

nachdenken • klimabewusst reisen

atmosfair 

atmosfair Airline Index 2011

Dokumentation der Berechnungsmethode

März 2011



Der atmosfair Airline Index 2011 auf einen Blick

Der Airline Index vergleicht Fluggesellschaften nach Ihrer CO₂-Effizienz beim Transport von Nutzlast (Passagiere und Beiladefracht) in einem globalen Ranking.

Umfang

- 130 größte Passagier-Airlines der Welt
- 107 Flugzeugtypen (Erfassungsgrad global 95%)
- 308 Flugzeugtriebwerke (Erfassungsgrad global 97%)
- 4 Marktsegmente (100% Abdeckung)
- 92% Erfassung aller weltweiten Flüge

Methode

- Basis: CO₂ pro Nutzlastkilometer, gemittelt über alle CityPairs einer Airline
- Detailliert ausgewertete Parameter:
 - CityPair und Distanz
 - Flugzeugtyp
 - Triebwerk
 - Winglets
 - Bestuhlung
 - Frachtkapazität
 - Auslastung Passagiere
 - Auslastung Beiladefracht
- Datenquelljahr 2009 für Index 2011
- Die Methode des AAI basiert auf zentralen Elementen der Emissionsberechnungsmethode der ICAO.

Qualität

- Wissenschaftlich: Einbeziehung nur physischer Faktoren, keine normativen Vorgaben etc..
- Datenquellen: unabhängig und international etabliert, u.a. ICAO, IATA, OAG, JP-Airlines etc.
- Genauigkeit: Der AAI ist auf ca. ± einen Platz genau, bei einem Vertrauensniveau von 95%.
- Prüfung durch international tätige Hochschulprofessoren aus den Fachbereichen Physik und Luftfahrttechnik.

Grußwort der atmosfair Schirmherren

Das Fliegen lässt sich aus der modernen Welt nicht mehr wegdenken und trägt gleichzeitig zur globalen Klimaerwärmung bei. In wenigen anderen Branchen treten Gegensätze so unvermittelt zutage wie beim Flugverkehr: Während wir typischerweise nur etwa einmal jährlich ins Flugzeug steigen, tragen wir doch damit in wenigen Stunden leicht so viel zur Erderwärmung bei, wie mit dem Auto in einem Jahr. Und diejenigen, die am meisten unter der Klimaerwärmung leiden und leiden werden, sind die, die am wenigsten fliegen: Die Menschen aus vielen wirtschaftlich schwachen Ländern in Afrika oder Asien.

Lässt sich ein Flug nicht vermeiden, können wir durch die Wahl der Fluggesellschaft darauf Einfluss nehmen, wie viel klimaändernde Emissionen entstehen: So verbraucht ein neuer Flugzeugtyp im Gegensatz zu einem noch immer fliegenden alten Modell in der Regel weniger Treibstoff und stößt damit weniger CO₂ aus. Auch fliegt ein eng bestuhltes und volles Flugzeug effizienter als eines, bei dem nur wenige Sitzreihen vorhanden sind und die meisten Sitzplätze leer bleiben. Nun sind diese Faktoren für einen normalen Passagier nicht messbar. Schlimmer noch: Neben diesen auf den ersten Blick einleuchtenden Unterschieden gibt es eine ganze Reihe weiterer Faktoren, die dem Passagier verborgen bleiben, deswegen aber nicht weniger wichtig für das Klima sind. Und am wenigsten kann er diese Faktoren beeinflussen, solange er bei der Wahl der Airline auf keine einschlägige Information Zugriff hat.

Der atmosfair Airline Index (AAI) schließt nun diese Lücke. Er nimmt die Unterschiede zwischen den Fluggesellschaften zum Anlass, ihre Klimabilanz wissenschaftlich zu analysieren, auszuwerten und zu vergleichen. Der AAI stellt die Ergebnisse in verschiedenen Rankings anschaulich und somit für Privat- und Firmenkunden¹ gleichermaßen nutzbar dar. Es ist unser Ziel, die Klimabilanz neben Ticketpreis und Service stärker in den Wettbewerb der Fluggesellschaften einfließen zu lassen. Denn für den Klimaschutz und letztlich für die gesamte Flugindustrie auf ihrem Weg in die Nachhaltigkeit kann es nur hilfreich sein, wenn ihre Kunden verstärkt Flüge mit wenig CO₂-Ausstoß nachfragen.

Wir wünschen atmosfair viel Erfolg mit diesem Beitrag zum Klimaschutz und Ihnen als Leserinnen und Lesern eine gute Lektüre!

Prof. Dr. Hartmut Graßl

Prof. Dr. Mojib Latif

¹ Für Firmenkunden ist der atmosfair Airline Index über die atmosfair gmbH auch für einzelne Strecken erhältlich. Er erlaubt es damit kosten- und umweltbewussten Unternehmen, die auf einzelnen Strecken viele Geschäftsflüge haben, bei der Suche nach der Airline für die jeweilige Strecke die Klimabilanz als Kriterium in die Ausschreibungen mit aufzunehmen.

Vorwort der Verfasser und Danksagung

Rankings von Unternehmen nach Umweltkriterien sind weit verbreitet. Die VCD-Auto-Umweltliste vergleicht jährlich die einzelnen Wagen; Hersteller von Elektrogeräten versehen seit Jahren ihre Produkte mit dem EU-Label für Energieeffizienz. So wird Umweltfreundlichkeit auch Bestandteil von Unternehmensbewertungen wie den Dow Jones Sustainability Indices oder dem Natur-Aktien-Index, die wiederum für diejenigen Kapitalgeber und Investoren entscheidend sind, die besonderes Augenmerk auf die Nachhaltigkeit ihrer Geldanlage legen, insbesondere die großen institutionellen Investoren. Gesetzgeber und Verbraucherorganisationen sind sich einig, dass die Kennzeichnung von Produkten einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz durch die Macht der Konsumenten bedeutet. Für den Flugverkehr gab es bisher kein Ranking von Airlines nach ihrer Klimateffizienz. Bestehende Standards zur Emissionsberechnung von Flügen wie der des englischen Umweltministerium DEFRA erlauben keine Differenzierung unter den Fluggesellschaften. Andere Ansätze, wie die Emissionsrechner von Kompensationsanbietern oder von spezialisierten Dienstleistern der Reiseindustrie lassen wichtige Faktoren aus oder bilden sie mangels Daten nicht genau genug ab, um eine Ranking der Airlines nach Klimateffizienz zu erlauben².

