



# **atmosfair Flug-Emissionsrechner**

Dokumentation der Methode und Daten

atmosfair gGmbH

Berlin, März 2021

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Grundlagen und Prinzipien .....	4
2.1	Datenunabhängigkeit .....	4
2.2	Jährliche Aktualisierung.....	4
2.3	Angemessene Genauigkeit und Ergebnisdarstellung .....	4
2.4	Prüfung .....	4
2.5	Methodische Grundlagen .....	4
2.5.1	atmosfair Airline Index (AAI) für reine CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	4
2.5.2	Non-CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Stand der Wissenschaft .....	5
2.5.3	ICAO-Methode und Verfeinerung mit Piano-x.....	5
3	Welche Faktoren bestimmen die CO <sub>2</sub> -Emissionen meiner Flugreise und wie werden sie vom Emissionsrechner erfasst? .....	6
3.1	Überblick .....	6
3.2	Treibstoffverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	6
3.2.1	Flugprofil (Flughöhenverlauf in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke).....	6
3.2.2	Umwege und Warteschleifen.....	8
3.2.3	Operations: Continuous Descent Approach (CDA), langsames Fliegen .....	9
3.2.4	Bodenbetrieb und Flughafengelände.....	10
3.2.5	Meteorologische Bedingungen .....	11
3.2.6	Airline (Flugzeugflotte und Alter) .....	11
3.2.7	Flugzeugtyp .....	12
3.2.8	Triebwerke .....	12
3.2.9	Flugklasse (Bestuhlung).....	13
3.2.10	Auslastung Passagiere.....	13
3.2.11	Beiladefrachtkapazität .....	14
3.2.12	Auslastung Beiladefracht.....	14
3.2.13	Zwischenergebnis CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	14
3.2.14	Darstellung im Emissionsrechner .....	14
4	Klimawirkung von Non-CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	15
4.1	Stickoxide und Ozon .....	15
4.2	Partikel und Eiswolken .....	15
4.3	Erfassung der Emissionen im Emissionsrechner .....	16

4.4	Metriken zur Berechnung der Klimawirkung: RFI vs. GWP .....	16
4.5	Schlussfolgerung Klimawirkung Non-CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	17
5	Datenquellen .....	18
5.1	Piano-x.....	18
5.2	ICAO .....	18
5.3	ATI – Air Transport Intelligence .....	19
5.4	OAG – UBM.....	19
5.5	Airline Data T100 International .....	19
5.6	JP Airline Fleets International.....	20
5.7	IATA WATS.....	20
5.8	Aero Secure .....	20
6	Genauigkeit der Methoden und Ergebnisse.....	21
6.1	Unsicherheitsfaktoren.....	21
6.2	Datenqualität .....	21
6.3	Methodenqualität.....	21
6.4	Genauigkeitsstufen.....	21
7	Literaturverzeichnis .....	22

## 1 Einleitung

Dieser Text dokumentiert die Details des Emissionsberechnungsprogramms für Flüge von atmosfair. Der atmosfair Flugemissionsrechner steht Endkunden kostenlos im Internet zur Verfügung unter [www.atmosfair.de](http://www.atmosfair.de).

Umfassende CO<sub>2</sub>-Reports für Unternehmenskunden bietet atmosfair direkt an die Unternehmen oder über ihr Geschäftsreisebüro, Reisekreditkarte wie AirPlus oder spezielle Dienste wie Conovum (für SAP Reisekostenabrechnung) an. Die Vollversion des atmosfair Reportingprogramms beinhaltet neben dem Flugbereich auch Mietwagen, Zug und Hotel. Sie kann für beliebige Zeiträume erstellt werden und dabei bestimmte Unternehmensbereiche oder business units abgrenzen. Das Programm ist sowohl für die Reisewirtschaft als auch Unternehmenskunden verfügbar. Die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von Geschäftsreisen bietet atmosfair dabei nach dem VDR-Standard an.

<https://www.atmosfair.de/de/geschaeftsreiseindustrie>

Wenden Sie sich dazu bitte an: [info@atmosfair.de](mailto:info@atmosfair.de)

## 2 Grundlagen und Prinzipien

Der atmosfair Emissionsrechner wurde nach Prinzipien konzipiert, die im Folgenden erläutert werden.

### 2.1 Datenunabhängigkeit

Die Datenquellen stammen aus unabhängigen wissenschaftlichen Forschungsprojekten oder von spezialisierten unabhängigen Datendienstleistern. In keinem Falle beziehen wir die Daten von den Fluggesellschaften selbst.

### 2.2 Jährliche Aktualisierung

Die Flugzeuge im Weltluftverkehr entwickeln sich technisch stetig weiter und werden dabei immer sparsamer. Insbesondere neue Flugzeugtypen, die auf den Markt kommen, sind oft um bis zu 30% sparsamer als ihre Vorgänger und sorgen somit für wichtige Veränderungen (atmosfair, AAI 2013). Aus diesem Grund aktualisiert atmosfair die Daten für die CO<sub>2</sub>-Berechnung stetig und kann damit unter anderem die Flugzeugflotten der Fluggesellschaften der Welt detailgetreu abbilden. Die Aktualisierung der Flugzeugtypen, Triebwerke und Auslastungsfaktoren geschieht jährlich, während die Konfiguration der Flugzeuge quartalsweise aktualisiert werden und die Flugpläne im 2-Monatsrhythmus.

### 2.3 Angemessene Genauigkeit und Ergebnisdarstellung

Die Genauigkeit der Berechnungen ist wissenschaftlich angemessen. Diejenigen Faktoren, die der Fluggast selber beeinflussen kann, sowie diejenigen Faktoren, die den größten Einfluss auf die verursachte Emissionsmenge haben, werden vom Emissionsrechner mit hoher Detailschärfe abgebildet. Für weniger relevante Faktoren oder für Faktoren, die der Fluggast nicht beeinflussen kann werden dagegen Mittelwerte zur Berechnung herangezogen werden. Wo der Nutzer abgefragte Parameter (z.B. Flugzeugtyp) nicht angeben kann, werden dem Nutzer möglichst viele Ergebnisse ausgegeben<sup>1</sup>.

### 2.4 Prüfung

Die Methode und die Datengrundlagen des atmosfair Emissionsrechners wurden vom Umweltbundesamt und international tätigen Hochschulprofessoren aus den Fachbereichen Physik und Luftfahrttechnik geprüft.

### 2.5 Methodische Grundlagen

Die Berechnung des atmosfair Flug-Emissionsrechners basiert methodisch auf den folgenden Grundlagen.

#### 2.5.1 atmosfair Airline Index (AAI) für reine CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fluges erfolgt im atmosfair Flugemissionsrechner anhand der detaillierten Methode des atmosfair Airline Index (AAI). Diese Methode ist in dieser Dokumentation kurz in Kapitel 2 zusammengefasst. Für eine ausführliche Dokumentation siehe „atmosfair, AAI 2013“.

Der atmosfair Airline Index erfasst:

- 32 Millionen Flüge
- Mehr als 300 der weltweit größten Airlines
- Mehr als 22.000 City Pairs weltweit
- 125 Flugzeugtypen (97% Marktabdeckung)
- 409 Triebwerke (96% Marktabdeckung)

---

<sup>1</sup> z.B. die Emissionen von verschiedenen Airlines, die auf einer Strecke fliegen

Damit deckt er rund 92% des weltweiten Luftverkehrs ab. Das CO<sub>2</sub> der übrigen Flüge wird mit generischen Werten berechnet, die für die jeweilige eine aus 22 Weltregionen aus Quellen wie IATA oder ICAO gemittelt werden.

### 2.5.2 Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Stand der Wissenschaft

Neben den reinen CO<sub>2</sub>-Emissionen gibt es bei Flügen noch die Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit Ihrer Klimawirksamkeit in der atmosfair Methode ebenfalls erfasst, berechnet und ausgewiesen werden (Kapitel 4). Dabei nutzen wir den Stand der Klimawissenschaft nach IPCC sowie peer-reviewter Fachliteratur.

### 2.5.3 ICAO-Methode und Verfeinerung mit Piano-x

Der AAI basiert auf einer eigenen Methode, aufbauend auf der CO<sub>2</sub>-Berechnungsmethode der ICAO (ICAO, 2010). Darin werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Treibstoffverbrauch eines kompletten Flugzeuges auf dem eingegebenen Flug mit einem speziellen Computermodell simuliert (Piano-x, siehe Kapitel 3.2 & 5.1). Die so ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden dann durch die Anzahl der Passagiere geteilt, wobei vorher noch die Beiladefracht abgezogen wird.

Die Datenbank und Software „Piano-x“ von Lissys Ltd wird zur Treibstoff- und Emissionsberechnung von Flugzeugen eingesetzt. Lissys Ltd ist ein Unternehmen mit Sitz in Großbritannien. Flugzeughersteller, Flugbehörden sowie Universitäten und Forschungseinrichtungen benutzen Piano-x. Auch die ICAO greift für ihren Emissionsrechner auf Piano-x zurück. Piano-x bietet die mit Abstand genauesten Daten zum Treibstoffverbrauch im zivilen Flugverkehr für jedes einzelne Flugzeug in seiner genauen Konfiguration und auf der jeweiligen Flugstrecke.

