoren für **Methan und Lachgas** werden aus der IPCC-Emissionsfaktoren-Datenbank entnommen, wobei für die Rückrechnung der Mittelwerte des LTO-Verbrauches in Emissionsfaktoren für den internationalen Flugverkehr der oben besprochene Wert von 1.675 kg Kerosin/LTO-Zyklus verwendet wird.

Der Ausstoß von **Schwefeldioxid** ist direkt abhängig vom Schwefelgehalt des Kerosins, der regionalen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. Der von Eurocontrol verwendete Emissionsfaktor für Schwefeldioxid liegt mit 0,84 g SO₂/kg Kerosin zwischen den Werten, die bislang für das deutsche Inventar für die Jahre 1990 bis 1994 verwendet werden (1,08 – 1,03 g SO₂/kg Kerosin) und dem Wert für die Folgejahre (0,4 g SO₂/kg Kerosin). Die Angaben des IPCC (2006b, s. Tabelle 3-2), die sich mit 1 g SO₂/kg Kerosin in ähnlicher Größenordnung befinden wie die alten Inventar-Werte, beruhen auf einem Schwefelgehalt von 0,05 Gew%. Nach aktuellen Angaben des Fachausschusses für Mineralöl- und Brennstoff-Normung² (FAM) liegt der typische Wert für den Gesamtschwefelgehalt von Kerosin in Deutschland derzeit bei etwa 0,01 Gew%, also einem Fünftel des Ansatzes des IPCC. Im Inventarbericht 2009 wird ein Schwefelgehalt von 0,021 Gew% für Kerosin angesetzt, basierend auf Messungen aus dem Jahre 1998 (Döpelheuer 2002). Da ein durch verbesserte Verfahren und gesunkene Grenzwerte mit der Zeit abnehmender Verlauf sinnvoll erscheint, wird für diesen Emissionsfaktor ein Verlauf vorgesehen, der eine lineare Abnahme zwischen den Stützjahren 1990 (1,08 g SO₂/kg Kerosin), 1998 (0,4 g) und 2009 (0,2 g) vorsieht. Dabei wird von einer vollständigen Umsetzung des Schwefels in Schwefeldioxid ausgegangen. Wegen der direkten Abhängigkeit des Emissionsfaktors allein vom Schwefelgehalt des Kerosins werden für beide Flugphasen identische Werte verwendet.

Der Emissionsfaktor für **Wasserdampf** von Eurocontrol (2004) liegt bei 1.230 g H₂O/kg Kerosin, der von Corinair (2006) etwas höher bei 1.237 g H₂O/kg Kerosin. Um die Zahl der Quellen der Emissionsfaktoren zu begrenzen, wird der Wert von Corinair (2006) verwendet. Und zwar auch hier - da es sich um einen rein brennstoffspezifischen Wert handelt - wiederum für beide Flugphasen.

NO_x-, **CO**- und **HC-Emissionen** können ebenfalls mit Hilfe von Emissionsfaktoren berechnet werden. Ab dem Jahr 2003 bietet das Berechnungstool zusätzlich die Möglichkeit, die Daten von Eurocontrol als Basis zu verwenden, wodurch sich dann ein methodischer Bruch ergibt. Dabei werden die Eurocontrol-Daten nicht direkt genutzt, sondern mit einem Skalierungsfaktor beaufschlagt, der dem Verhältnis des Kerosinverbrauchs nach Eurocontrol und der Energiebilanz entspricht.

NO_x-Emissionen sind primär abhängig von der Technologie und nehmen mit höheren Druck- und Temperaturverhältnissen in den Brennkammern zu. Es erscheint grundsätzlich schwierig, wissenschaftlich gesicherte durchschnittliche Werte für Emissionsfaktoren zu erhalten: Zahlreiche Nachfragen bei unterschiedlichen Institutionen (BMU, DLR, AERO2K) eröffneten keine neuen Quellen für geeignete Werte. - Als allgemein übliche Werte werden die der IPCC Guidelines 2006 angesehen, die jedoch auf Rechenmodellen basieren, die schon leicht veraltet sind³. In IPCC (1999) sind NO_x-, CO- und HC-Emissionsfaktoren für die Jahre 1992 und 2015 von NASA, ANCAT und DLR

² Email-Kommunikation mit Dr. Feuerhelm, FAM Hamburg, 9.Juni 2009

³ Email-Kommunikation mit Chris Eyers, AERO2K, am 23.06.2009.

als Mittelwerte über alle Flugphasen aufgeführt (siehe folgende Tabelle). Die NO_x-Werte sind höher als die des IPCC für nationalen, aber unter denen für den internationalen Flugverkehr (siehe Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3). Auch diese Werte werden jedoch als überholt angesehen⁴.

Tabelle 3-3 Emissionsfaktoren für NO_x, CO und HC aus IPCC 1999

	1992	2015	Quelle
	g/kg Kerosin		
NO _x	12,6	13,7	NASA
NO _x	14	12,4	ANCAT
NO _x	14,2	12,6	DLR
CO	11,3	7,1	NASA
HC	2,3	1	NASA

Quelle: IPCC 1999: Aviation and the Global Atmosphere“, Kapitel 9: Aircraft Emissions

Da Drücke und Temperaturen in den Brennkammern seit 1990 kontinuierlich angestiegen sind, jedoch der Anteil an Triebwerken mit geringerem spezifischen Stickstoffoxid-ausstoß noch als sehr gering angesehen wird (s. UBA 2009), sollen die Annahmen der NASA nach Absprache mit dem Auftraggeber als Grundlage für die Zeitreihe der NO_x-Emissionen, aber auch der CO- und HC-Emissionen, dienen. Für 1990 bis 1991 wird der Wert von 1992 übernommen, für die Jahre ab 2015 die Werte von 2015, dazwischen erfolgt eine lineare Interpolation.

Da es sich bei diesen Werten um Mittelwerte (EF_{Mittelwert}) über beide Flugphasen handelt, sollten sie in Emissionsfaktoren für beide Flugphasen umgewandelt werden, da diese sich unterscheiden (s. Tabelle 3-2).

Der Emissionsfaktor für die LTO-Phase (EF_{LTO}) wird unter der Annahme berechnet, dass die Emissionsfaktoren der beiden Flugphasen im gleichen Verhältnis (V_{FP}) zueinander stehen wie die Emissionsfaktoren aus der IPCC Datenbank (2006b).

Formel 2

$$V_{FP} = \frac{EF_{Cruise}}{EF_{LTO}}$$

(EF_{Cruise} = Emissionsfaktor in der Cruise-Flugphase)

Dazu müssen die LTO-Emissionen aus der IPCC-Datenbank mit den jeweiligen Kerosinverbräuchen pro LTO-Zyklus in Emissionsfaktoren zurück gerechnet werden. Damit ergibt sich ein Emissionsfaktor von 12 kg NO_x/t Kerosin im LTO-Zyklus, der über dem Emissionsfaktor für Cruise liegt (11,0 kg NO_x/t). Bei den großen internationalen Flugzeugen mit 2.500 kg/LTO ist das Verhältnis umgekehrt (s. Tabelle 3-4).