Der atmosfair Airline Index füllt diese Lücke. Die vorliegende Dokumentation beschreibt die Methode, das Vorgehen und die Quellen. Damit schafft diese Dokumentation Transparenz und kann zudem dem interessierten Leser als eine allgemeine Einführung in das Thema CO₂-Emissionen von Fluggesellschaften dienen.

Unser Dank gilt insbesondere Associate Prof. Paul Peeters, der als Luftfahrtingenieur die Methode geprüft hat und Prof. Dr. Hartmut Graßl, der sein Fachwissen u.a. der Klimawissenschaft eingebracht hat, sowie Prof. Dr. Stefan Gössling für das viele kritische Mitdenken und Cornelius Joos für seine Arbeit mit den Datenbanken.

Dr. Dietrich Brockhagen,

Maik Höhne,

Hanna Schultz,

Verfasser und Geschäftsführer atmosfair gGmbH

Wissenschaftliche MitarbeiterInnen

² Siehe Appendix 2 zu DEFRA und dem Anbieter TRX.

Zusammenfassung

Der Atmosfair Airline Index (AAI) ist ein Ranking von Airlines nach Ihrer Klimateffizienz beim Transport von Nutzlast (Passagiere und Beiladefracht) mit folgenden Eigenschaften:

- Im Ranking erhalten die Fluggesellschaften Effizienzpunkte. Darüber werden die Fluggesellschaften in 7 Effizienzklassen von A – G eingeordnet (analog zur EU-Energieeffizienzkennzeichnung).
- Für die Vergabe der Effizienzpunkte werden nur die klimawirksamen Emissionen betrachtet (kein Lärm, keine Nachhaltigkeitspolitik usw.).
- Innerhalb der klimawirksamen Emissionen wird nur CO₂ betrachtet, weil die übrigen Schadstoffe (Ruß, Partikel, Wasserdampf etc.) bei allen Airlines gleiche Wirkung (z.B. Kondensstreifen) zeigen. Ausnahme: Stickoxide (NO_x) werden bei einem Triebwerksfaktor als Korrektur mit einbezogen (über Ozonbildung und Methanabbau).
- Unterschiedliche Geschäftsmodelle der Airlines wie Netz- oder LowCost Carrier und Merkmale wie die Ausrichtung auf interkontinentale, regionale oder Binnenflüge fließen nicht in die Punktwertung ein.
- Betrachtung der 130 größten Passagierairlines der Welt (geordnet nach Transportleistung, Reine Frachtflüge fließen nicht ein).
- Datenquelljahr: 2009 für den Index 2011.
- Betrachtete Kategorien der Fluggesellschaften: Netz-, LowCost-, Charter- und Regional Carrier.

Der AAI basiert auf einer neuen eigens entwickelten Methodik, aufbauend auf der CO₂-Berechnungsmethode der ICAO. Seine hauptsächlichen Datenquellen sind: ICAO TFS (Traffic Flight By Stage), IATA WATS, OAG, Piano-x, JP-Airline Fleets (Kapitel 9).

Der Vergleich der Airlines im AAI folgt folgendem Ablauf:

1. Ermittlung des CO₂ je Nutzlastkilometer (auf einer Strecke, bzw. CityPair) unter Berücksichtigung von Flugzeugtyp, Triebwerk, Bestuhlung, Beiladefrachtkapazität, Auslastungsfaktoren Fracht und Passagiere, Winglets. NO_x-Emissionen werden über einen Triebwerksfaktor einbezogen.
2. Das CO₂ je Nutzlastkilometer auf einem CityPair wird verglichen mit dem physisch bestmöglichem Fall (BestCase, Kapitel 6.1).

3. Eine Airline, die auf einem CityPair den BestCase realisiert, erhält 100 Punkte, die anderen Airlines proportional weniger (Kapitel 6.2).
4. Die Effizienzpunkte auf allen CityPairs werden zu globalen Effizienzpunkten einer Airline gemittelt (Kapitel 7).
5. Einordnung der Airlines nach ihren globalen Effizienzpunkten in einem Ranking mit 7 Effizienzklassen (in Anlehnung an die EU Verordnung für Energieeffizienz).

Mit dieser Methode des AAI werden folgende Vergleiche möglich:

- Eine Airline mit nur wenigen beflogenen Strecken kann mit einer anderen verglichen werden, die weltweit hunderte CityPairs bedient.
- Eine Airline, die nur auf Kurzstrecken fliegt, kann mit einer anderen verglichen werden, die nur Langstrecken befliegt.
- Ein Charter Carrier kann mit einem Netz Carrier verglichen werden.
- Eine Airline, die ohne Konkurrenz allein ein CityPair befliegt, kann objektiv beurteilt werden.

Der AAI betrachtet:

- Flugzeugtyp, Triebwerk, Winglets, Bestuhlung, Beiladefrachtkapazität, Auslastungen von Passagier und Fracht (Kapitel 5).
- 107 Flugzeugtypen und 308 Triebwerke.
- 92% des weltweiten Passagierluftverkehrs (Anzahl der Flüge).