### 3 Welche Faktoren bestimmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen meiner Flugreise und wie werden sie vom Emissionsrechner erfasst?

#### 3.1 Überblick

Die folgenden Faktoren beeinflussen CO<sub>2</sub>-Emissionen und / oder Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit die Klimawirksamkeit eines Fluges. Sie werden in den nachfolgenden Kapiteln einzeln diskutiert.

##### Kapitel 3: Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

- ✓ Flugprofil (Flughöhe in Abhängigkeit von der Flugstrecke)
- ✓ Umwege und Warteschleifen
- ✓ Operations: Fluggeschwindigkeit und Landeanflug
- ✓ Bodenbetrieb und Flughafengelände
- ✓ Meteorologische Bedingungen (Höhenwinde, Gewitter etc.)
- ✓ Airline (Flugzeugflotte)
- ✓ Flugzeugtyp
- ✓ Triebwerke
- ✓ Flugklasse (Bestuhlung)
- ✓ Auslastung Passagiere
- ✓ Beiladefrachtkapazität
- ✓ Auslastung Beiladefracht

##### Kapitel 4

- ✓ Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen (Ozонаufbau, Kondensstreifen etc.)

#### 3.2 Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen hängen direkt vom Treibstoffverbrauch ab. Pro Tonne Kerosin werden stets 3,16 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert. Der Treibstoffverbrauch wiederum hängt von verschiedenen Faktoren wie dem verwendeten Flugzeugtyp und dessen Bestuhlung, Triebwerk, Winglets etc. ab, die die jeweilige Fluggesellschaft kontrolliert. Dazu kommt neben der reinen Technologie auch der Betrieb des Flugzeuges. Dieser umfasst nicht nur die Auslastung mit Passagieren und Fracht, sondern auch den eigentlichen Flug, über die Fluggeschwindigkeit bis hin zum Landeanflugverfahren.

Die folgenden Faktoren spielen für den Treibstoffverbrauch und damit für die CO<sub>2</sub>-Emissionen eine entscheidende Rolle:

##### 3.2.1 Flugprofil (Flughöhenverlauf in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke)

*Zusammenfassung: Der Treibstoffverbrauch von Flugzeugen hängt stark von der zurückgelegten Distanz ab. Grundsätzlich ist der absolute Verbrauch insgesamt umso höher, je weiter der Flug reicht. Auf Kurzstreckenflügen ist aber der relative Verbrauch pro 100 Kilometer Flugstrecke höher als bei Mittelstreckenflügen. Dies liegt daran, dass der Start und der Steigflug besonders viel Energie kostet und bei Kurzstreckenflügen mehr ins Gewicht fällt. Langstreckenflüge verbrauchen ebenfalls mehr Treibstoff pro 100 Kilometer als Mittelstreckenflüge, weil während eines Großteils des Fluges der Treibstoff mittransportiert werden muss, der erst am Ende des Fluges verbraucht wird. Das Flugprofil hängt von der Distanz der geflogenen Strecke, sowie von der Performance des Flugzeugtyps und den lokalen Wetterbedingungen ab.*

Der Emissionsrechner geht zweistufig vor: In einem ersten Arbeitsschritt berechnet er aus den geographischen Koordinaten von Abflug- und Zielflughafen die Großkreisdistanz des Fluges<sup>2</sup>. Hinzu kommen noch Standardwerte für Umwege, Warteschleifen etc.

Im zweiten Arbeitsschritt berechnet der Emissionsrechner den Treibstoffverbrauch eines bestimmten Flugzeugs in Abhängigkeit von der Distanz. Hier arbeitet der Rechner auf der Grundlage so genannter Flugprofile. Das Flugprofil ist der zweidimensionale Verlauf eines Fluges, in dem jedem Punkt auf der Erdoberfläche entlang des Flugweges vom Start- zum Zielflughafen die zugehörige Flughöhe zugeordnet wird. Das Flugprofil eines jeden Fluges besteht aus den folgenden Phasen:

1. Start bis zum Abheben.
2. Steigflugphase, in der das Flugzeug nach dem Start bis auf Reiseflughöhe steigt.
3. Reiseflugphase („Cruise“-Modus), in der das Flugzeug mit relativ konstanter Höhe eine bestimmte Distanz zurücklegt. Die Cruise-Flughöhe variiert mit der Flugdistanz: bei Kurzstreckenflügen liegt sie im Bereich von etwa 5 – 7 Kilometern, bei Langstreckenflügen bei etwa 10 – 13 Kilometern.
4. Sinkflugphase, in der das Flugzeug von der Reiseflughöhe wieder bis zur Landung absteigt.
5. Landung.

Vergleichsweise treibstoffintensiv sind hierbei die Start- und die Steigflugphase, da das Flugzeug in diesen Phasen sowohl an Geschwindigkeit als auch an Flughöhe zunimmt. Während der Reiseflugphase fliegt das Flugzeug mit konstanter Geschwindigkeit in möglichst großen Höhen, um vom verringerten Luftwiderstand und stabileren Wetterverhältnissen zu profitieren.

Das Flugprofil hängt von der Distanz des City Pairs sowie vom gewählten Flugzeugtyp und weiteren Faktoren ab. Flughöhen werden zum Teil seitens der Flugsicherung vorgegeben. Existieren keine Vorgaben (vor allem bei Langstrecke außerhalb nationaler Hoheitsgebiete), steigen die Flugzeuge in diejenigen Höhen, die bzgl. der Treibstoffeffizienz, Reisezeit und Flugsicherheit optimal sind. Das Flugprofil bestimmt den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs insofern, als dass die treibstoffintensiven Phasen des Start- und Steigfluges bei kurzen Strecken mehr ins Gewicht fällt als bei mittleren oder langen Strecken. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro transportierte Nutzlast hängt demnach stark vom Flugprofil und damit von der Flugdistanz ab.

#### Genauere Berechnung mit Piano-x

Für jeden Flugzeugtyp ermittelt die Software Piano-x (Piano-x) in Abhängigkeit von der jeweiligen Nutzlast (Passagiere und Fracht) und der Strecke das Flugprofil genau und berechnet dazu detailliert für jede Flugphase den Treibstoffverbrauch.

Die nachstehende Abbildung 1 zeigt als Beispiel den berechneten Treibstoffverbrauch eines voll besetzten Airbus A340 mit 271 Sitzen in Abhängigkeit von der zurückgelegten Flugstrecke. Der Treibstoffverbrauch ist in Liter Kerosin pro Passagier und 100 Kilometer angegeben. Deutlich ist zu sehen, dass bei Mittelstreckenflügen um 2.000 Kilometer Länge der Verbrauch pro 100 Kilometer am geringsten ist und Werte von etwa 3,7 Liter Kerosin pro Passagier und 100 Kilometer erreicht. Bei Kurz- und Langstreckenflügen liegt dagegen der Verbrauch höher. Bei anderen Flugzeugtypen können die Verbrauchswerte von diesem Beispiel deutlich

---

<sup>2</sup> kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche

abweichen, die grundsätzliche Abhängigkeit des Verbrauchs von der Distanz ist aber charakteristisch für die meisten modernen Strahlverkehrsflugzeuge.

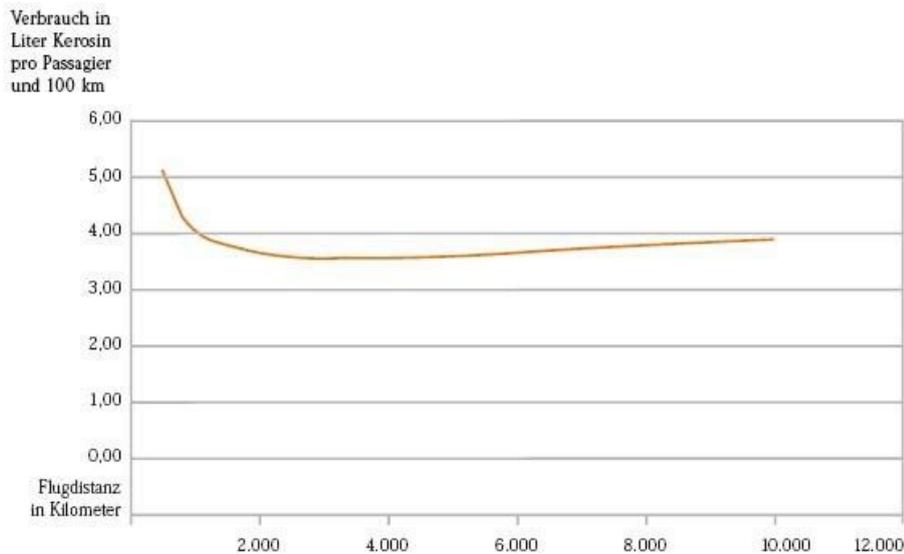


Abbildung 1: Treibstoffverbrauch eines voll besetzten Airbus A340 mit 271 Sitzen in Abhängigkeit von der Flugstrecke (DLR, 2000)

### 3.2.2 Umwege und Warteschleifen

Als Umwege zählen die Kilometer, die ein Flugzeug auf dem Weg vom Start- zum Zielflughafen noch zusätzlich zur Großkreisdistanz zurücklegt (die Großkreisdistanz entspricht der kürzesten Verbindung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche). Ausgenommen sind die Warteschleifen, die separat gezählt werden (siehe unten). Umwege sind statistisch erfasst worden. Abbildung 2 zeigt die Umwege auf Flügen in Deutschland. Dargestellt ist der Umwegfaktor (Quotient aus echter Flugstrecke inkl. Umweg durch Großkreisdistanz) in Abhängigkeit von der Großkreisdistanz.