⁴ Email-Kommunikation mit Herrn Heinen, BMU, am 2.07.2009

Tabelle 3-4 Emissionsfaktoren für NO_x und CO nach Flugphasen aus IPCC (2006)

	Umgerechnete EF für Flugzeugtypen mit				Verhältnis der EF beider Flugphasen für 850 kg Kerosin / LTO (V _{FP})
	850 kg Kerosin / LTO		2.500 kg Kerosin / LTO		
	LTO	Cruise	LTO	Cruise	
	kg / t Kerosin		kg / t Kerosin		
NO _x	12,00	11,00	16,40	17,00	0,917
CO	9,53	7,00	20,00	5,00	0,735

Quelle: IPCC 2006b, eigene Berechnungen

Für die Emissionen des nationalen Flugverkehrs wird der Emissionsfaktor für den LTO-Zyklus nach der folgenden Formel berechnet, die sich durch einfache Umstellung ergibt:

Formel 3

$$EF_{LTO} = \frac{EF_{Mittelwert} * Kerosin_{Gesamt}}{V_{FP} * Kerosin_{Cruise} + Kerosin_{LTO}}$$

Der Emissionsfaktor für die Cruise-Phase ergibt sich dann folglich aus Formel 2.

Für die Emissionsfaktoren im internationalen Flugverkehr werden erneut dieselben Verhältnisse der internationalen zu nationalen LTO- und Cruise-Emissionsfaktoren angesetzt wie in der IPCC Datenbank (s. Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5 Verhältnis der nationalen zu internationalen Emissionsfaktoren nach IPCC

	Aufteilung der Flugzeugtypen im internationalen Flugverkehr	
	850 kg Kerosin / LTO	2.500 kg Kerosin / LTO
	50%	50%
	Damit ergibt sich ein mittleres Verhältnis von	
	LTO int / nat	Cruise int / nat
NO _x	1,183	1,273
CO	1,549	0,857

Quelle: IPCC 2006b, eigene Berechnungen

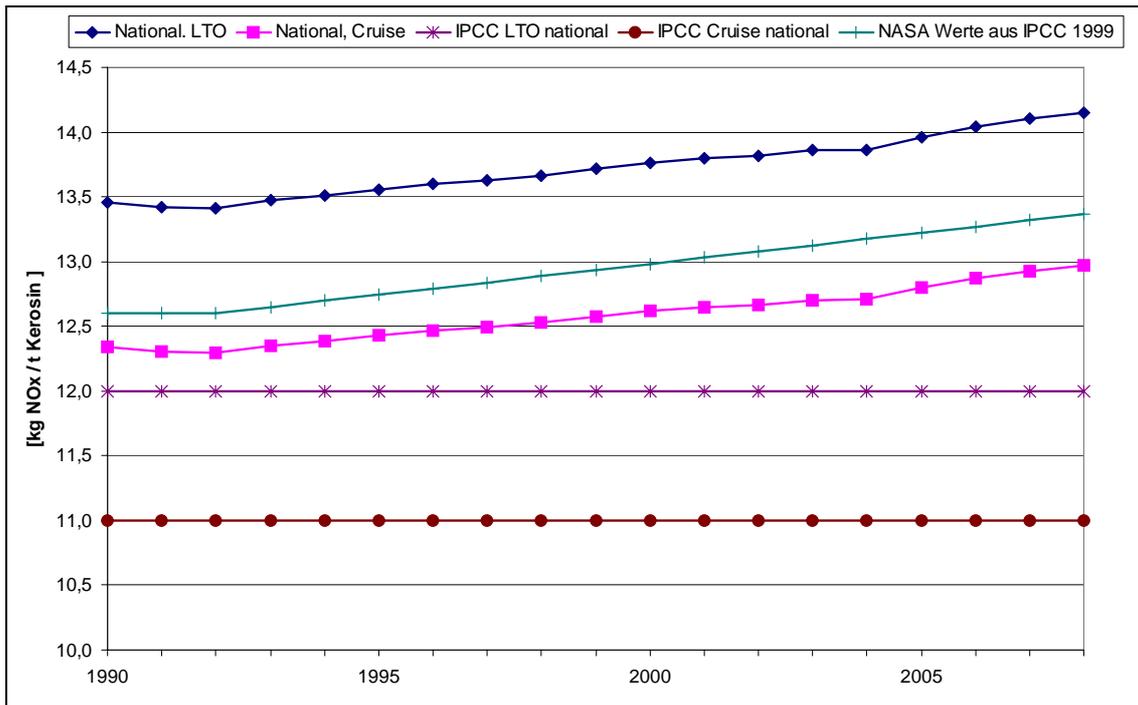
Dabei wird der internationale Flugverkehr wie oben beschrieben mit einem genau durchschnittlichen Kerosinverbrauch im LTO-Zyklus berücksichtigt: 50 % der Flugzeugtypen benötigen 850 kg Kerosin, 50 % benötigen 2.500 kg pro LTO-Zyklus. Im selben Verhältnis werden die jeweiligen Emissionsfaktoren berücksichtigt.

Da mit diesem Verfahren die Berechnung der Emissionsfaktoren vom Kerosinverbrauch abhängig ist und dieser bislang nur bis zum Jahr 2008 vorliegt, bleiben die

Emissionsfaktoren im Inventartool ab 2009 auf dem Wert für 2008. Bei der Neuanlage von Jahren berechnet sich jeweils ein neuer Wert.

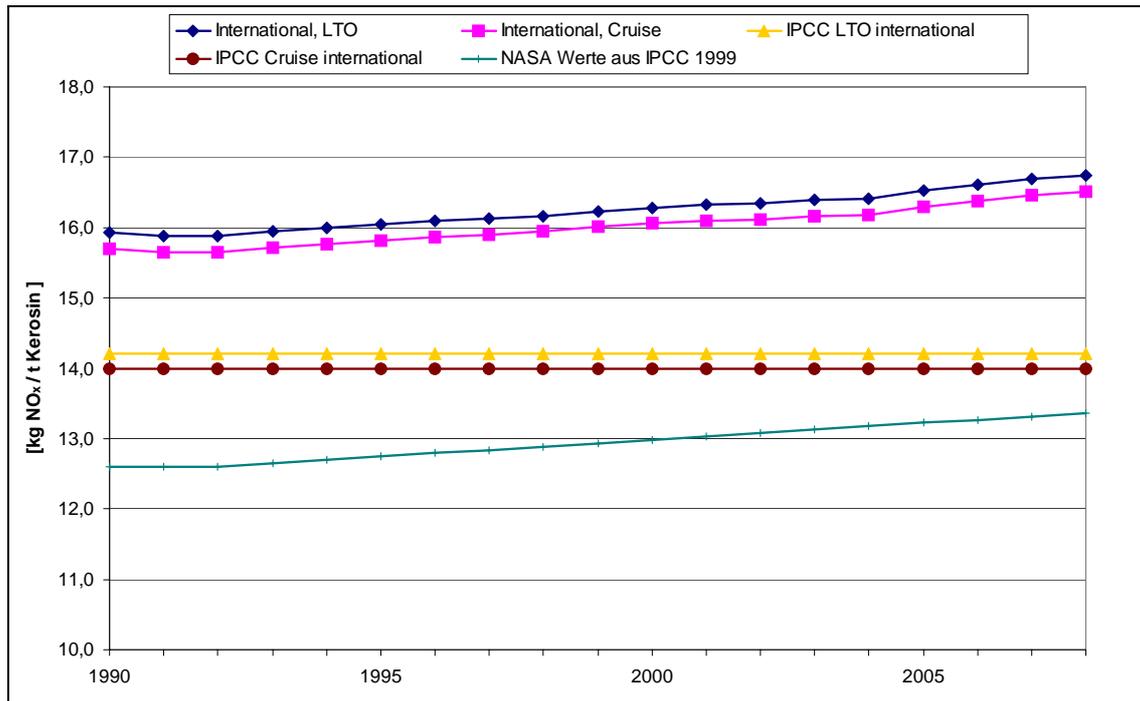
Im folgenden Diagramm werden die Verläufe der Werte der nationalen Emissionsfaktoren im Vergleich zu den IPCC-Werten grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die berechneten Werte durch die Anlehnung an die Werte von IPCC 1999 deutlich über denen des IPCC 2006b liegen.