Inhaltsverzeichnis

Der atmosfair Airline Index 2011 auf einen Blick	1
Der atmosfair Airline Index 2011 auf einen Blick	2
Grußwort der atmosfair Schirmherren	3
Vorwort der Verfasser und Danksagung	4
Zusammenfassung.....	5
Copyright © atmosfair gGmbH – Alle Rechte vorbehalten	16

Teil I

Die Methode des Airline Index vom Ansatz bis zur Darstellung der Ergebnisse.....	17
1. Ziel und Prinzipien des atmosfair Airline Index	18
1.1. Ziel	18
1.2. Prinzipien	18
2. Wie beeinflussen Flüge das Klima?	20
3. Einführung: Wie ist ein Klimavergleich von Airlines möglich?.....	22
3.1. Unterschiede zwischen Fluggesellschaften.....	22
3.2. Bemessungsgrundlage I: CO ₂ pro Nutzlastkilometer	24
3.3. Bemessungsgrundlage II: Vergleich auf CityPairs	25
3.4. Sonderfall LowCost Airlines	26
3.4.1. Subventionen	27
3.4.2. Umwege.....	28
3.4.3. Abgrenzung der LowCost Airlines	29
3.4.4. Behandlung der LowCost Airlines.....	30
4. Welche Einflussfaktoren bestimmen das CO ₂ pro Nutzlastkilometer?	32
4.1. Kriterien für die Einbeziehung von Faktoren in die Berechnung des AAI	32
4.2. Flugdistanz	32
4.3. Flugprofil (Steigflug und Reiseflughöhe in Abhängigkeit von der Distanz)	33
4.4. Atmosphärenzustand	35
4.5. Meteorologie.....	35
4.6. Flugrouten und Umwege	36
4.7. Warteschleifen	37
4.8. Bodenbetrieb auf dem Flughafengelände.....	37
4.9. Operation: Continuous Descent Approach (CDA), langsames Fliegen	38
4.9.1. Operation.....	38
4.9.2. Continuous Descent Approach (CDA)	39
4.9.3. Reduzierte Fluggeschwindigkeit.....	40
4.10. Flugzeug	41
4.10.1. Flugzeugtyp.....	41
4.10.2. Triebwerk.....	41
4.10.3. Winglets	43
4.10.4. Sitzplatzkapazität	43
4.10.5. Frachtkapazität	44
4.10.6. Operating Empty Weight (OEW)	45
4.10.7. Flugzeugalter und Wartung	46

4.11. Passagier- und Frachtauslastung	47
4.12. Weitere Schadstoffe neben CO ₂	48
4.13. Zusammenfassung: Abgrenzung relevanter Einflussfaktoren	49
5. Berechnung des CO ₂ je Nutzlastkilometer auf einem City Pair.....	50
5.1. Ausgangsbasis ICAO-Methode.....	50
5.2. Flugzeugtypen.....	51
5.3. Triebwerke	51
5.4. Winglets.....	53
5.5. Sitzplatzkapazität.....	54
5.6. Frachtkapazität	55
5.7. Passagierauslastung.....	56
5.8. Frachtauslastungen.....	57
5.9. Flugprofile & Distanz, Kombination mit Flugzeugtypen zu Einzelflügen.....	58
5.10. Die Ergebnisse des Kapitels im Überblick	60
6. Vom CO ₂ je Nutzlastkilometer zu CityPair Effizienzpunkten	62
6.1. BestCase & WorstCase	62
6.2. CityPair Effizienzpunkte	63
7. Vom CityPair zu globalen Effizienzpunkten für alle Airlines.....	64

Teil II

Die Methode des Airline Index im Detail	65
8. Die Berechnungen Schritt für Schritt.....	66
8.1. CO ₂ -Emissionen eines Fluges im AAI	66
8.1.1. Überblick.....	66
8.1.2. Treibstoffverbrauch von Einzelflügen.....	66
8.1.3. Die Berechnung der Nutzlast, OEW-Korrektur	67
8.1.4. Der Triebwerksfaktor	68
8.1.5. Nutzlast und Distanz zu Kerosinverbrauch.....	73
8.1.6. CO ₂ je Nutzlastkilometer, spezifische Emissionen.	74
8.2. CO ₂ - Emissionen pro Nutzlastkilometer auf einem CityPair pro Airline	75
8.3. Effizienzpunkte auf einem City Pair	75
8.3.1. Berechnung des BestCase und WorstCase	75
8.3.2. Ermittlung der CityPair Effizienzpunkte	76
8.4. Effizienzpunkte im globalen AAI Ranking	76
9. Datenquellen.....	77
9.1. Piano-x (Lissys Ltd).....	77
9.2. Daten der ICAO	77
9.2.1. ICAO TFS.....	78
9.2.2. ICAO Engine Emission Database.....	78
9.2.3. ATI – Air Transport Intelligence.....	78
9.3. OAG - UBM.....	79
9.4. Airline Data T100 International	80
9.5. JP Airline Fleets International	80
9.6. IATA WATS	80
9.7. AeroSecure	81
9.8. Abdeckung der Einflussfaktoren durch die Datenquellen, Konsistenzchecks.....	81