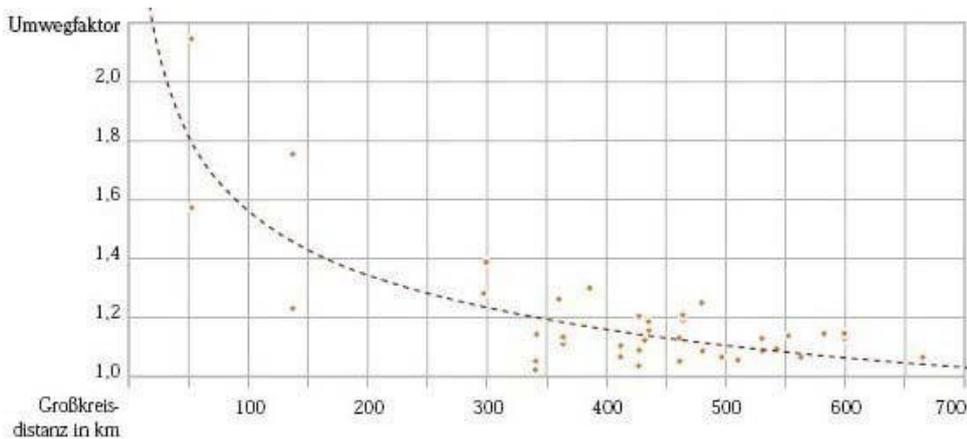


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Umwegfaktor und Großkreisdistanz (atmosfair, AAI 2013)

Wenn man den Umweg absolut ausdrückt, liegt er bei fast allen Distanzen im Bereich von 50 Kilometern. Ähnliche Untersuchungen über Langstreckenflüge kommen zu denselben Ergebnissen. Der Emissionsrechner berücksichtigt dieses empirische Ergebnis, indem er die Umwege pauschal zu allen Flügen dazurechnet. Dies erscheint angesichts der geringen Bedeutung dieses Faktors angemessen genau

Auch Warteschleifen werden seitens der Flugsicherung vorgeschrieben. Eine Einflussnahme von einer Airline zu Lasten einer anderen Airline ist dabei nicht möglich. Der atmosphärische Emissionsrechner berücksichtigt die Warteschleifen daher nicht.

### 3.2.3 Operations: Continuous Descent Approach (CDA), langsames Fliegen

Der Begriff Operation bezeichnet den Betrieb eines Flugzeuges und kann mit mehreren Bedeutungen gebraucht werden. Hier umfasst er bestimmte Formen der Flugzeugführung, die sich systematisch auf den Treibstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub> – Emissionen auswirken. Im Folgenden werden die beiden Formen diskutiert, die am meisten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch eines Fluges haben.

#### Continuous Descent Approach (CDA)

Das CDA ist ein spezielles Anflugverfahren, welches im Vergleich zum herkömmlichen Anflug einige Besonderheiten aufweist. Beim CDA schaltet der Pilot in einer bestimmten vorgegebenen Flughöhe (diese kann je Flughafen und Verkehrssituation variieren) die Triebwerke auf minimale Leistung oder, wenn möglich, in Leerlauf und lässt das Flugzeug somit im kontinuierlichen Gleitflug bis zum Beginn des Endanflugs sinken, wodurch Treibstoffverbrauch und Lärmemissionen gesenkt werden können. Das herkömmliche Anflugverfahren dagegen ist durch Wechseln von Beschleunigung und Sinkphasen gekennzeichnet, dadurch fallen lärmintensive Horizontalflugphasen an, die es beim CDA nicht gibt.

Das CDA hat aber auch Nachteile: Die Sinkfluggeschwindigkeit jedes Flugzeugtyps beim Gleitflug mit Triebwerken im Leerlauf ist unterschiedlich und nicht veränderbar. Die herkömmliche laterale und vertikale Staffelung der Flugverkehrskontrolle, die möglichst viele Flugzeuge hintereinander auf die Endanfluglinie eines Flughafens führt, ist mit dem CDA nicht mehr möglich. Daher wird CDA aktuell z.B. in Deutschland nur auf einigen Flughäfen zu verkehrsarmen Zeiten (z.B. nachts) ermöglicht.

Durch CDA sind bei einem Flug Kerosineinsparungen von bis zu 430 kg für eine Boeing 747 und bis zu 434 kg für einen Airbus A330 möglich (Cao et al., o.J.). In einer Sensitivitätsanalyse hat der AAI diese Werte ins Verhältnis gesetzt zum gesamten Treibstoffverbrauch verschiedener Flüge. Je nach Distanz (Mittelstrecken- oder Langstreckenflug) und Flugzeugtyp bestimmte er dabei eine Reduktion im Treibstoffverbrauch um 0,5 – 1,5%.

Würde eine Airline auf allen ihren Flügen dieses Einsparpotential umsetzen, könnte sie ihr Gesamtergebnis im AAI Global Ranking entsprechend verbessern. Wegen der oben genannten Restriktionen des Continuous Descent Approach geht der AAI aber davon aus, dass derzeit nur an einer kleinen Minderheit der Flughäfen das Landen mittels CDA möglich ist. Daher wird das Kerosinsparpotential einer Airline, die viele Flughäfen anfliegt in der Realität deutlich weniger betragen als 1%. Somit wird der CDA im AAI nicht berücksichtigt.

#### Reduzierte Fluggeschwindigkeit

Eine Reduktion der Geschwindigkeit im Reiseflug verringert den Treibstoffverbrauch eines Flugzeuges und somit seine CO<sub>2</sub> – Emissionen. Fluggesellschaften verfolgen daher diesen Ansatz, um ihre Treibstoffkosten zu senken.

Langsames Fliegen auf einer Flugroute kann aber auch Folgewirkungen haben. Geringere Geschwindigkeit kann eine Verlängerung der Flugzeit nach sich ziehen, wodurch u.U. Änderungen im Flugplan oder Neuabstimmung von Anschlussflügen nötig sein können. Weiterhin lässt sich die Geschwindigkeit nicht beliebig reduzieren. Wird die Drehzahl der Triebwerke zu weit gedrosselt, laufen diese u. U. nicht mehr im optimalen Bereich. Dem Einsparpotential sind somit Grenzen gesetzt.

Mittels dem Programm Piano-x (siehe Kapitel 5.1) hat der AAI für verschiedene Flüge (Kurz-Mittel- und Langstreckenflüge mit verschiedenen Flugzeugtypen) den Treibstoffverbrauch jeweils zweimal berechnet: Einmal mit der typischen Geschwindigkeit im Reiseflug des jeweiligen Flugzeugtyps sowie ein zweites Mal mit einer um 50 km/h reduzierten Geschwindigkeit<sup>3</sup>.

Die übrigen Parameter (Bestuhlung, Passagierauslastung usw.) blieben dabei gleich. Die Differenz beider Ergebnisse bildet die Treibstoffersparnis, die durch langsames Fliegen erzielt werden kann. Diese beträgt zwischen 0,4 und 1,4%. Der AAI geht davon aus, dass eine Airline wegen der genannten Restriktionen und Nachteile nur auf einem Teil aller Flüge die Reisefluggeschwindigkeit reduzieren wird oder kann. Daher wird das Reduktionspotential in der Realität geringer sein als 1%. Somit wird Langsames Fliegen nicht vom AAI berücksichtigt.

### 3.2.4 Bodenbetrieb und Flughafengelände

Die Ausstattung, die Dimensionierung sowie der Betrieb des Flughafens haben Auswirkung auf den Treibstoffverbrauch eines Flugzeugs am Boden. Folgende Punkte spielen eine Rolle.

#### Rollen am Boden

Flugzeuge müssen vor dem Start noch vom Terminal zur Startbahn rollen und verbrauchen dabei Treibstoff, der in den Flugprofilen nicht erfasst ist. Das Gleiche gilt für das Rollen zum Terminal nach der Landung. Abhängig von der Entfernung vom Terminal zur Start- und Landebahn, kann das Rollen unterschiedlich lange dauern. Der Verbrauch an Kerosin durch das Rollen am Boden beträgt in Deutschland bis zu ca. 2,5 kg für die Rollvorgänge vor und nach dem Flug. Der Umfang bzw. die Dauer des Rollens entzieht sich dem Einfluss der Airlines, zudem sind alle gleichermaßen betroffen. Daher geht er AAI davon aus, dass die Unterschiede zwischen den Airlines z.B. durch effizientere Operation hier eine Größenordnung kleiner sind als der absolute Verbrauch, also höchstens ca. 0,3 kg Kerosin pro Passagier. Dies ist selbst bei einem Kurzstreckenflug von 400 km weniger als 1% des Treibstoffverbrauchs pro Passagier.