Abbildung 3-2 Verlauf der NO_x-Emissionsfaktoren für den nationalen Flugverkehr



Bei den Emissionsfaktoren für den internationalen Flugverkehr ergibt sich ein ähnliches Bild: hier liegen die Emissionsfaktoren alle über dem Mittelwert nach IPCC 1999.

Abbildung 3-3 Verlauf der NO_x-Emissionsfaktoren für den internationalen Flugverkehr



Für die bisherigen Berechnungen der NO_x-Emissionen (UBA 2009)⁵ wurde ganz bewusst ein höherer Emissionsfaktor verwendet als durch IPCC 2006 vorgeschlagen, da angenommen wurde, dass der Durchschnittswert dort mit Flugzeug- und Triebwerksmustern ermittelt wurde, die der heutigen Flotte, die den innerdeutschen Flugverkehr bedient, nicht entsprechen. Die im Kapitel 3.6 dargestellten Verläufe der berechneten NO_x-Emissionen ergeben ein durchaus schlüssiges Bild, das die Verwendung dieser Emissionsfaktoren bestätigt.

Die Zeitreihen der **Kohlenmonoxid**-Emissionen werden nach dem gleichen Verfahren ermittelt.

Für **Kohlenwasserstoffe** liegen keine Angaben zur Aufteilung nach Flugphasen vor. Deshalb wird der verfügbare Mittelwert sowohl für den nationalen als auch den internationalen Flugverkehr und jeweils für beide Flugphasen verwendet.

Ammoniak-Emissionen werden für beide Flugphasen mit einem Emissionsfaktor von 0,173 g/kg Kerosin berechnet (UBA 2009).

Die **NMVO**C-Emissionsfaktoren ergeben sich jeweils aus der Differenz der Emissionsfaktoren für Kohlenwasserstoffe und Methan.

⁵ Auf Seite 162 des NIR 2009 (UBA 2009) steht „Die Werte des IPCC Reference Manual 1996 (...) werden für Deutschland als zu hoch angesehen“. Das Wort „hoch“ ist ein Schreibfehler, denn die Werte des IPCC Reference Manual 1996 liegen unter den verwendeten Emissionsfaktoren, auch die anschließende Begründung zielt in diese Richtung.

In der IPCC-Emissionsfaktoren-Datenbank werden für Kerosin keinerlei Werte für Staub-Emissionen (TSP; PM_{2,5}; PM₁₀) angegeben. Deshalb werden die Emissionsfaktoren von **Staub** (Total Suspended Particulate Matter – TSP) von Corinair 2006 übernommen. In Tabelle 8.2 werden dort differenzierte Werte für die Flugphasen einer durchschnittlichen Flotte angegeben: Für nationale Flüge 0,7 kg TSP/LTO und 0,2 kg TSP/t Kerosin sowie 0,15 kg TSP/LTO und 0,2 kg TSP/t Kerosin für internationale Flüge. Laut dieser Tabelle wird von einem Kerosinverbrauch pro LTO-Zyklus von 825 kg für nationale Flüge sowie 1.617 kg für internationale Flüge ausgegangen. Mit diesen Werten werden die Emissionsfaktoren für die LTO-Phase ermittelt.

Alle Emissionsfaktoren sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Die Berechnung der **flüchtigen organischen Verbindungen** (VOC) sowie der **gesamten organischen Gase** (TOG) erfolgt nach der EPA-Methode, die auch von Eurocontrol im AEM 3-Modell angewandt wird (Eurocontrol 2004). Dabei sind diese Emissionen direkt proportional zu den Kohlenwasserstoff-Emissionen. Eine Übersicht über die verwendeten Koeffizienten ist in Tabelle 3-6 gegeben.

Tabelle 3-6 Koeffizienten zur Berechnung der VOC und TOG

Schadstoffe		Korrekturfaktoren
abh. von HC Emissionen		
VOC	VOC/HC	1,0947
abh. von VOC Emissionen		
Acetaldehyd	Acet./VOC	0,0519
Acrolein	Acrol./VOC	0,0253
POM als 16-PAI	16-PAK/VOC	1,166E-04
POM als 7-PAK	7-PAK/VOC	1,049E-06
Styrene	Styr./VOC	0,0044
TOG	TOG/VOC	1,1167
abh. von TOG Emissionen		
1,3-Butadien	1,3-But./TOG	0,018
Benzen	Benz./TOG	0,0194
Ethylbenzen	Ethylb./TOG	0,0017
Formaldehyd	Form./TOG	0,1501
Propionaldehyd	Prop./TOG	0,0095
Toluen	Toluen/TOG	0,0052
Xylen	Xylen/TOG	0,0048
POM=Polyoxymethylen		
PAK =Polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff		