10. Aufnahme und Einteilung der Airlines	82
10.1. Auswahl der Airlines für den AAI.....	82
10.2. Kategorisierung der Airlines im AAI anhand spezialisierter Dienstleister	82
10.3. Code Sharing, Tochtergesellschaften und Leasing	85
10.3.1. Code Sharing	85
10.3.2. Tochtergesellschaften.....	86
10.3.3. Mehrheitsbeteiligungen.....	86
10.3.4. Subcarrier	87
10.3.5. Leasing und gecharterte Flugzeuge	88
11. Ergebnisdarstellung im AAI.....	89
11.1. Effizienzpunkte.....	89
11.2. Darstellung in verschiedenen Airlinekategorien	89
11.3. Aufteilung in Effizienzklassen.....	89
11.4. Fehlerdarstellung	90
12. Faktoranalyse.....	91
12.1. Schritt I: Mittelwert und Standardabweichungen der Einflussfaktoren	91
12.2. Schritt II: Bestimmung der CO ₂ -Differenzen bei Variation des Einflussfaktors um eine Standardabweichung.....	92
12.3. Schritt III: Das Gewicht der Faktoren relativ zueinander	93
13. Fehleranalyse.....	94
13.1. Einleitung.....	94
13.1.1. Fehlerarten.....	94
13.1.2. Fehlerfortpflanzung.....	95
13.1.3. Signifikanz	95
13.1.4. Ablauf der Fehlerrechnung.....	95
13.2. Einzelfehler.....	96
13.2.1. Datenlücken.....	96
13.2.2. Fehler in den Quellen für Betriebsdaten	97
13.2.3. Treibstoffverbrauch eines Flugzeugtyps	97
13.2.4. Unschärfe des Flugzeugtyps	98
13.2.5. Sitzplatzkapazität	102
13.2.6. Frachtkapazität	103
13.2.7. Operating Empty Weight (OEW)	104
13.2.8. Triebwerke.....	105
13.2.9. Winglets.....	107
13.2.10. Auslastungsfaktoren für Passagiere und Fracht	108
13.3. Gesamtfehler	109
13.4. Fehlerdarstellung im AAI.....	109
14. Literaturverzeichnis	110

Anhänge

Anhang 1: Piano X	115
Anhang 2: TRX und DEFRA	118
Anhang 3: ICAO TFS	119
Anhang 4: JP Airline Fleets international	122
Anhang 5: DLR Low Cost Monitor	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren, die die Klimawirkung eines Fluges beeinflussen können	21
Tabelle 2: Zusammenfassung des Faktors Flugdistanz.....	33
Tabelle 3: Zusammenfassung des Faktors Flugprofil	35
Tabelle 4: Zusammenfassung des Faktors Atmosphärenzustand	35
Tabelle 5: Zusammenfassung des Faktors Wetter & Wind.....	36
Tabelle 6: Zusammenfassung des Faktors Flugroute.....	37
Tabelle 7: Zusammenfassung des Faktors Warteschleifen	37
Tabelle 8: Zusammenfassung des Faktors Flughafen	38
Tabelle 9: Zusammenfassung des Faktors CDA.....	40
Tabelle 10: Zusammenfassung des Faktors Langsamerer Fliegen	40
Tabelle 11: Zusammenfassung des Faktors Flugzeugtyp.....	41
Tabelle 12: Zusammenfassen des Faktors Triebwerk.....	43
Tabelle 13: Zusammenfassung des Faktors Winglets	43
Tabelle 14: Zusammenfassung des Faktors Sitzplatzkapazität.....	44
Tabelle 15: Zusammenfassung des Faktors Frachtkapazität	45
Tabelle 16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse OEW am Beispiel eines A340-600	46
Tabelle 17: Zusammenfassung des Faktors OEW	46
Tabelle 18: Zusammenfassung des Faktors Alter & Wartung.....	47
Tabelle 19: Zusammenfassung des Faktors Auslastung	48
Tabelle 20: Zusammenfassung des Faktors weitere Schadstoffe	49
Tabelle 21: berücksichtigte Einflussfaktoren im AAI	49
Tabelle 22: Erfassung des Einflussfaktors Flugzeugtyp im AAI.....	51
Tabelle 23: Erfassung des Faktors Triebwerk im AAI	53
Tabelle 24: Erfassung des Faktors Winglets im AAI.....	54
Tabelle 25: Erfassung des Faktors Sitzplatzkapazität im AAI	55
Tabelle 26: Erfassung des Faktors Frachtkapazität im AAI.....	56
Tabelle 27: Erfassung des Faktors Passagierauslastung im AAI.....	57
Tabelle 28: Erfassung des Faktors Frachtauslastung im AAI	58
Tabelle 29: Distanzen der Einzelflüge des AAI	58
Tabelle 30: Erfassung der Faktoren Flugprofil und Distanz im AAI.....	59
Tabelle 31: Zusammenfassung, Berechnung von CO ₂ pro Nutzlastkilometer	61
Tabelle 32: Minimale und maximale NO _x -Emissionen von extremen Triebwerken in Abhängigkeit vom Schub, auf Meeresspiegelhöhe	72
Tabelle 33: AGWPs und EWF (Emission Weighting Factor) des weltweiten Flugverkehrs 2005, nach Peeters und Williams.	72

Tabelle 34: Umfang der ICAO TFS.....	78
Tabelle 35: Zusammenfassung OAG.....	79
Tabelle 36: Zusammenfassung AirlineData T100International.....	80
Tabelle 37: Zusammenfassung IATA WATS	81
Tabelle 38: Übersicht über die Einflussfaktoren des AAI und die zugehörigen Datenquellen	81
Tabelle 39: Klassen und Klassenbreiten des AAI Rankings	89
Tabelle 40: Einflussfaktoren des AAI, deren Mittelwerte und Standardabweichungen	91
Tabelle 41: Faktorbedingte CO ₂ - Differenzen und Elastizitäten der Einflussfaktoren, auf Distanzen von 1000 bis 8000 Kilometer.	93
Tabelle 42: Genauigkeitsstufen der Flugzeugbezeichnungen	98
Tabelle 43: Beispiele für mögliche Flugzeugbezeichnungen der Stufe I hinter denen der Stufe II.....	99
Tabelle 44: Abweichungen im Triebstoffverbrauch auf Stufe III nach Korrektur	101
Tabelle 45: Auswirkung des Fehlers im Flugzeugtyp auf die Effizienzpunkte.....	101
Tabelle 46: Auswirkung des Fehlers bei der Sitzplatzkapazität auf die Effizienzpunkte	103
Tabelle 47: Auswirkung des Fehlers der Frachtkapazität auf die Effizienzpunkte.....	104
Tabelle 48: Auswirkungen des Fehlers Winglets auf die Effizienzpunkte	107
Tabelle 49: Vertrauensgrenzen beim 95%- Konfidenzintervall	109
Tabelle 50: Darstellung der Fehler auf das AAI Global Ranking.....	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ - Emissionen eines Flugzeuges in Abhängigkeit von der Flugstrecke	34
Abbildung 2: Anzahl Flüge in Abhängigkeit von ihrer Distanz (km).....	60
Abbildung 3: Mittlerer Einfluss der Faktoren im AAI global Ranking	93