#### Push-Service

Je nach Aufbau des Flughafens kann der Pushback – Service nötig sein. Dieser wird von Flugzeugschleppern durchgeführt. Nötig wird dies, wenn das Flugzeug vor dem Flug mit der Nase zum Terminal steht, da die meisten Strahlflugzeuge keine Möglichkeit haben, rückwärts zu rollen und die Position aus eigener Kraft zu verändern. Die Airlines sind also den Zwängen des Flughafenbetriebs unterworfen. Unabhängig davon, ob das jeweilige Flugzeug dabei mittels eigener Triebwerke oder mittels Flugzeugschlepper bewegt wird: der Anteil des Treibstoffverbrauchs (von Parking Position bis zum Beginn des Taxiing dauert es maximal wenige Minuten) ist so gering, dass er mangels Relevanz nicht vom AAI betrachtet wird.

#### APU

Die auxiliary power unit (APU) ist ein Hilfstriebwerk, welches elektrische Energie für den Betrieb des Flugzeugs liefert, wenn dieses am Boden steht und seine Triebwerke abgeschaltet hat. Zudem dient die APU als Anlasser für die Haupttriebwerke. Während die APU Treibstoff

---

<sup>3</sup> Die 50 km/h sind hier ein Beispiel in der Sensitivitätsanalyse.

verbraucht, kann, je nach Flughafen, Bodenstromversorgung möglich oder vorgeschrieben sein, wodurch der Treibstoffverbrauch der APU entfällt. Das betrifft alle Airlines gleichermaßen.

In Deutschland dauert das Rollen eines Flugzeugs am Boden pro Flug durchschnittlich knapp 15 Minuten. Dabei laufen die Triebwerke mit niedriger Leistung. Eine Studie, die den Treibstoffverbrauch für das Rollen an innerdeutschen Flughäfen untersuchte, kommt zu dem Ergebnis, dass für beide Rollvorgänge zusammen pro Passagier etwa 2,5 Kilogramm Kerosin verbraucht werden (Brockhagen, 1995). Diese Menge wird vom Emissionsrechner pauschal auch für alle anderen Flüge von und nach bzw. außerhalb von Deutschland angenommen. Dies ist sicherlich nicht exakt, erscheint aber angesichts der insgesamt geringen Bedeutung dieses Effekts angemessen.

### 3.2.5 Meteorologische Bedingungen

Winde stellen eine nicht vernachlässigbare Einwirkung auf die Flugphase und den Treibstoffverbrauch dar. Sie treten entweder unregelmäßig im Zuge momentaner Wetterkonditionen oder als regelmäßige, regionale Phänomene auf. Fluggesellschaften können bekannte Winde bei der Festlegung der Flugroute einplanen, da diese sich entweder als hinderlich erweisen oder sich günstig auswirken, da sie die effektive Flugzeit verkürzen und den Treibstoffverbrauch verringern.

Jedoch sind vor allem über Land die Flugrouten sowie die Flughöhen häufig vorgeschrieben. Lokale Wetter- und Windeinflüsse lassen sich hier nicht umfliegen, d.h. unerwartet auftretender Gegenwind, der den Treibstoffverbrauch erhöht, lässt sich hier nicht vermeiden. Die Airlines haben also kaum bis gar keine Möglichkeit, sich lokal begrenzten sowie wechselnden Winden zu entziehen. Mangels der Einflussmöglichkeit wird der Wind im Airline Index nicht weiter betrachtet.

### 3.2.6 Airline (Flugzeugflotte und Alter)

#### Flugzeugalter

Flugzeuge sind durch andauernden Betrieb Materialermüdung sowie Verschleiß unterworfen. Ablagerungen oder kleinste Oberflächenveränderungen am Flugkörper beeinflussen die aerodynamischen Eigenschaften. Die Folge hiervon ist u.a. erhöhter Treibstoffverbrauch. Deshalb spielt das Alter der Flugzeugflotte eine bedeutende Rolle für die Treibstoff- und damit CO<sub>2</sub>-Effizienz einer Airline.

Durch gute Wartung kann dem entgegengewirkt werden. Intervalle, Qualität und Umfang der Wartung sind aus Sicherheitsgründen streng geregelt<sup>4</sup>. Intervalle und Umfang sind in Instandhaltungsprogrammen spezifiziert, welche die jeweilige Airline bei den zuständigen Luftsicherheitsbehörden genehmigen lassen muss.

Somit ist davon auszugehen, dass Verschleiß, Materialermüdung und Wartung keinen nennenswerten Unterschied im Treibstoffverbrauch zwischen den Airlines verursachen. Da die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs aus wirtschaftlichen Gründen ohnehin im Fokus der Airlines steht, ist darüber hinaus zu erwarten, dass häufigere als vorgeschriebene Wartung von allen Airlines dann durchgeführt wird, wenn dies zu signifikanten Verbesserungen führt und somit Unterschiede zwischen Airlines klein bleiben.

---

<sup>4</sup> in der EU etwa durch VO 2042/200332

### 3.2.7 Flugzeugtyp

Der Treibstoffverbrauch ist vom eingesetzten Flugzeug abhängig. Generell wird zwischen Propellerflugzeugen und Flugzeugen mit Strahltriebwerken unterschieden. Jedes Flugzeug ist auf eine bestimmte Distanz sowie eine Fracht- und Passagiertransportkapazität hin optimiert. Ein Betrieb außerhalb dieser Optima ist möglich, lässt jedoch den spezifischen Treibstoffverbrauch ansteigen. Jede Flugverbindung hat ein Passagierpotential, welches die Airlines bedienen. Entsprechend der somit nötigen Transportleistung, der Flugfrequenz (wie oft wird die Städteverbindung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes bedient) und der zu fliegenden Distanz kann die Airline verschiedene Flugzeugmodelle einsetzen.

Der atmosfair Emissionsrechner unterscheidet insgesamt 121 verschiedene Flugzeugtypen und die zugehörigen Varianten und erreicht damit eine Marktabdeckung von rund 97% (Stand 2016).

### 3.2.8 Triebwerke

Der atmosfair Emissionsrechner unterscheidet Triebwerke mit einem so genannten Triebwerksfaktor. Dieser bildet die beiden zentralen Parameter spezifischer Treibstoffverbrauch (specific fuel consumption, SFC) und Ozonbildung bzw. Methanlebenszeitverkürzung durch  $\text{NO}_x$ -Emissionen ab. Der Triebwerksfaktor ist kleiner, gleich oder größer eins, je nachdem, ob das Triebwerk inkl. der  $\text{NO}_x$ -Korrektur im Vergleich zu anderen Triebwerken, die an einem Flugzeugtyp eingesetzt werden können, mehr oder weniger Treibstoff verbraucht.

Im JP Fleet Katalog (JP Fleet) sind die Flugzeugflotten der betrachteten Airlines inklusive der verwendeten Triebwerke enthalten. Ist das Triebwerk eines Flugzeuges bestimmt, berechnet der atmosfair Emissionsrechner den effektiven SFC und die  $\text{NO}_x$ -Korrektur.

#### 1. Bestimmung des effektiven SFC

Mit effektivem SFC ist der SFC eines Triebwerks in Kombination mit einem bestimmten Flugzeugtyp gemeint. Die Bestimmung des effektiven SFC läuft in drei Schritten ab:

1. Bestimmung des isolierten Triebwerk-SFC mit der Boeing Fuel Flow Method 2.  
Korrektur des isolierten SFC mit dem Luftwiderstand des Triebwerks.
2. Korrektur des isolierten SFC mit dem Gewicht des Triebwerks.  
(atmosfair, AAI 2013)

Dieses Verfahren berücksichtigt die wesentlichen Kompromisse, die Airlines bei Triebwerken in der Praxis eingehen, nämlich, dass geringerer SFC häufig mit höherem Gewicht und größerem Durchmesser eines Triebwerkes erkauft werden. Dabei können sich die reinen SFCs verschiedener Triebwerke um bis zu etwa 10% oder mehr unterscheiden. Die Korrektur um den Luftwiderstand fällt dann um eine Größenordnung kleiner aus und die Korrektur um das Gewicht des Triebwerks im Mittel noch geringer.

#### 2. $\text{NO}_x$ -Korrektur (Erwärmung vs. Abkühlung)

Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) haben neben der Bildung von Ozon auch den Effekt, die Lebensdauer des Treibhausgases Methan zu verkürzen (abkühlender Effekt). Beide Effekte sind kurzlebig im Vergleich zur Lebensdauer von  $\text{CO}_2$ . Um die Effekte von  $\text{NO}_x$  über Ozon und Methan mit dem Effekt des SFC und damit  $\text{CO}_2$  vergleichen zu können, benutzt der AAI näherungsweise absolute Global Warming Potentials (AGWPs) von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{O}_3$  (Lee et al., 2020). Der Zeithorizont wird hierbei auf 100 Jahre festgelegt, eine internationale Konvention im Rahmen der UNFCCC-Klimaverhandlungen.

Bei der Verwendung der AGWPs verwendet der AAI bei jedem Schadstoff Mittelwerte nach dem derzeitigen Stand der Forschung. Durch den langen Zeithorizont von 100 Jahren, auf dem nur das CO<sub>2</sub> wesentliches Gewicht behält, wird so der NO<sub>x</sub> Korrekturfaktor klein und fällt i.d.R. nicht größer aus als der Gewichtskorrekturfaktor.

Insgesamt unterscheidet der atmosfair Emissionsrechner 408 Triebwerke und erreicht damit eine Marktabdeckung von 96%.