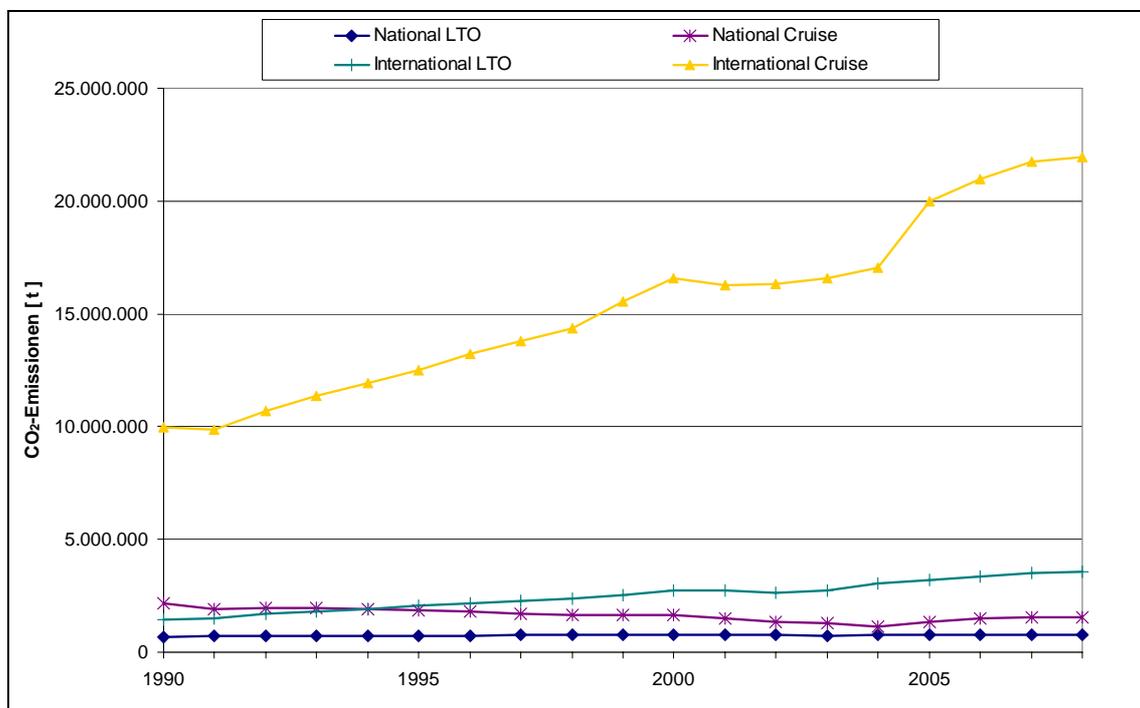
Quelle: Eurocontrol 2004

3.6 Ergebnisse der Emissionsberechnung für Kerosin

Durch die geänderte Berechnungsmethodik und die damit verbundene Verwendung neuer Emissionsfaktoren haben sich die Emissionen einzelner Schadstoffe zum Teil erheblich geändert. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zu den bisherigen Berechnungen, wie sie auch im NIR 2009 (UBA 2009) berichtet wurden, grafisch dargestellt, um einen Eindruck von den Änderungen zu vermitteln.

Da die CO₂-Emissionsfaktoren beibehalten wurden, ergeben sich damit in den Gesamt-CO₂-Emissionen keinerlei Veränderungen⁶. Die erstmals erfolgte Aufteilung der Emissionen auf die beiden Flugphasen wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

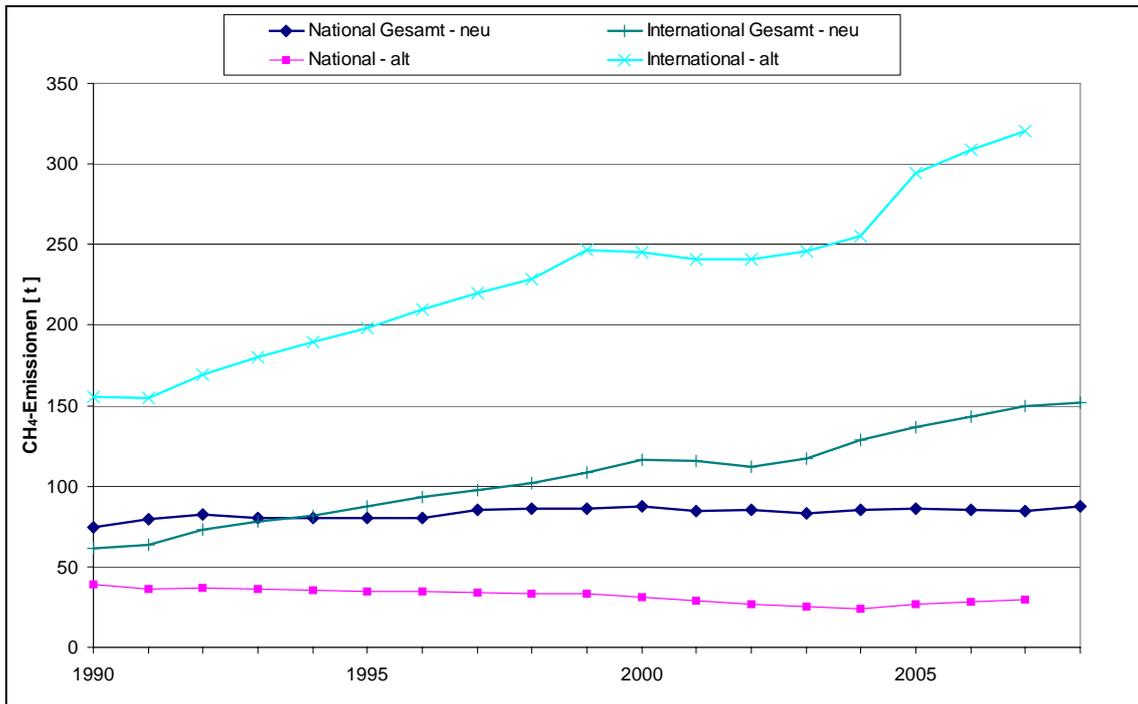
Abbildung 3-4 CO₂-Emissionen in den beiden Flugphasen



Die Methan-Emissionen der beiden Flugphasen zusammen werden in der folgenden Abbildung mit denen nach der bisherigen Berechnung verglichen.

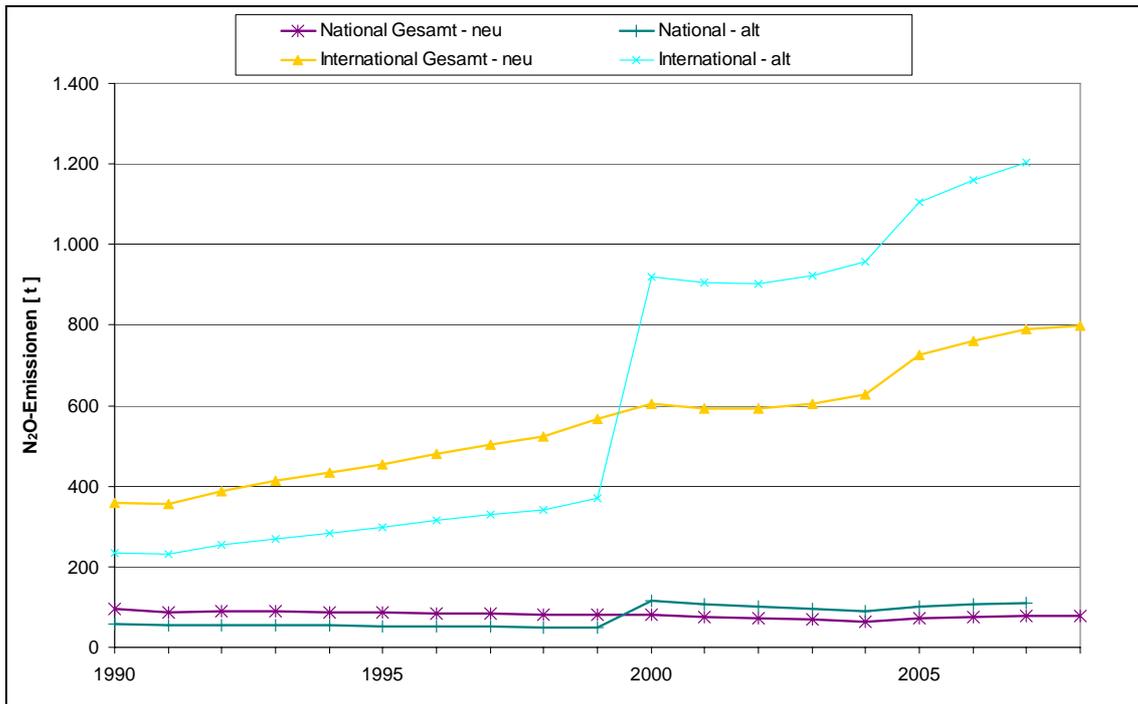
⁶ Eine leichte Abweichung entsteht durch die Verwendung des gerundeten Emissionsfaktors von 3150 kg/t Kerosin. Bislang wurde ein auf Basis der Einheit kg/TJ umgerechneter Wert verwendet, der zu einem Emissionsfaktor von 3150,395 führte.