Konstanten und Variablen

Variable	Bedeutung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AAI	Atmosfair Airline Index
APU	Auxiliary Power Unit
BC	BestCase
CLF	Cargo Load Factor
CO ₂	Kohlendioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ETOPS	Extended-range Twin-engine Operation Performance Standards
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organisation
ICAO TFS	ICAO Traffic Flight By Stage
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Km	Kilometer
MTOW	Maximum Take Off Weight
MZFW	Maximum Zero Fuel Weight
NO _x	Stickoxide
OAG	Official Airline Guide
OEW	Operating Empty Weight
PLF	Passenger Load Factor
RF	Radiative Forcing
ULD	Unit Load Device
WATS	World Air Transport Statistics
WC	WorstCase

Glossar

Begriff	Bedeutung und Verwendung in dieser Dokumentation
Flugzeug	Flugzeugtyp mit u.a. airline-spezifischer Bestuhlung, Frachtraum und Triebwerk
Flugzeugtyp	Varianten innerhalb der Flugzeugmodelle, z.B. Boeing 767-300LR oder Airbus A310-200X
Flugzeugmodell	Varianten innerhalb einer Flugzeugfamilie, z.B. Boeing 767-300 oder Airbus A310-200
Flugzeugfamilie	Höchste Gliederungsebene von Flugzeugen, z.B. Boeing 767 oder Airbus A310
Flug	Ein bestimmter Flug einer Airline mit einer bestimmten Flugnummer im Flugplan, gekennzeichnet durch CityPair, Flugzeugtyp, Bestuhlung, Auslastungen etc.
CityPair	Flugverbindung von Start zu Zielflughafen, gekennzeichnet durch ein Paar von ICAO 3-Buchstabencodes, z.B.: FRA- CDG für Frankfurt Main nach Paris Charles de Gaulle.
Einzelfehler	Fehler, der durch einen einzelnen Faktor verursacht wird (z.B. durch die Passagierauslastung)
Gesamtfehler	Fehler, der in der Summe aller fehlerbehafteten Faktoren auftritt, also abhängig von den Einzelfehlern
DPMA	Deutsches Patent- und Markenamt

Copyright © atmosfair gGmbH – Alle Rechte vorbehalten

atmosfair ist eine beim DPMA eingetragene Marke. atmosfair ist eine beim DPMA eingetragene Marke. Der „atmosfair Airline Index“ und die diesem zugrunde liegende Methode sind urheberrechtlich geschützt. Geschützt ist insbesondere die Art der Berechnung (unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer, der Triebwerke und der Winglets) sowie das Ranking auf einzelne CityPairs und die Zusammenfassung der CityPairs zu einem globalen Index. Weiterhin geschützt sind sämtliche Texte, Tabellen, Illustrationen und Abbildungen.

Jede Nutzung oder Verwertung des „atmosfair Airline Index“ und/oder der zugrunde liegenden Darstellung bedarf der ausdrücklichen vorherigen schriftlichen Zustimmung mit der atmosfair gGmbH. Eine Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Zugänglichmachung und/oder Bearbeitung des „atmosfair Airline Indexes“ und der zugrunde liegenden Darstellung ist damit ohne Zustimmung der atmosfair gGmbH nicht gestattet. Die atmosfair gGmbH weist ausdrücklich darauf hin, dass Urheberrechtsverletzungen gem. §§ 106 ff. UrhG strafbar sind.

Alle von der atmosfair gGmbH ausdrücklich gestatteten Nutzungen sind mit dem Vermerk „© atmosfair gGmbH 2011“ bzw. der Urheberbezeichnung „Dr. Dietrich Brockhagen, Autor“ zu versehen.

Der Inhalt, der Titel und die Urheberbezeichnung des „atmosfair Airline Index“ und der diesem zugrunde liegenden Methode dürfen ohne Zustimmung der atmosfair gGmbH nicht geändert werden.

Alle Anfragen zur Verwertung bzw. der Nutzung des „atmosfair Airline Index“ und der diesem zugrunde liegenden Methode sind zu richten an: info@atmosfair.de.

Teil I

Die Methode des Airline Index vom Ansatz bis zur Darstellung der Ergebnisse

1. Ziel und Prinzipien des atmosfair Airline Index

1.1. Ziel

Ziel des atmosfair Airline Index (AAI) ist es, Passagieren eine Orientierung bei der Wahl einer klimaeffizienten Airline für einen Flug zu bieten. Der Airline Index ordnet sich dabei in das klassische Vorgehen zum Umweltschutz ein, nach dem Vermeidung vor Reduktion vor Kompensation steht.

Voraussetzung für eine sinnvolle Nutzung ist also, dass der Fluggast bereits geprüft hat, ob sich der Flug nicht vermeiden lässt und bereits die direkteste Flugverbindung gewählt ist³. Der Airline Index hilft dann beim zweiten Schritt „Reduktion“ und steht damit noch vor dem möglichen letzten Schritt, der Kompensation von Treibhausgasen.

atmosfair bietet damit Passagieren Unterstützung bei allen drei Schritten an:

- Vermeidung: Hier hat atmosfair eine Optimierungssoftware für die Reisebuchungsprozesse in Unternehmen entwickelt, die Geschäftsreisen durch Videokonferenzen ersetzen wollen und dabei Treibhausgase und Geld sparen können⁴.
- Reduktion: atmosfair unterstützt mit dem vorliegenden Index einzelne Passagiere und Unternehmen, eine klimaeffiziente Airline zu finden.
- Kompensation: atmosfair bietet Passagieren die Möglichkeit, durch Entrichtung eines freiwilligen Klimaschutzbeitrages die Menge an CO₂-Emissionen durch Aufbau von erneuerbaren Energien einzusparen, die der Menge des Fluges entspricht.