### 3.2.9 Flugklasse (Bestuhlung)

In einem Flugzeugrumpf besteht nur eine begrenzte Fläche zur Bestuhlung zur Verfügung. Die Bestuhlung ist aber wiederum direkt mit dem Treibstoffverbrauch korreliert, weil sich der Treibstoffverbrauch des Flugzeuges nur unwesentlich ändert, wenn viel oder wenig Sitze untergebracht sind. Da aber die Business-Sitze mehr Platz benötigen als die Economy-Sitze, nehmen bei festgelegtem Gesamtplatz Business-Sitze Economy-Sitzen Platz weg. Im Extremfall kann ein Business-Sitz mehr Platz beanspruchen als zwei Economy-Sitze. Gemessen an der Anzahl der insgesamt im Flugzeug vorhandenen Sitze schlagen daher beim Treibstoffverbrauch Economy-Passagiere unterdurchschnittlich und Business-Passagiere überdurchschnittlich zu Buche.

Ausschlaggebend für die Stärke dieses Effektes ist das Verhältnis von Business- zu Economy-Plätzen und der Platzverbrauch von einem Business- zu einem Economy-Sitz. Diese variieren von Fluggesellschaft zu Fluggesellschaft und von Flugzeugtyp zu Flugzeugtyp. Um den Treibstoffverbrauch pro Sitzplatz in den verschiedenen Reiseklassen zu berechnen, greift der atmosfair Emissionsrechner auf Untersuchungen bezüglich der Bestuhlungspläne der weltweit 40 größten Fluggesellschaften zurück (Buchner, 2007).

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die durchschnittliche Sitzplatzverteilung im Verhältnis von 74:20:6 (Economy Sitzplätze : Business Sitzplätze : Erste Klasse Sitzplätze) bei insgesamt 100 verfügbaren Sitzplätzen erfolgt. Der durchschnittliche Platzverbrauch der unterschiedlichen Sitzplätze entspricht dabei dem Verhältnis 1:1,9:2,6<sup>5</sup>. Durch die Kombination der beiden Verhältnisse ergibt sich schließlich daraus ein Verhältnis von 0,8:1,5:2,0 für den Treibstoffverbrauch. Dies bedeutet, dass ein Passagier in der Economy Klasse im globalen Mittel etwa 20% weniger Treibstoff verbraucht als der Durchschnitt aller Sitzplätze. Ein Passagier in der Business Klasse verbraucht dagegen im globalen Mittel 50% mehr und ein Passagier in der Ersten Klasse das doppelte.

Der atmosfair Emissionsrechner berücksichtigt aus diesem Grund die Flugklassen auf den jeweiligen Strecken. Dazu nutzt er für die jeweilige Aufteilung der Sitzklassen bei den unterschiedlichen Airlines Detaildaten, so dass die exakten Faktoren für jeden einzelnen Flug angewendet werden können.

### 3.2.10 Auslastung Passagiere

Die von den Fluggesellschaften erreichte Passagierauslastung hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von den Ticketpreisen, der Flugart und der Flugregion. Die Auslastung multipliziert mit der Passagier- (Bestuhlung) sowie Frachtkapazität ergibt die tatsächlich transportierte Nutzlast. Die Auslastung ist also ein zentraler Faktor für die Nutzlast und somit den Treibstoffverbrauch (atmosfair, AAI 2013). Der atmosfair Emissionsrechner berücksichtigt daher den „Passenger Load Factor“ (PLF) der einzelnen Airlines.

---

<sup>5</sup> www.flightguru.in

### 3.2.11 Beiladefrachtkapazität

Für jedes Flugzeugfabrikat, unabhängig von der Fluggesellschaft, existieren Angaben zu maximal zulässigem Gewicht bzgl. Start, Landung, Beladung und Betankung. Das „Maximum Zero Fuel Weight“ (MZFW) bezeichnet das maximal zulässige Gewicht eines Flugzeugs inkl. Beladung (Passagiere und Fracht) und ohne Treibstoff. In Abhängigkeit der Bestuhlung und Passagierauslastung ist der Zuladung an Luftfracht somit eine Obergrenze gesetzt. Diese wird jedoch aus zweierlei Gründen selten erreicht.

1. Das Volumen des Frachtraumes ist begrenzt. Bevor die maximal mögliche Frachtmasse erreicht wird, ist oftmals der Frachtraum im Lower Deck vollständig ausgefüllt.
2. Bezieht man das Kerosin mit ein, darf das „Maximum Takeoff Weight“ (MTOW), das maximal zulässige Gesamtgewicht beim Start, nicht überschritten werden. Daher kann bei längeren Flügen und entsprechender Betankung die zur Verfügung stehende Frachtkapazität gemäß dem MZFW nicht ausgenutzt werden, da das Gesamtgewicht das MTOW überschreiten würde.

Die Frachtkapazität eines Fluges ist damit nicht konstant, sondern hängt von anderen Faktoren wie Distanz, Bestuhlung und Flugzeug ab. Diese sind direkt von der Airline kontrollierbar. Eine Betrachtung als Einflussgröße auf die tatsächliche Nutzlast ist außerdem notwendig, da sich die Airlines in der Handhabung der Frachtkapazität signifikant unterscheiden. Der atmosfair Emissionsrechner berücksichtigt daher neben dem „Passenger Load Factor“ auch den „Cargo Load Factor“ der jeweiligen Airline.

### 3.2.12 Auslastung Beiladefracht

Die von den Fluggesellschaften erreichte Auslastung der Beiladefracht hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie den Preisen und Kapazitäten bei der Fracht ab. Die Airlines haben die Möglichkeit, bei niedrigeren Passagierzahlen die Menge an transportierter Beiladefracht zu erhöhen.

Die Auslastung ist der gewichtigste Faktor beim spezifischen Treibstoffverbrauch (atmosfair, AAI 2013). Da zudem die Airlines die Auslastung vollständig kontrollieren und sich dabei unterscheiden, wird die Auslastung der Beiladefracht im atmosfair Emissionsrechner berücksichtigt.

### 3.2.13 Zwischenergebnis CO<sub>2</sub>-Emissionen

Als Zwischenergebnis ergibt sich aus den obenstehenden Faktoren die Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Passagier auf einer bestimmten Strecke, geflogen mit einem bestimmten Flugzeug einer bestimmten Airline.

Alle Detaildaten dazu sind in der atmosfair Datenbank für alle Strecken dieser Welt abgelegt und werden jährlich aktualisiert. Der atmosfair Emissionsrechner deckt damit rund 92% des weltweiten Flugverkehrs ab.

### 3.2.14 Darstellung im Emissionsrechner

- Der Nutzer kann im online-Rechner den Flugzeugtyp individuell wählen. Der atmosfair Emissionsrechner berechnet dann den genauen Wert der CO<sub>2</sub>-Emissionen anhand des individuellen Flugprofils, des Flugzeugtyps und den weiteren oben genannten Kriterien.
- Wenn keine näheren Angaben des Flugzeugtyps durch den Nutzer erfolgen, bildet atmosfair einem Mittelwert über alle Flugzeuge einer Airline, die auf der eingegebenen Strecke fliegen. Der Rechner zeigt dann die Werte für die beiden besten Airlines auf der gesuchten Strecke an, sowie den Wert für eine Durchschnittsairline (Mittelwert aller Airlines, die auf der gesuchten Strecke fliegen).

## 4 Klimawirkung von Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen

*Zusammenfassung: Flugzeugtriebwerke emittieren eine Reihe von Schadstoffen, die das Klima direkt oder indirekt erwärmen. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist bei der Entstehung und Wirkung am einfachsten zu beschreiben. Es entsteht bei der Verbrennung von Kerosin im gleichen Maße, wie Kerosin verbraucht wird. CO<sub>2</sub> dient als Grundlage der Berechnung der Klimaschädlichkeit. Die anderen Schadstoffe und ihre Wirkungen können über eine international anerkannte Berechnungsmethode zusammengefasst werden, um ihre Erwärmungswirkung in diejenige von CO<sub>2</sub> umzurechnen. Der Emissionsrechner berechnet zunächst den Treibstoffverbrauch pro Passagier und ermittelt darauf aufbauend die CO<sub>2</sub>-Menge, deren Erwärmungswirkung derjenigen aller Schadstoffe des Fluges zusammengenommen vergleichbar ist (effektiv wirksame CO<sub>2</sub>-Emissionen). Dies ist die vom Rechner ausgegebene CO<sub>2</sub> Menge, die dann von atmosfair in Klimaschutzprojekten kompensiert wird.*

*Die Klimawirksamkeit der Emissionen und ihrer Effekte hängt von der Flughöhe und dem Zustand der Atmosphäre zu dem Zeitpunkt ab, an dem das Flugzeug sie durchfliegt und die Schadstoffe ausstößt. Klimawirkung von Non-CO<sub>2</sub> Emissionen werden nur für diejenigen Emissionen berechnet, die ein Flugzeug entlang des jeweiligen Höhenprofils in Höhen über 9000m Höhe emittiert. Bei einem Kurzstreckenflug von 400 km ist dieser Anteil über 9000m in der Regel (abhängig vom Flugzeugtyp) 0% und steigt dann nach und nach auf über 90% an (bei Distanzen von 10.000 km und mehr). Für die Berechnung der Klimawirkung von Non-CO<sub>2</sub> Emissionen über 9000 Meter Höhe werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dieser Höhe mit einem Aufschlag von 2 multipliziert und dann zum reinen CO<sub>2</sub> addiert („Faktor 3“).*

Die Klimawirkung der verschiedenen Schadstoffe ist im Detail vom IPCC, dem Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderung der Vereinten Nationen (IPCC 1999, 2013) und in darauf aufbauenden Studien beschrieben worden (u.a. Grassl, Brockhagen 2007, Dahmann et al. 2019, Lee et al. 2020). Wir sprechen hier nur die wichtigsten Schadstoffe und Effekte an.