Abbildung 3-5 Vergleich der Methan-Emissionen mit der bisherigen Berechnung



Durch die Verwendung der Emissionsfaktoren nach den IPCC Guidelines 2006 liegen die nationalen **Methan-Emissionen** höher, die internationalen deutlich niedriger als bisher berichtet. Darin zeichnet sich der unterschiedlich starke Einfluss der LTO-Phase ab; Methan wird nur während dieser Phase emittiert. Folglich wird hier ein deutlich höherer Emissionsfaktor angesetzt als der davor für den nicht in Flugphasen getrennten Flugverkehr verwendete Mittelwert. – Auch wenn der Anteil der LTO-Phase im nationalen Flugverkehr bis zu 40 % beträgt (im internationalen Verkehr bei maximal 15 %)- sind die emittierten Methanmengen aber sehr gering. - Gleiches gilt für die **Lachgas-Emissionen**, die in der nächsten Abbildung mit den bisherigen Berechnungen verglichen werden.

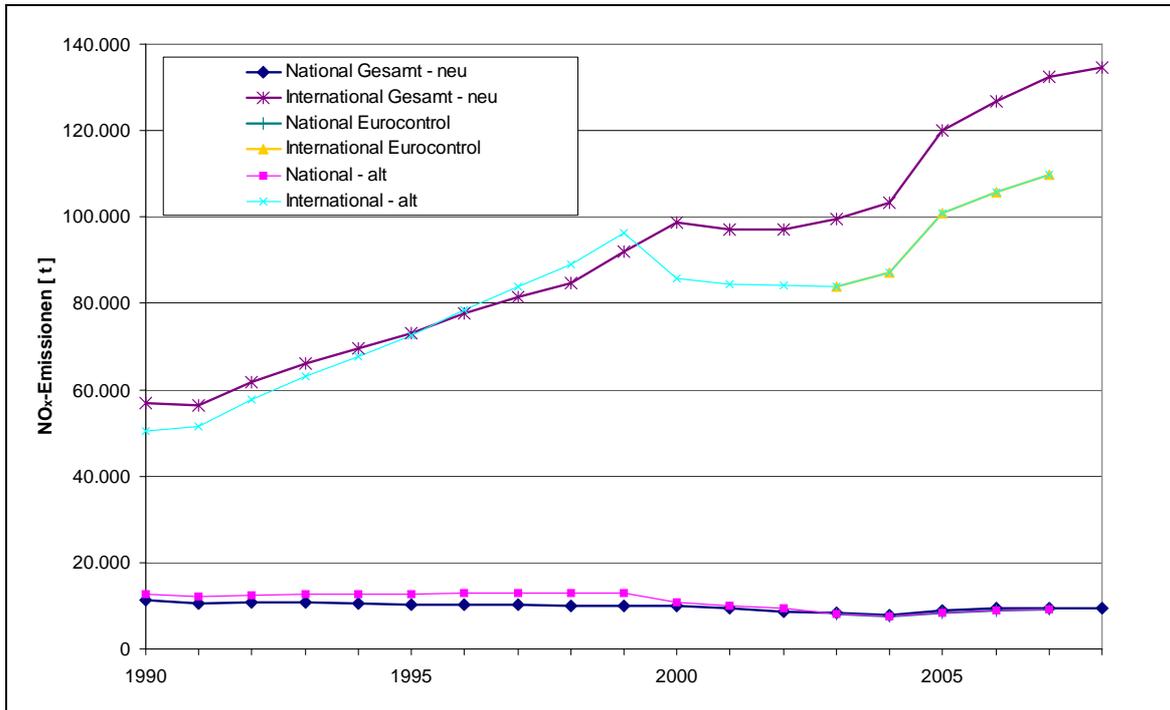
Abbildung 3-6 Vergleich der Lachgas-Emissionen mit der bisherigen Berechnung



Deutlich zu sehen ist der Sprung bei den bisherigen Berechnungen durch die Verwendung eines anderen Emissionsfaktors ab dem Jahr 2000. Die neu berechneten Lachgas-Emissionen glätten dagegen den ehemals stufigen sowohl für den nationalen wie auch den internationalen Anteil des Flugverkehrs.

Von Eurocontrol liegen Daten für **NO_x-Emissionen** aus dem nationalen und internationalen Flugverkehr für die Jahre 2003 bis 2006 vor, die mit dem ANCAT-Modell berechnet wurden (ETC/ACC 2007). Sie wurden aus den oben beschriebenen Gründen nicht direkt übernommen, sondern noch mit einem Skalierungsfaktor an den Kerosinverbrauch nach der Energiebilanz angepasst. Bei den bisherigen Berechnungen wurden die Zahlen ab dem Jahr 2003 für die Inventarberichterstattung übernommen, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

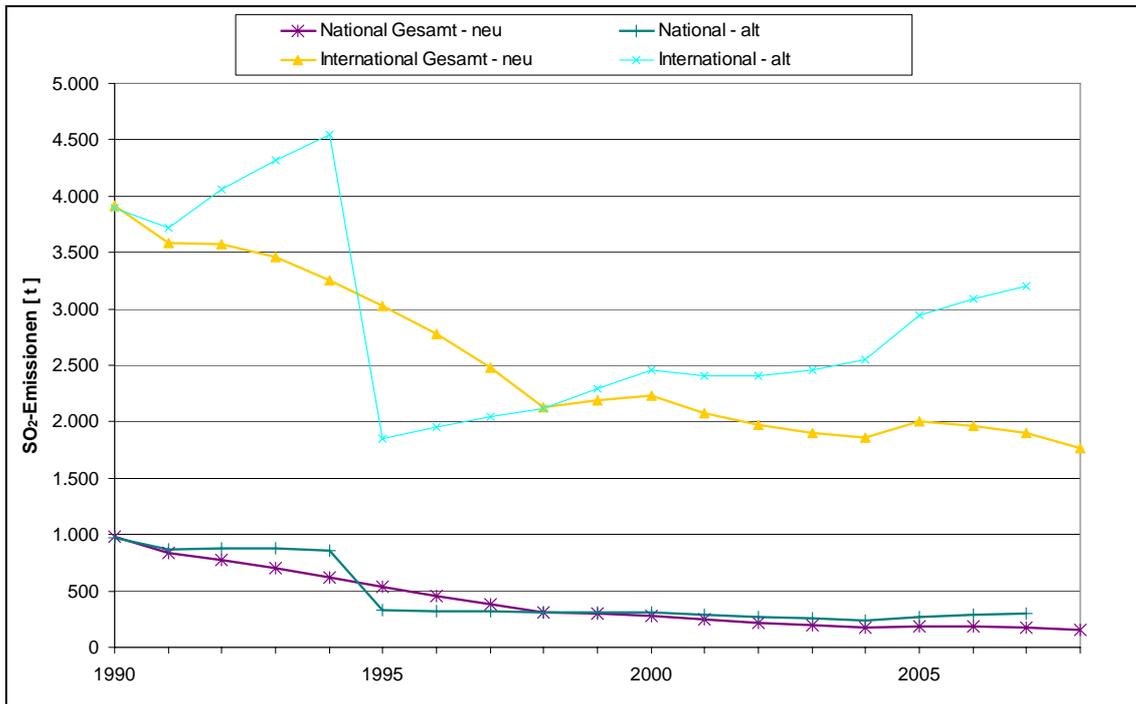
Abbildung 3-7 Vergleich der NO_x-Emissionen mit denen von Eurocontrol und den bisherigen Berechnungen