1.2. Prinzipien

Der atmosfair Airline Index ist nach folgenden Prinzipien aufgebaut:

Nachfrageperspektive

Der AAI stellt sich auf die Nachfrageseite des Marktes. Er nimmt die Perspektive eines Passagiers ein, der sich nicht für die Hintergründe der Luftfahrtindustrie interessiert, sondern nur für die Klimabilanz eines Fluges, unabhängig davon, wohin er fliegen will und welche Airlines diese Strecke anbietet.

³ Als Faustregel lässt sich sagen, dass ein Umsteigeflug in der Effizienzklasse C mehr CO₂ erzeugt, als ein Direktflug in Effizienzklasse E.

⁴ ELECTROLUX 2007, S. 12

Physikalische Grundlage

Der AAI wertet nur Faktoren aus, die objektiv feststellbar sind. Er basiert auf CO₂ pro Nutzlastkilometer. Es fließen darüber hinaus keine Werturteile ein und es existieren keine normativen Vorgaben. Auch die Firmen- und Umweltpolitik der einzelnen Airlines, Flughäfen oder Flugzeughersteller spielen im AAI keine Rolle.

Methodische Vollständigkeit und Genauigkeit

Die Methode des AAI sowie die verwendeten Parameter sind ausreichend, um das Ranking der Airlines belastbar zu erstellen. Die Genauigkeit der Datenquellen sowie Methoden sind ausreichend für ein signifikantes Ranking. Dies belegt die Fehleranalyse (Kapitel 13). Größere Abweichungen sind im Ranking einzeln vermerkt.

Grundlage der internationalen zivilen Luftfahrtorganisation ICAO

Die Methode des AAI basiert auf zentralen Elementen der Emissionsberechnungsmethode der ICAO. Sie betrachtet jedoch mehr Einflussfaktoren, besitzt eine breitere Datenbasis, ist genauer und in wesentlichen Details weiterentwickelt.

Datenvollständigkeit

Die Daten des AAI erlauben die Erstellung eines Ranking für den weltweiten zivilen Luftverkehr. Dieser ist vollständig im AAI abgebildet, es existieren keine vorgegebenen Auslassungen. Lediglich eine nachgeordnete Auswahl (die 130 größten Airlines der Welt) wird aus Gründen der Übersichtlichkeit getroffen.

Datenunabhängigkeit und Datengüte

Der AAI verwendet nur international renommierte und anerkannte Quellen. Die Daten des AAI stammen von spezialisierten Datendienstleistern, die als Haupttätigkeit Daten der Flugindustrie erheben und die für die Güte und Unabhängigkeit verantwortlich sind. Die wenigen Ausnahmen sind in dieser Dokumentation einzeln dargestellt.

2. Wie beeinflussen Flüge das Klima?

Die Menge und Klimawirkung der Emissionen, die bei einem Flug entstehen, hängen von einer Reihe von Faktoren ab. Diese werden in diesem Kapitel aufgezählt und in Kapitel 3.4 eingehend diskutiert.

Der Flugverkehr trägt durch den Ausstoß klimawirksamer Gase wie Kohlendioxid (CO₂), Stickoxiden (NO_x) und anderen Schadstoffen zur Klimaerwärmung bei. Dies wurde seit etwa Mitte der 1980er Jahre international intensiv erforscht. Die Forschung wurde vom IPCC in einem Sonderband „Aviation and the global atmosphere“ 1999 umfassend zusammengetragen⁵. Darin werden alle atmosphärischen Effekte des Flugverkehrs, insbesondere in großen Flughöhen, aber auch die vorhandene Technologie und Potentiale für Treibstoffersparnis untersucht. In der Folge schritt die internationale Forschung weiter fort und erweiterte, modifizierte und detaillierte die früheren Erkenntnisse erheblich. Diese gehen regelmäßig in gesonderte Abschnitte der Berichte des IPCC ein.

Heute wissen wir, dass der Flugverkehr gerade durch seine Emissionen im Grenzbereich zwischen oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre zur Klimaerwärmung beiträgt. Hierbei geht es um mehr als die reinen CO₂-Emissionen, die immer entstehen, wenn fossile Brennstoffe verbrannt werden und die global wirken. Effekte wie der Aufbau des Treibhausgases Ozon durch Stickoxide aus Flugzeugtriebwerken, die Bildung von linienförmigen Kondensstreifen oder der Ausstoß von Wasserdampf und Partikeln, die wiederum zur Bildung von Zirruswolken führen können, sind lokal oder regional und hängen neben dem Flugzeug auch vom momentanen Zustand der umgebenden Atmosphäre ab.

Neben diesen Effekten gibt es noch diejenigen, die ausschließlich von der Fluggesellschaft abhängen, wie dem verwendeten Flugzeugtyp und dessen Bestuhlung, Triebwerk, Winglets etc. 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.

Alle diese Faktoren kommen potentiell in Frage, um bei einem Vergleich von Airlines aus Sicht der Klimaeffizienz eine Rolle zu spielen und in einem Ranking herangezogen zu werden. Die folgende Tabelle listet die möglichen Faktoren auf, bevor wir diese im Kapitel 3.4 eingehender untersuchen und fragen, ob sie in ein Ranking mit aufgenommen werden müssen.