### 4.1 Stickoxide und Ozon

Der Aufbau des Treibhausgases Ozon aus Stickoxiden unter der Einstrahlung der Sonne geschieht nach ähnlichen chemischen Smogreaktionen wie bei den Stickoxiden aus Autoabgasen in sommerlichen Großstädten. In großen Flughöhen von etwa über 9 Kilometern läuft die Smogreaktion allerdings effektiver ab als am Erdboden. Dabei ist die bereits vorhandene Konzentration von Stickoxiden maßgeblich: Sind wenig Stickoxide vorhanden, läuft die Bildung von Ozon schnell ab, sind dagegen sehr viele da, können weiter hinzukommende Stickoxide sogar dazu führen, dass wieder Ozon abgebaut wird. Daher spielt es eine wichtige Rolle, ob ein Flug auf einer Route durchgeführt wird, die häufig oder selten beflogen wird und ob das Flugzeug bis in die kritischen Höhen aufsteigt.

### 4.2 Partikel und Eiswolken

Langlebige Kondensstreifen und hohe Schleierwolken aus Eis können sich nur bilden, wenn die Luft, durch die das Flugzeug fliegt, feucht und kalt genug ist. Dies ist in Äquatornähe nur in sehr großen Höhen von etwa 12–16 Kilometern über dem Meeresspiegel der Fall. Da auch moderne zivile Jets selten so hoch fliegen, entstehen hier seltener Kondensstreifen und Eiswolken als in den gemäßigten Breiten und in den Polregionen der Erde, wo diese Wolken bis hinunter zu Höhen von etwa 5 Kilometern entstehen können. Die Luftfeuchtigkeit hängt im Allgemeinen außerdem von der Jahreszeit ab, sodass auch diese die Auftrittswahrscheinlichkeit der flugzeugbedingten Bewölkung beeinflusst.

### 4.3 Erfassung der Emissionen im Emissionsrechner

Der Emissionsrechner kann diese Effekte nicht im Detail berücksichtigen, da dazu ein enormer Datenaufwand geleistet werden müsste, der in keinem guten Verhältnis zur erzielten Genauigkeit stünde. Außerdem können weder der Passagier noch die Fluggesellschaft Einfluss auf den gegenwärtigen Zustand der Atmosphäre auf der Route und zum Zeitpunkt eines Fluges nehmen. Daher wäre es nicht gerechtfertigt, dass manche Passagiere einen höheren Aufschlag bezahlen müssten als andere. Konsequenterweise berücksichtigt der Emissionsrechner nur den wichtigsten systematischen Parameter, die Flughöhe: Dabei werden die Emissionen welche während eines Fluges in über 9 Kilometer Höhe entstehen mit einem Faktor von 2 zusätzlich zum reinen CO<sub>2</sub> beaufschlagt und zu diesem hinzugezählt (insgesamt also Faktor 3). Damit wird die Wirkung von Kondensstreifen, Eiswolken und Ozon aus Stickoxiden des Flugverkehrs mit Mittelwerten berücksichtigt. Da manche Flüge diese Flughöhe gar nicht erreichen und auch bei den übrigen Flügen immer ein Teil der Emissionen unter 9 Kilometer ausgestoßen wird (bei Start und Landung), ergibt sich über alle Flüge weltweit gemittelt rechnerisch ein mittlerer Aufschlag-Faktor von etwa 2,7.

### 4.4 Metriken zur Berechnung der Klimawirkung: RFI vs. GWP

Die Klimawirkung von Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen in großer Höhe können mit sogenannten Metriken auf die Klimawirkung einer bestimmten Menge CO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet werden.

#### RFI

Eine Metrik, der sogenannten Radiative Forcing Index (RFI), basiert auf dem Strahlungsantrieb der Schadstoffe, also die direkte Veränderung der Energiebilanz der Atmosphäre durch den eingebrachten Schadstoff. Der RFI drückt für zu einem bestimmten Zeitpunkt (also z.B. 2015) aus, wie das Verhältnis dieser Energiebilanzveränderungen von den Schadstoffen ist, die sich zu diesem Zeitpunkt durch den globalen Flugverkehr in der Atmosphäre befinden. Das Verhältnis beträgt derzeit etwa 3 zu 1 (Faktor 3). Das bedeutet, dass die direkte Erwärmungswirkung aller Schadstoffe des Flugverkehrs (Non-CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>) dreimal höher ist, als diejenige des CO<sub>2</sub> allein (IPCC, 1999). Nach dieser Metrik wäre also jeder Flug dreimal klimaschädlicher als sein reiner CO<sub>2</sub>-Ausstoß<sup>7</sup>. Der Nachteil des RFI als Metrik für die Bewertung von Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, dass er bei konstantem Flugverkehr nicht konstant bleibt. Bei einer global gleichmäßig über viele Jahre fliegenden Flotte würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen wegen ihrer langen Lebenszeit in der Atmosphäre kumulieren und ihr Anteil stetig wachsen, während die Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen gleich bleiben (immer gleich viel Ozon bzw. Zirruswolken am Himmel). Der aktuelle Wert für den RFI beläuft sich auf 3 (IPCC, 2013 für cirrus und contrails, Lee et al., 2020, für alle anderen Effekte).

#### GWP

Während der RFI 1999 vom IPCC entwickelt wurde, um die Klimawirksamkeit von Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen abzubilden, gibt es heute (Stand 2022) für den Flugverkehr auch andere Metriken. Dazu gehört vor allem das Global Warming Potential (GWP), das in anderen Bereichen vom IPCC seit 1990 benutzt wird, um die Klimawirksamkeit langlebiger Treibhausgase miteinander zu vergleichen. Das GWP integriert die momentane Erwärmungswirkung eines Treibhausgases über einen festzulegenden Zeithorizont (z.B. 100 Jahre nach der Emission), innerhalb dessen die Konzentration des Gases in der Atmosphäre entlang seiner atmosphärischen Lebenszeit abnimmt, und vergleicht diese mit der Klimawirkung einer emittierten Tonne CO<sub>2</sub> nach dem gleichen Ansatz.

Das GWP war bisher allerdings nur für langlebige Treibhausgase anwendbar, wogegen im Flugverkehr die emittierten Treibhausgase primär kurzlebig sind. Aber die Forschung hat eine Methode abgeleitet, mit der auch ein GWP für den Flugverkehr abgeleitet werden kann (Lee et al. 2020). Die folgenden Annahmen und Literatur liegen deshalb dem atmosphair

Emissionsrechner zugrunde:

- GWP Zeithorizont (UNFCCC Konvention):	100 Jahre
- Diskontierung (Azar et al., 2012):	3%
- Akkumuliertes RF Flugverkehr CO <sub>2</sub> in 2018 (Lee et al., 2020):	34 mW/m <sup>2</sup>
- Schadstoffe und Effekte (Lee et al., 2020 und IPCC, 2013): Sulfate, Ruß, Zirkuswolken und induzierte Zirkuswolken, (effective Radiative Forcing, ERF, Lee et al., 2020):	O <sub>3</sub> , Methan, H <sub>2</sub> O 66,6 mW / m <sup>2</sup>
- Level of Scientific Understanding (IPCC, 2013):	Mindestens low (very low ausgeschlossen)

Mit diesen Daten ergibt sich nach der Methode von David Lee ein GWP100 (Lee et al., 2020, Azar et al., 2012) ein „GWP-basierter Aufschlagsfaktor“ von 3. Damit sind die beiden verschiedenen Metriken RFI und GWP quantitativ in guter Übereinstimmung, obwohl sie qualitativ ganz unterschiedlich ansetzen. Auch die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) nutzt die Metrik GWP\* und spricht von einer dreifachen Klimawirkung im Gegensatz zum reinen CO<sub>2</sub> (EASA 2020).

Hervorzuheben ist hierbei die besondere Rolle des Zeithorizonts: Je kürzer dieser gewählt wird, umso stärker fallen die kurzlebigen Gase ins Gewicht, und umso höher wird der resultierende Aufschlagsfaktor für den Flugverkehr. So kann bei einem Zeithorizont von 20 Jahren der Aufschlagsfaktor bereits 4 betragen (Lee et al., 2020). Damit spielt beim GWP im Vergleich zum RFI die Zeit eine prominentere Rolle. Eine Erweiterung des GWP ist das GWP\*, bei dem besonders die Wirkung kurzlebiger Gase bei wachsendem Flugverkehr betrachtet wird (Lee et al., 2020) und das im Ergebnis wie das GWP100 (siehe oben) zu einem Aufschlagsfaktor von 3 für den Flugverkehr führt.