Die berechneten nationalen NO_x-Emissionen decken sich etwa mit denen nach Eurocontrol, wohingegen die internationalen doch deutlich abweichen. Eine ähnliche Abweichung von den Eurocontrol-Daten wäre auch unter Verwendung der bisherigen Emissionsfaktoren für die Jahre 2003 bis 2006 aufgetreten (Öko-Institut 2007). Auch hier ist die Verwendung eines geänderten Emissionsfaktors im Jahr 2000 im Verlauf der bisherigen Emissionszeitreihe zu erkennen. Die aktuelle Berechnung ergibt im nationalen Flugverkehr bis zum Jahr 2003 leicht niedrigere Werte als bisher, im internationalen Flugverkehr liegen diese ab dem Jahr 2000 deutlich höher.

Auch die Emissionsfaktoren für **Schwefeldioxid** wiesen bisher deutliche Sprünge auf, die im Verlauf der Emissionszeitreihe erkennbar sind.

Abbildung 3-8 Vergleich der SO₂-Emissionen mit der bisherigen Berechnung



Der neu berechnete Verlauf der Gesamt-SO₂-Emissionen passt gut zur bisherigen Berechnung. Ab dem Jahr 2000 jedoch sinken die Emissionen erheblich stärker als bisher angenommen.

3.7 Behandlung von Ottokraftstoff

Ottokraftstoff wird im Flugverkehr ausschließlich für kleine Flugzeuge verwendet, die hauptsächlich im Inlandsverkehr eingesetzt werden. Der Verbrauch wird daher nicht mittels des in Kapitel 3.2 beschriebenen Schlüssels auf den nationalen und internationalen Flugverkehr verteilt. Es wird vielmehr angenommen, dass dieser vollständig im innerdeutschen Flugverkehr erfolgt. Die gesamten Emissionen werden somit dem Inlandsverkehr zugerechnet. - Es handelt sich dabei um eine konservative Annahme, durch die die nationalen Emissionen überschätzt werden. Gleichzeitig ist die Überschätzung der nationalen Emissionen gering: die CO₂-Emissionen aus den Ottokraftstoffen im Flugverkehr sinken von 172 kt CO₂ im Jahr 1990 auf 45 kt CO₂ im Jahr 2008.

Entsprechend den Good Practice Guidance (IPCC 2001, S. 2-57) ist es für diesen Treibstoff ausreichend, die Tier 1 Methode zu verwenden. Der entsprechend der Energiebilanz verbrauchte Ottokraftstoff wird somit ohne Berücksichtigung verschiedener Flug-, Start- und Landesituationen mit eigenen Emissionsfaktoren multipliziert, die in Tabelle 3-8 aufgeführt sind. Als Heizwert wird der Mittelwert von 44.300 kJ/kg nach den IPCC Guidelines 2006a (Seite 1.18) genutzt.

Emissionsfaktoren

Für die **CO₂-Emissionen** wird der Standard-Wert nach den IPCC Guidelines (2006a) übernommen. In diesen Richtlinien (Seite 3-64) werden die **Methan-, Lachgas-** und **Stickstoffoxid**-Emissionsfaktoren explizit mit den für die Verwendung von Kerosin angegebenen Werten gleichgesetzt. Diese Annahme wird hier übernommen und die Emissionsfaktoren denen für den Einsatz von Kerosin im nationalen Flugverkehr während des Reiseflugs (Cruise-Phase) des Jahres 2008 gleichgesetzt.

Hinsichtlich der Treibstoff-Eigenschaften gibt es keine grundlegenden Unterschiede zwischen Flugbenzin und PKW-Benzin⁷. Damit lassen sich die spezifischen **SO₂-Emissionen** des PKW-Treibstoffs auf die Emissionen für Flugbenzin übertragen. Nach Angaben des Fachausschusses für Mineralöl- und Brennstoff-Normung (FAM) beträgt der Grenzwert des Gesamt-Schwefelgehalts für Tankstellen-Kraftstoff 10 mg/kg, also 0,001 Gew% oder ein Zehntel des für Kerosin angegebenen Wertes. Infolge dessen wird hier der um 90 % verminderte Emissionsfaktor für SO₂ aus Kerosin verwendet.

Es werden unterschiedlich stark verbleite Flugbenzin-Sorten verwendet., das exakte Verhältnis der verwendeten Sorten ist nicht verfügbar. Die gebräuchlichste Sorte ist AvGas 100 LL mit einem maximalen **Bleige**halt von 0,56 g/l. Dieser Wert liegt etwas unter dem im Corinair Guidebook 2007 vorgeschlagenen Standardwert von 0,6 g/l. Für das deutsche Inventar wird der Wert von AvGas 100 LL verwendet und mit einer Dichte von 0,75 kg/l auf einen Emissionsfaktor von etwa 0,75 g Blei/kg Flugbenzin umgerechnet.

Der Emissionsfaktor für die **Staub** (Total Suspended Particulate Matter – TSP) berechnet sich aus dem Bleigehalt von AvGas 100 LL durch Multiplikation mit dem Faktor 1,6. Dieser Wert entstammt dem für die Berechnungen der Emissionen des Straßenverkehrs verwendeten Modell TREMOD.

Für **NMVO**C und **CO**-Emissionsfaktoren werden Werte in den Revised IPCC Guidelines 1996 (Seite I 42 und 40) angegeben, die hier verwendet werden. Damit ergibt sich der Emissionsfaktor für die Summe der Kohlenwasserstoffe als Addition der Emissionsfaktoren von NMVOC und Methan.

Die weiteren Emissionsfaktoren sind nicht als spezielle Werte für durchschnittliche Kleinflugzeuge verfügbar. Deshalb werden sie den Kerosin-Emissionsfaktoren (national, Cruise) gleichgesetzt.