⁵ Vgl. IPCC 1999

Faktor	Beschreibung
Atmosphärenzustand	Beschreibt die momentane lokale physikalische Beschaffenheit der Atmosphäre während des Fluges um das Flugzeug herum, u.a. Luftfeuchtigkeit, NO _x -Hintergrundkonzentration und Temperatur. Diese Größen beeinflussen den Einfluss auf Ozon, Wolkenbildung etc..
Tageszeit	Flüge bei Tag oder bei Nacht, hat u.a. Einfluss auf die Wirksamkeit von Kondensstreifen.
Wetter & Wind	Umfasst lokal wechselnde Winde, lokale Wetterstörungen sowie regelmäßige Wettereinflüsse wie Westwinddrift oder Monsun.
Flugroute	Strecke, die das Flugzeug auf einem CityPair fliegt. Die Route ist abhängig von der Großkreisdistanz, vom Luftraum, von den Hoheitsgebieten der jeweiligen Länder etc..
Umwege & Warteschleifen	Umwege sind Abweichungen von der Großkreisdistanz zwischen zwei Flughäfen, bedingt durch Einschränkungen der Flugroute; Warteschleifen sind Flugmanöver, bei denen das Flugzeug über einem bestimmten Punkt in vorgeschriebener Route kreist und auf weitere Freigabe wartet
Distanz	Entfernung zwischen den Flughäfen (CityPair)
Flugprofil (Flughöhe in Abhängigkeit von Distanz)	Abhängig von der Distanz, der vorgeschriebenen Flughöhe und der Flugroute wechseln die Verhältnisse von Steigflug, Reiseflug und Sinkflug zueinander und damit der Treibstoffverbrauch eines Fluges.
Flughafenbetrieb	Länge des Rollens am Boden, Push Service, Bodenstromversorgung etc.
Operation	Einflüsse der Flugzeugführung auf den Treibstoffverbrauch eines Fluges; z.B. Continuous Descent Approach, langsames Fliegen usw.
Flugzeugtyp	Eingesetztes Flugzeug
Winglets	Aerodynamische „Spitzen“ an den Flügelenden; diese verringern den Luftwiderstand und reduzieren den Treibstoffverbrauch
Flugzeugalter	Alter der Maschine sowie der technologische Stand einer Baureihe
Wartung	Einfluss der Wartung auf Flugzeugzelle und -Triebwerke
Triebwerk	Beeinflusst den Treibstoffverbrauch sowie den Ausstoß von NO _x etc.
Bestuhlung, Sitzplatzkapazität	Anzahl der angebotenen Sitzplätze an Bord, aufgeteilt in verschiedene Sitzklassen
Beiladefrachtkapazität	Kapazität zur Beförderung von Beiladefracht
Beiladefracht	Neben den Passagieren mitgeführte Nutzlast in Form von Luftfracht und Post
Auslastung	Anzahl der tatsächlich transportierten Passagiere und Menge der Beiladefracht eines Fluges im Verhältnis zur möglichen Nutzlastkapazität
Operating Empty Weight	Betriebsleermasse eines Flugzeuges, diese hängt u.a. von der Ausstattung mit Bildschirmen, unterschiedlichen Sitzkomfortklassen etc. ab.
Andere Schadstoffe	Umfasst die klimaschädlichen Emissionen, die das Flugzeugtriebwerk im Betrieb außer CO ₂ ausstößt, z.B. Stickoxide (NO _x), Ruß, Partikel, Wasserdampf.

Tabelle 1: Faktoren, die die Klimawirkung eines Fluges beeinflussen können

3. Einführung: Wie ist ein Klimavergleich von Airlines möglich?

3.1. Unterschiede zwischen Fluggesellschaften

Airlines können theoretisch auf vielen Ebenen verglichen werden, in denen der Faktor Klima eine Rolle spielt. Da ist zunächst die absolute Menge der verursachten CO₂-Emissionen und anderen klimawirksamen Schadstoffen. Hinzu kommen das Geschäftsmodell der Airline und das Gewicht von Nachhaltigkeit und Umwelt allgemein in der Unternehmenspolitik (z.B. bei der Gewichtung von Fluglärm zu Flugzeugkosten, dem Rhythmus von Flugzeugwartung, der Beschaffung von Rohstoffen etc.). Alle diese Punkte werden im *atmosfair Airline Index* auf einen zentralen Parameter hin konzentriert, der als Leitindex für die Klimaeffizienz der Airline dient: CO₂ pro Passagierkilometer (bzw. genauer pro Nutzlastkilometer). Dieser Ansatz bildet die Frage nach der Klimaeffizienz von Airlines umfassend und ausreichend genau ab, wie wir in dieser Dokumentation zeigen werden.

Fluggesellschaften unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht. Dabei stehen die folgenden Kategorien im direkten oder indirekten Zusammenhang mit den CO₂-Emissionen und damit der Frage nach Klimaschutz:

1. Geschäftsmodell:

Wir unterscheiden wie in der Industrie üblich vier Hauptgeschäftsmodelle von Fluggesellschaften: Netz Carrier, Charter Carrier, LowCost Carrier und Regional Carrier. Diese unterscheiden sich u.a. hinsichtlich ihrer Einsatzgebiete, Distanzen und Unternehmensvergangenheiten (siehe unten). Der direkte Einfluss des Geschäftsmodells auf die Klimawirkung liegt darin, dass Chartergesellschaften die Nachfrage lange sammeln und zur Not Flüge absagen könnten, während Linienfluggesellschaften die Kapazitäten vorhalten müssen, auch wenn im schlimmsten Fall das Flugzeug fast leer bleibt. Dieser Unterschied ist aber in der Praxis kaum noch relevant, da sich Charter Carrier in zentralen Kriterien wie Öffentlichkeit, Regelmäßigkeit und Betriebs- und Beförderungspflicht nicht oder kaum noch von den Linienfluggesellschaften unterscheiden. Insbesondere bei der Beförderungspflicht gilt z.B. in Deutschland durch das Reisevertragsgesetz über den Reiseveranstalter eine Beförderungspflicht⁶. Daneben gibt es auch aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus eine selbst auferlegte Beförderungspflicht der Charter Carrier⁷. Die Sonderrolle der LowCost Carrier wird in Kapitel 3.4 diskutiert.

⁶ § 651 a, Abs. 1 BGB, zitiert in Pompl, 2997, S. 37.