ATR

Eine weitere Metrik, die ATR (Average Temperature Response) Metrik, kann für verschiedene Zeithorizonte gewählt werden, wodurch kurz- und langlebige Gase fokussiert werden können. Die ATR Metrik wird einer Studie verwendet, die vom Umwelt Bundesamt in Auftrag gegeben wurde. Die Wirkung von Non-CO<sub>2</sub> Emissionen über einen Zeithorizont von 100 Jahren wird mit drei bis fünffacher Wirkung angegeben (Dahlmann et al. 2019).

#### 4.5 Schlussfolgerung Klimawirkung Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen:

Basierend auf den aktuellen Forschungsergebnissen ergibt sich ein Faktor 3 für Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Berücksichtigung von Non-CO<sub>2</sub>.

Dies ist ein konservativer, quantitativ-qualitativer Mittelwert aus zwei Metriken (RFI und GWP) und ihren Bandbreiten. Beide Metriken stimmen bezüglich ihres Zahlenwertes (3) überein, wobei das höherwertige GWP sogar die geringere Bandbreite aufweist.

Dieser aktuelle Wert von 3 liegt genau in der Mitte des alten IPCC Bandbreite des RFI, der 1999 vom IPCC mit 2-4 angegeben wurde.

Berücksichtigung im atmosfair Emissionsrechner

In der Konsequenz multipliziert der atmosfair Emissionsrechner alle CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in Höhen von über 9 Kilometern erfolgen, mit einem Faktor von 3, um die Klimawirkung des Fluges in CO<sub>2</sub> wiederzugeben. CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in Flughöhen unter 9 Kilometern emittiert werden, erhalten dagegen keinen solchen Aufschlagsfaktor, sondern gehen unmittelbar in die Klimabilanz des Fluges ein.

## 5 Datenquellen

*Zusammenfassung: Der Emissionsrechner verwendet nur unabhängige wissenschaftliche Datenquellen. Daher sind alle Hauptquellen des Emissionsrechners Ergebnisse von unabhängigen wissenschaftlichen Studien im Auftrag des UBA, der Vereinten Nationen oder der EU. Weitere Daten stammen aus der veröffentlichten Fachliteratur oder einschlägigen Kompendien oder spezialisierten Datenbankdiensten.*

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fluges erfolgt im atmosfair Flugemissionsrechner anhand der detaillierten Methode des atmosfair Airline Index (AAI). Die Datenquellen gehören dabei zum Herz des AAI. An sie stellt der AAI hohe Anforderungen, was die Qualität, Tiefe, Aktualität und Unabhängigkeit der Informationen betrifft. Der AAI greift ausschließlich auf hochrangige Quellen von internationalen Organisationen oder langjährig etablierten, spezialisierten Dienstleistern zurück. In keinem Fall nutzte der AAI Daten, die die Airlines über ihre Webseiten, Geschäftsberichte oder eigene Statistiken etc. veröffentlichen. Um die Qualität der Daten sicherzustellen, deckt der AAI jeden Einflussfaktor durch mindestens zwei unabhängige Quellen ab und unterzieht diesen Konsistenzchecks. Die maßgeblichen Einflussfaktoren des AAI speisen sich aus den folgenden Datenquellen.

### 5.1 Piano-x

Die Datenbank und Software „Piano-x“ von Lissys Ltd wird zur Treibstoff- und Emissionsberechnung von Flugzeugen eingesetzt (PIANOX, 2008). Lissys Ltd ist ein Unternehmen mit Sitz in Großbritannien. Flugzeughersteller, sowie Flugbehörden und Universitäten und Forschungseinrichtungen nutzen Piano-x (siehe Appendix 2). Auch die ICAO greift für ihren Emissionsrechner auf Piano-x zurück. Piano-x von Lissys Ltd berechnet den Treibstoffverbrauch für alle Flugzeugtypen in Abhängigkeit von Flugdistanz und beförderter Nutzlast. Das Programm bildet hierbei alle spezifischen bauartbedingten Flugparameter ab<sup>8</sup>. Das Flugprofil bei einer gegebenen Flugdistanz wird programmintern festgelegt. Die der Treibstoffberechnung zugrunde gelegten Verbrauchs- und Emissionswerte entsprechen denen eines für das jeweilige Flugzeug typischen Standardtriebwerks. Die zu betankende Menge berechnet Piano-x, falls nicht gesondert gewählt, ebenfalls automatisch, wobei das Programm für den Reservetreibstoff eine über alle Flugzeugtypen identische Standardberechnung anwendet.

### 5.2 ICAO

Die ICAO ist die internationale zivile Luftfahrtorganisation mit Sitz in Montreal. Die ICAO bietet Zugang zu diversen operativen und technischen Daten des weltweiten Flugverkehrs an. Diese werden im Rahmen des „Statistikprogramms“ der ICAO erhoben, das seit 1947 besteht. Darin werden u.a. Daten der Fluggesellschaften durch die Vertragsstaaten der ICAO, also durch deren Regierungsbehörden erhoben und nachfolgend analysiert und verarbeitet.

#### ICAO TFS

Die ICAO Traffic By Flight Stage Database (TFS) liefert für internationale Linienflüge die Passagier- und Frachtkapazität sowie die Auslastungen auf der Ebene City Pair / Fluggesellschaft / Flugzeugtyp. Da diese Datenquelle nicht vollständig ist, greift der AAI für Daten zu Kapazität und Auslastung zusätzlich auf andere Quellen zurück<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> z.B. Luftwiderstand und Auftrieb in Abhängigkeit von Klappeneinstellungen, Schub etc.

<sup>9</sup> siehe unten, OAG, Airline Data, IATA WATS

## ICAO Engine Emission Database

Die ICAO Engine Emission Database beinhaltet (u.a.) NO<sub>x</sub>-Emissionswerte aller gängigen Flugzeugtriebwerke bei vier verschiedenen Standard-Schubeinstellungen<sup>10</sup>.

### 5.3 ATI – Air Transport Intelligence

ATI ist ein Online Datenservice der Firma FlightGlobal<sup>11</sup>. Er stellt u.a. die Flugverkehrsdaten der ICAO in aufbereiteter Form zur Verfügung. Der AAI verwendet u. a. die folgenden Daten von ATI (Airline Business Premium):

- Anzahl Passagiere einer Airline
- Passagierauslastungsfaktoren einer Airline
- Angebotene und nachgefragte Passagierkilometer einer Airline
- Die 200 größten Airlines der Welt (jeweils geordnet nach Finanzergebnis oder Transportleistung)
- Katalogisierung der weltweit 25 größten LowCost Airlines.

### 5.4 OAG – UBM

Der Official Airline Guide (OAG) ist ein Business-Zweig von United Business Media Limited, einer Medienfirma mit Sitz in Großbritannien. OAG bietet seit 1929 den Official Aviation Guide an (damals noch ausschließlich in den USA und mit 35 Fluggesellschaften). OAG sitzt an einer Schnittstelle zwischen den Fluggesellschaften und den Verkaufssystemen für Flugtickets. Die Datenbank von OAG enthält die Flugpläne aller Fluggesellschaften, die ihre Pläne bei OAG einreichen. Diese Flugdatenbank enthält aktuelle und detaillierte Informationen über absolvierte und geplante Flüge, insbesondere Flugzeugtypen und Fracht- bzw. Sitzplatzkapazitäten (OAG, 2003).

Der Ablauf für die Aufnahme der Pläne in die Datenbank ist wie folgt: Airlines senden ihre Flugpläne in von ihnen bestimmten Abständen (täglich, wöchentlich oder monatlich etc.) an OAG. Die Daten durchlaufen bei OAG eine Qualitätskontrolle und werden dann standardisiert in die Datenbank aufgenommen und weltweit an die weltweiten Computerreservierungssysteme von Reisebüros und Airlines, online-Buchungsplattformen, Industrieanalysten, Verlage, Behörden und Dienstleister der Flugindustrie verteilt. Der Service ist für Airlines kostenlos. Der Anreiz für die Fluggesellschaften, ihre Flugpläne einzureichen ergibt sich aus der damit verbundenen Vermarktungsmöglichkeit für ihre Flugkapazitäten.

OAG gibt selbst auf seiner Webseite an, weltweit die Quelle von Flugplänen zu sein, der am meisten vertraut wird. Vergleicht man die weltweiten Flugpassagierzahlen von 2009 aus OAG (2031 Millionen Passagiere) mit den Angaben der IATA mit 2228 Millionen Passagieren 52, so ergibt sich eine Abdeckung des gesamten weltweiten Luftverkehrs durch OAG von knapp 92%. Die hier fehlenden Passagiere gehen dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit auf kleine regionale Fluggesellschaften zurück, die nicht an den Ticket-Buchungssystemen partizipieren wollen. Um die Teilnahme am AAI zu bestimmen, nutzt der AAI unabhängig von OAG die Angaben zu den Passagierzahlen einer Airline aus ATI Diese Fluggesellschaften berichten ihre Flugpläne ohne Ausnahme an OAG, so dass hier die für den AAI relevante Abdeckung 100% beträgt.

### 5.5 Airline Data T100 International

Database Products Inc. (Airline Data) ist ein Unternehmen mit Sitz in den USA. Airline Data bietet Flugdaten des US-Amerikanischen Marktes an, die das Unternehmen vom United States Department of Transportation (DOT) bezieht (DATA BASE PRODUCTS, 2011).