⁷ (Email- Kommunikation mit Herrn Winkler vom Mineralölwirtschaftsverband, 8.Juni 2009)

Tabelle 3-8 Emissionsfaktoren für Flugbenzin (1990-2008)

Schadstoff	Emissionsfaktor g/kg	Bemerkung zur Quelle oder Berechnung
CO ₂	3.070	IPCC Guidelines 2006 Table 3.6.4
CH ₄	0,36	EF Kerosin, LTO national 2008
N ₂ O	0,10	EF Kerosin, Cruise, national 2008
SO ₂	0,02	Ein Zehntel des EF Kerosin, Cruise, national 2008
H ₂ O	1.274	EF Kerosin, Cruise, national 2008
NO _x	13,36	EF Kerosin, Cruise, national 2008
HC	13,65	Addition von EF für NMVOC und CH ₄
NMVOC	13,29	Revised IPCC Guidelines 1996, S. I.42
CO	665	Revised IPCC Guidelines 1996, S. I.40
TSP	1,20	Berechnet aus Bleigehalt von AvGas 100 LL
Blei	0,75	Berechnet aus dem max. Bleigehalt AvGas 100 LL

Im Inventar können die Emissionen durch Ottokraftstoff im Flugverkehr von nun an getrennt von denen des Kerosins aufgeführt werden.

3.8 Übergabe an das ZSE

Es wurde ein Tabellensystem aufgebaut, das es problemlos und sicher ermöglicht, alle erforderlichen Angaben über die Aktivitätsraten, Splitfaktoren und zurückgerechneten Emissionsfaktoren (IEF) in eine Form zu bringen, aus der heraus eine Umwandlung in eine Datenbank möglich ist. Die Übertragung der Werte in das Tabellensystem erfolgt automatisch, eine lückenlose Dokumentation der einzelnen Werte ist angelegt. Das Format stellt die fehlerfreie Übergabe an das ZSE sicher.

3.9 Eingabehilfen, Sicherheitsabfragen und Blatt mit Abweichungen zu Vorjahren

Für die Berechnung der Emissionen eines weiteren Jahres wurde als Hilfe ein Tabellenblatt angelegt, auf dem dargestellt wird, welche Werte für eine korrekte Berechnung noch einzufügen sind. Zur Sicherung der korrekten Eingabe von Werten ist eine Sicherheitswarnung im Eingabeblatt implementiert worden. Für jede Zeile einzeln kann eine Toleranzgrenze eingegeben werden, die angibt, wie weit der neue Wert von dem des Vorjahres abweichen darf. Wird die Toleranzgrenze durch den neu eingegebenen Wert überschritten, erscheint eine entsprechende Warnung.

In einem weiteren Blatt sind die Abweichungen der Ausgabewerte zu den jeweiligen Vorjahreswerten prozentual dargestellt. Liegen diese Werte über- oder unterhalb der pro Zeile festlegbaren Toleranzgrenze erscheinen die Zellen farblich markiert. Damit ist eine schnelle Übersicht über die Verläufe der Ausgabe-Werte möglich.

3.10 Unsicherheiten

Für die Berichterstattung ist die Angabe von Unsicherheiten für die einzelnen Emissionen erforderlich. Zur Ermittlung dieser Unsicherheiten werden die einzelnen Komponenten identifiziert, die in die Berechnung der Emissionen einfließen, und deren Unsicherheiten (U_1 bis U_x) quantifiziert. Durch die additive Verknüpfung der quadrierten Teilunsicherheiten ergibt sich jeweils die Gesamtunsicherheit U_{ges} laut IPCC (2000) aus der Formel:

$$U_{ges} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Mit dieser Formel wird eine Gleichgewichtung der Teilunsicherheiten angenommen. Prinzipiell müsste diese Berechnung für jedes einzelne Element der Zeitreihen erfolgen, da zum Teil innerhalb der Zeitreihen unterschiedliche Methoden oder Quellen zur Anwendung kommen. So sind z.B. die BAFA-Daten, die für die letzten Jahre anstelle der Energiebilanz verwendet werden, mit einer geringeren Unsicherheit belegt als die Daten, die der Energiebilanz entnommen werden. Auch könnten für einzelne Emissionsfaktoren unterschiedliche Werte für die Unsicherheiten beider Flugphasen angegeben werden, jeweils getrennt nach nationalen und internationalen Flügen. Um alle diese Punkte für jedes einzelne Strukturelement zu berücksichtigen, müsste ein relativ aufwendiges Rechenverfahren entworfen werden, das den Rahmen des Projektes übersteigen würde. Deshalb werden die Unsicherheiten hier für die gesamten Zeitreihen und Flugphasen als Mittelwerte abgeschätzt.

Die Berechnung der Gesamt-Unsicherheiten erfolgt wie in Tabelle 3-9 dargestellt. In der linken Spalte werden die Komponenten der Unsicherheitsberechnung, rechts daneben die Teil-Unsicherheiten aufgeführt. Daran anschließend befinden sich die Spalten der Werte, für die Gesamt-Unsicherheiten in das ZSE übertragen werden sollen. Diese stellen zum Teil ebenfalls wieder Einzelkomponenten der Unsicherheitsberechnung eines anderen Wertes dar. Zum Beispiel berechnet sich die Unsicherheit für den nationalen Kerosinverbrauch in den beiden Flugphasen LTO und Cruise aus den Teilunsicherheiten des gesamten nationalen Kerosinverbrauchs sowie der Teilunsicherheit der LTO/Cruise Aufteilung. Letztere basiert auf der Anzahl der Flugbewegungen nach Destatis und den Annahmen zur Flottenaufteilung (im nationalen Flugverkehr wird entsprechend den IPCC-Annahmen ein durchschnittlicher Verbrauch von 850 kg Kerosin pro LTO-Zyklus angesetzt). Die Gesamt-Unsicherheit des LTO bzw. Cruise Kerosinverbrauchs stellt wiederum eine Teilunsicherheit bei der Ermittlung der Unsicherheiten für die Emissionen dar.

Tabelle 3-9 Gesamt- und Teilunsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren

Einzelkomponenten	Teil- Unsicherh- eiten	Kerosin und Flugbenzin- verbrauch		LTO/Cruise- Aufteilung		Kerosinver- brauch LTO bzw. Cruise		CO ₂ - Emissionen LTO und		CH ₄ - Emissionen LTO und		N ₂ O- Emissionen LTO und		SO ₂ - Emissionen LTO und		H ₂ O- Emissionen LTO und		Restl. Emiss.LTO + Cruise		Quelle / Begründung der Annahmen
		%	Ges.	nat/	int/	nat	int	nat	int	nat	int	nat	int	nat	int	nat	int	nat	int	
Energiebilanz	-5 5	x	x																	Öko-Institut / DIW 2007
BAFA-Daten	-1 3																			Öko-Institut / DIW 2007 - Hier wurde die Unsicherheit der Mineralölstatistik angesetzt, die auf den BAFA-Daten basiert. Die Annahme ist deshalb konservativ
Split	-15 15		x																	Annahme. Siehe Text.
Kerosinverbrauch	nat/int -16 16					x	x													berechnet
Anzahl der Flugbewegungen	nat -5 5			x																Angaben von DESTATIS mit geschätztem abgezogenem Anteil an motorbetriebenen Flugzeugtypen beaufschlagt.
	int -2 2				x															Angaben von DESTATIS mit geschätztem abgezogenem Anteil an motorbetriebenen Flugzeugtypen beaufschlagt.
Flottenaufteilung	nat -3 3			x																LTO-Ansatz nach IPCC basiert auf der Annahme, dass Flugzeugtypen mit 850 kg Kerosin /LTO zum Einsatz kommen
	int -5 5				x															Annahme eines Mittelwertes zwischen 850 und 2.500 kg Kerosin/LTOauf (Eckwerte aus IPCC 2006b)
LTO/Cruise- Aufteilung	nat -6 6					x														berechnet
	int -5 5						x													berechnet
Kerosinverbrauch LTO bzw. Cruise	nat -17 17						x		x		x		x		x					berechnet
	int -17 17							x		x		x		x		x				berechnet
Emissionsfaktoren	CO ₂ 5 5						x	x												IPCC 2006, S.3.69, geringe Unsicherheit, da EF nur vom C-Gehalt des Brennstoffs abhängig ist.
	CH ₄ -57 100								x	x										IPCC 2006, S.3.69, abh. von Technologie und damit große Unsicherheit bei Vereinheitlichung durch Tier 1 Ansatz
	N ₂ O -70 150									x	x									IPCC 2006, S.3.69, abh. von Technologie und damit große Unsicherheit bei Vereinheitlichung durch Tier 1 Ansatz
	SO ₂ -10 10											x	x							Emissionsfaktor ist nur von Brennstoffeigenschaften abhängig (Schwefelgehalt).
	H ₂ O -5 5													x	x					Emissionsfaktor ist nur von Brennstoffeigenschaften abhängig. Niedrige Werte von - 4,9 bis 1,6 bei Eurocontrol 2004, S.49
Restliche Emissionsfaktoren	nat -50 50																		x	Annahme
	int -50 50																			x
Gesamt-Unsicherheit oben		+5%	+16%	+6%	+5%	+17%	+17%	+18%	+18%	+59%	+59%	+72%	+72%	+20%	+20%	+18%	+18%	+53%	+53%	
Gesamt-Unsicherheit unten		-5%	-16%	+6%	-5%	-17%	-17%	-18%	-18%	-101%	-101%	-150%	-150%	-20%	-20%	-18%	-18%	-53%	-53%	

Einzelne Teilunsicherheiten basieren auf Annahmen. So ist eine Unsicherheit für die gesamte Zeitreihe des Splits zur Aufteilung des nationalen und internationalen Flugverkehrs z.B. als Mittelwert über die Zeitreihe angegeben: In der Untersuchung in Öko-Institut (2007) konnte der Wert von 20 % als nationaler Anteil am gesamten Kerosinverbrauch für das Basisjahr bestätigt werden. Für die Jahre 1991 bis 2002 wird der Anteil anhand einer exponentiellen Funktion berechnet, deren Unsicherheit aufgrund fehlender Daten nicht quantifizierbar ist. Für die Jahre 2003 bis 2008 werden die Daten von Eurocontrol verwendet, die nach dem ANCAT-Modell berechnet wurden. Vergleiche von Stichproben der Modellergebnisse nach dem ANCAT-Modell mit dem tatsächlichen Verbrauch ergeben Abweichungen von ± 12 %. Daten von Eurocontrol nach dem AEM 3-Modell wären nur mit einer Unsicherheit von 3-5 % behaftet (Eurocontrol 2006).

3.11 Ausblick

Das Berechnungstool ist so gestaltet, dass eine Eingabe von Eurocontrol-Daten jeweils Vorrang vor den anderen Berechnungsmethoden hat. Das bedeutet, dass, sobald eine Datenübermittlung von Eurocontrol erfolgt, eine Berechnung der CO₂, HC, CO und NO_x-Emissionen nach Tier 3b stattfinden kann.

Eine weitere Möglichkeit, die Ermittlung der Emissionen auf Tier 3-Berechnungen basieren zu lassen, würde eine Kooperation mit QinetiQ bieten, die das AERO2K Modell betreiben. Dieses Modell wurde für die Berechnung eines globalen Flugverkehrsinventars entwickelt. Deshalb liegt der Schwerpunkt hier nicht unbedingt auf der genauen Abbildung kleiner Flugzeugtypen. Flotten mit einem großen Anteil kleinerer Flugzeuge werden somit ungenauer abgebildet als beim AEM-Modell - was jedoch auf Deutschland nicht unbedingt zuträfe. Für eine Berechnung der Emissionen wäre eine Übermittlung von Radardaten aller Flüge oder eine abgestimmte, repräsentative Auswahl in Verbindung mit Flugzeug- und Motorentypen erforderlich. Eventuell könnten typische Flugwege von Eurocontrol verwendet werden, die schon in dem Modell integriert sind.

Für die Berechnung der Emissionen nach Tier 2b sind Angaben über Start- und Ziel-flughäfen und Flugzeugtypen erforderlich. Diese Angaben liegen sowohl dem Statistischen Bundesamt als auch der Deutschen Flugsicherung vor.

4 Literatur-Bericht

AG Energiebilanzen 2007 – Vollständige Energiebilanzen 1990-2006 im Excel-Format, www.ag-energiebilanzen.de

BAFA-Zahlen 2007– Amtliche Mineralölzahlen für die Bundesrepublik Deutschland - Dezember und das Jahr 2007; Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle im Excel-Format
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche_mineraloelzahlen/index.html

Corinair 2006 - EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2006, EEA technical report No. 11/2006

ETC/ACC 2007 – Comparison of Eurocontrol's Pagoda estimates with national GHG inventories, Jakob Graichen, Technical Workshop on emissions from aviation and maritime transport, 4-5 October 2007, Oslo, Norway

Eurocontrol 2004 - Eurocontrol The Advanced Emission Model (AEM3) - Validation Report, Frank Jelinek, Sandrine Carlier, James Smith, EEC Report EEC/SEE/2004/004

Eurocontrol 2007 – Telefongespräch mit Stefano Mancini (Eurocontrol) am 27. November 2007

IPCC 1996 - Intergovernmental Panel on Climate Change: Greenhouse Gas Inventory, Workbook, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2, 1996

IPCC 1999 – Intergovernmental Panel on Climate Change: Aviation and the Global Atmosphere.
http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/Climate/ipcc/aviation/index.htm

IPCC 2000 - Intergovernmental Panel on Climate Change: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories

IPCC 2006a – Intergovernmental Panel on Climate Change: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

IPCC 2006b – Datenbank für Emissionsfaktoren vom IPCC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>

Öko-Institut / DIW 2007: Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsdaten für die Berichte über Emissionen aus stationären Feuerungen im Rahmen des Nationalen Inventarberichts und des Monitoring Mechanismus nach RL EG 99/296“

Öko-Institut 2007 – Emissionsberichterstattung im Luftverkehr. Vorläufiger Endbericht zum F+E-Vorhaben 201 42 258. Berlin. November 2007.

UBA 1998 - Umweltbundesamt: UBA-Text 6/89: Ermittlung der Abgasemissionen aus dem Flugverkehr über der Bundesrepublik Deutschland, UBA-Bericht 6/89, FKZ 104 05 961

UBA 2001 - Umweltbundesamt UBA Texte 17/01: Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs

UBA 2009 – Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2007, Umweltbundesamt 2009