---

<sup>10</sup> Vgl. siehe ICAO Engine Emission Database

<sup>11</sup> Siehe Website von FlightGlobal: <https://www.flightglobal.com/services/data-feeds/>

Das Produkt Airline Data T100I beinhaltet für das US-amerikanische Marktsegment (Flüge innerhalb sowie von und nach USA) detaillierte Daten, unter anderem Passagierkapazität und –Auslastung sowie Frachtkapazität und Auslastung.

### 5.6 JP Airline Fleets International

Der JP Airline Fleets International (JP) Katalog wird seit über 40 Jahren von BUCHair (USA) Inc. herausgegeben<sup>12</sup>. Der JP-Katalog enthält detaillierte Angaben über die Flotten der weltweiten Fluggesellschaften inklusive genauer Flugzeugtypbezeichnung und ihrer Triebwerke. Die Ausrüstung mit Winglets ist durch einen Zusatz im Katalog vermerkt.

### 5.7 IATA WATS

Der World Air Transport Statistics (WATS) Katalog wird seit über 50 Jahren von der International Air Transport Association (IATA) aufgelegt<sup>13</sup>. WATS katalogisiert die Auslastungsfaktoren für Passagier und Frachtaufkommen der größten Fluggesellschaften weltweit, jeweils in der Unterteilung nationale / internationale Flüge.

### 5.8 Aero Secure

AeroSecure ist ein kommerzieller Datenbankdienstleister, welcher nach eigenen Angaben Datenbanken zu sicherheitsrelevanten Informationen mehrerer hundert großer Airlines verfügt und diese Daten Kunden aus Medien und Reiseindustrie anbietet<sup>14</sup>. AeroSecure unterteilt die in Airlines in verschiedene Kategorien, die zum Teil im AAI übernommen wurde.

---

<sup>12</sup> Siehe Webseite von Buchair: [www.buchair.com](http://www.buchair.com)

<sup>13</sup> Siehe Website der IATA: [www.iata.org/publications/store/Pages/world-air-transport-statistics.aspx](http://www.iata.org/publications/store/Pages/world-air-transport-statistics.aspx)

<sup>14</sup> Siehe Website von arosecure: [www.aerosecure.de/](http://www.aerosecure.de/)

## 6 Genauigkeit der Methoden und Ergebnisse

*Zusammenfassung: Der Emissionsrechner basiert auf Methoden und Datenquellen, die eine angemessen genaue Berechnung der Klimawirksamkeit eines Fluges zulassen. Je nach Eingabe des Kunden arbeitet der Rechner auf verschiedenen Genauigkeitsstufen. Die zentralen Faktoren für die Klimawirksamkeit einer Flugreise werden vom Emissionsrechner erfasst und abgebildet. Datenquellen und Methoden sind hochwertig und stellen den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft dar.*

### 6.1 Unsicherheitsfaktoren

Die Berechnungen des AAI für die Airlines unterliegen einem mittleren Gesamtfehler von  $\pm 1,3$  Effizienzpunkten bei einem Vertrauensniveau von 95% (atmosfair, AAI 2013). Hinzu kommen noch die Fehler aus den Einflussfaktoren, die nicht in die Berechnungen des AAI aufgenommen wurden, weil sie keinen ausreichend großen Unterschied zwischen den Airlines verursachen (atmosfair, AAI 2013). So ergibt sich ein Gesamtfehler des AAI-Rankings von  $\pm 1,5$  Effizienzpunkten. Da dabei mit einem Vertrauensniveau von 95% gerechnet wurde, kann der AAI Airlines signifikant unterscheiden, deren Effizienzpunkte sich mehr als um 1,5 Effizienzpunkte voneinander unterscheiden.

### 6.2 Datenqualität

Die Datenquellen gehören zum Herz des AAI. An sie stellt der AAI hohe Anforderungen, was die Qualität, Tiefe, Aktualität und Unabhängigkeit der Informationen betrifft. Der AAI greift ausschließlich auf hochrangige Quellen von internationalen Organisationen oder langjährig etablierten, spezialisierten Dienstleistern zurück. In keinem Fall nutzte der AAI Daten, die die Airlines über ihre Webseiten, Geschäftsberichte oder eigene Statistiken etc. veröffentlichen. Um die Qualität der Daten sicherzustellen, deckt der AAI jeden Einflussfaktor durch mindestens zwei unabhängige Quellen ab und unterzieht diesen Konsistenzchecks. Die Qualität dieser Daten ist hoch. Sie waren unter anderem Ausgangspunkt für Emissionskataster im IPCC-Bericht im Auftrag der Vereinten Nationen.

### 6.3 Methodenqualität

Die Methode des AAI sowie die verwendeten Parameter sind ausreichend, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen von unterschiedlichen Airlines auf unterschiedlichen Strecken auf 1,5 Prozentpunkte genau zu berechnen (atmosfair, AAI 2013)

### 6.4 Genauigkeitsstufen

Der Emissionsrechner funktioniert auf zwei verschiedenen Genauigkeitsstufen.

1. Wenn dem Kunden der Flugzeugtyp bekannt ist und er diesen über die Eingabemaske eingibt, erfolgt die Emissionsberechnung direkt über den Flugzeugtyp. Der vom atmosfair Emissionsrechner ermittelte Wert greift dabei direkt detailliert auf alle wichtigen Parameter zurück. Der atmosfair Emissionsrechner bietet derzeit 74 Flugzeugtypen mit ihren Varianten zur Auswahl an.
2. Wenn keine näheren Angaben des Flugzeugtyps durch den Nutzer erfolgen, bildet atmosfair einen Mittelwert über alle Flugzeuge einer Airline, die auf der eingegebenen Strecke fliegen. Der Rechner zeigt dann die Werte für die beiden besten Airlines auf der gesuchten Strecke an, sowie den Wert für eine Durchschnittsairline<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Mittelwert aller Airlines, die auf der gesuchten Strecke fliegen

## 7 Literaturverzeichnis

**atmosfair, AAI 2011:** atmosfair Airline Index – Dokumentation der Berechnungsmethode, Berlin 2011, abrufbar unter: [https://www.atmosfair.de/de/atmosfair\\_airline\\_index](https://www.atmosfair.de/de/atmosfair_airline_index)

**Azar et al., 2012:** „Valuing the non-CO<sub>2</sub> climate impacts of aviation“. Climatic Change Volume 111 (2012), 559 – 579

**Brockhagen, Dietrich 1995:** Der Flugverkehr der Stadt Köln und das Klimabündnis. Wuppertal Papers Nr. 43, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

**Bucher, 2007:** „JP Airline-Fleets International“. Zurich, Switzerland: Bucher & Co., jährliche Publikation.

**Cao et al., o.J.:** „JP Airline-Fleets International“. : A Preliminary Study on Operational Feasibility of Continuous Descent Approach. School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University: [http://web.ics.purdue.edu/~cao20/\\_private/report.pdf](http://web.ics.purdue.edu/~cao20/_private/report.pdf) (01.03.11)

**Dahlmann et al. 2019:** „Integration of Non-CO<sub>2</sub> Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA“, Projektbericht Umweltbundesamt. 242

**DATA BASE PRODUCTS (2011):** Produktbeschreibung von der Data Base homepage, aufgerufen am 23.02.2011 ( [www.airlinedata.com/CurrentData.htm](http://www.airlinedata.com/CurrentData.htm) )

**DLR 2000:** Datenbanken mit Emissionsprofilen von zivilen Jets, erstellt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt im Rahmen der Studie „Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs“, F + E – Vorhaben 105 06 085 im Auftrag des Umweltbundesamtes, TÜV-Rheinland, DIW, Wuppertal Institut für Umwelt, Klima, Energie. Die Datenbanken liegen beim Umweltbundesamt.

**EASA 2020:** „Updated analysis of the non-CO<sub>2</sub> climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4)“ (2020) 166

[https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:7bc666c9-2d9c-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_3&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:7bc666c9-2d9c-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF)

**ICAO 2010:** „ICAO Carbon Emissions Calculator“. Version 3, Montreal 2010

**IPCC 1999:** „Aviation and the Global Atmosphere“. A Special Report of IPCC Working Groups I and III in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. J.E.Penner, D.H.Lister, D.J.Griggs, D.J.Dokken, M.McFarland (Eds.), Cambridge University Press, UK.

**IPCC 2013:** „Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing“. In: 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.

**Grassl, H und Brockhagen, D. 2007** Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics. An update according to the Fourth Assessment Report, IPCC 2007. MPI, Hamburg, 2007, accessible at: <http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/publikationen.html>

**Lee et al. 2010:** „transport impacts on atmosphere and climate: aviation“, atmospheric environment 44 (2010), 4678 – 4734

**Lee et al. 2020:** “The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018”, Atmospheric Environment 244 (2020), 1117834

**OAG (2003):** About OAG data, website of OAG data  
(<http://oagdata.com/aboutoagdata/overview.aspx>)

**PIANOX (2008):** Aircraft Emissions Performance. User’s Guide, Piano-X © 2008 Lissys Ltd, London

**UBA 2008:** „Klimawirksamkeit des Flugverkehrs. Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs, Umweltbundesamt, Dessau, März 2008.