⁷ Bachmann, K.: Charterflugverkehr, S.27, zitiert in Pompl, 2007, S. 37.

2. Einsatzgebiete:

Auf bestimmten „Rennstrecken“ wie dem Nordatlantik ist die Nachfrage größer als auf regionalen Nebenstrecken. Das wirkt sich aus Klimasicht mindestens zweifach aus: Erstens kann die zeitabhängige Fluktuation der Nachfrage auf den kleinen Strecken größer sein und damit das Risiko, Kapazitäten nicht verkaufen zu können und mit geringer Auslastung fliegen zu müssen. Zweitens können Fluggesellschaften auf Rennstrecken größere Flugzeuge einsetzen, die pro Passagier weniger Treibstoff verbrauchen und damit spezifisch weniger CO₂ erzeugen.

3. Distanzen:

Der spezifische Treibstoffverbrauch pro Passagierkilometer hängt von der Flugdistanz ab: Ist der Treibstoffverbrauch pro Kilometer Nutzlastbeförderung auf Kurzstrecken am höchsten, so sinkt er mit wachsender Distanz bis zu einem Optimum auf der Mittelstrecke, bevor er mit weiter steigender Distanz wieder leicht ansteigt. Dieser Zusammenhang gilt für alle Flugzeuge und beruht auf dem Zusammenspiel von Flugzeugleermasse und Treibstoffgewicht. Fluggesellschaften sind also aus Klimasicht im Vorteil, wenn sie hauptsächlich Mittelstrecken bedienen. Dennoch müssen auch die Wettbewerber, die hauptsächlich Kurz- oder Langstrecken fliegen, gerecht beurteilt werden.

4. Geschichte:

Während viele der ehemaligen staatlichen Carrier erst mit der Liberalisierung des Luftverkehrs zunächst in den USA und später in der EU dem Wettbewerb ausgesetzt wurden, gründeten sich jüngere Fluggesellschaften erst später im bereits zunehmend liberalisierten und wettbewerbsorganisierten Markt. Andererseits können jüngere Airlines von Anfang an moderneres und damit meist treibstoffsparenderes Gerät kaufen, während ältere Fluggesellschaften die lange Lebensdauer von gekauften Jets bis zum Ende ausnutzen, um nicht durch frühzeitige Abschreibungen Verluste in Kauf nehmen zu müssen.

Die Frage ist, wie sich bei diesen Unterschieden Airlines überhaupt aus Klimasicht sinnvoll vergleichen lassen. Sinnvoll bedeutet hier die Orientierungsmöglichkeit für einen Passagier, wenn er sich bei der Auswahl der Airline für einen Flug die Klimateffizienz in die Entscheidung mit einbeziehen will (siehe Kapitel 1, Ziel des AAI und Nachfrageperspektive). Die Antwort auf diese Frage lautet, dass ein Vergleich von Airlines möglich ist, wenn drei grundsätzliche Bemessungsgrundlagen gegeben sind:

1. Nachfrageperspektive (siehe Kapitel 1)
2. Ranking nach CO₂ pro Nutzlastkilometer

3. Ranking auf einem CityPair als Vergleichsgrundlage

Die letzten beiden Punkte werden wir im Folgenden diskutieren.

3.2. Bemessungsgrundlage I: CO₂ pro Nutzlastkilometer

Für das Ziel der Orientierungsmöglichkeit eines Passagiers reicht die reine Klimawirkung eines Fluges nicht. Nicht nur wird die Klimawirkung meist in physikalischen Einheiten des Strahlungsantriebs (W/m^2) oder Temperaturerhöhung (ΔC°) angegeben, die für einzelne Flüge schwer errechenbar wäre.

Vor allem aber fehlt dieser absoluten Größe ein Bezugsrahmen, der die zwangsläufig bei jedem Flug anfallende Klimawirkung in Bezug setzt zu dem Ziel des Passagiers, nämlich dem Transport an sein Flugziel (denn sonst würde die Airline am besten abschneiden, die am wenigsten fliegt).

Diese Art von Verhältnis aus Aufwand zu Nutzen hat sich vielfach als Effizienzeinheit bewährt (z.B. EUR pro Liter Milch bei Nahrungsmitteln, CO₂ pro Kilometer beim Auto). Aus diesem Grunde setzt der AAI als erste Grundlage die Klimawirkung pro Nutzlastkilometer. Die Anwendung eines solchen Quotienten als Bemessungsgrundlage kommt im wesentlichen CO₂ pro Nutzlastkilometer gleich, da auch bei der gebotenen Vollständigkeit neben CO₂ nur noch NO_x in den AAI einbezogen werden muss (siehe Kapitel 4.12). Aus diesem Grund spricht diese Dokumentation immer vereinfachend von CO₂ pro Nutzlastkilometer anstatt Klimawirkung pro Nutzlastkilometer.

Bei der Nutzlast unterscheidet der AAI nicht zwischen Beiladefracht (Post und Fracht) und Passagieren, sondern zieht ausschließlich die gesamte transportierte Nutzlast in der Einheit transportierter Masse heran. Dies ist gerechtfertigt, weil wir nicht ohne normative Vorgaben zwischen dem Nutzen eines Passagiers bei seinem Flug und dem Nutzen eines Frachtempfängers bei der Auslieferung seiner Fracht vergleichen können. Zudem optimieren in der Praxis die Fluggesellschaften beförderte Passagiere und Fracht nach ihren eigenen Präferenzen. Um die Effizienz dieser Optimierung sinnvoll miteinander vergleichen zu können, müssen wir Passagiere und Fracht zusammenzählen können. Da die Klimawirkung vom Treibstoffverbrauch und dieser wieder von der Nutzlast abhängt, geschieht dieses Zusammenzählen von Fracht und Passagieren über die Masse der Nutzlast.

Das Prinzip der CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer löst die oben genannten Herausforderungen von Geschäftsmodell und Vergangenheit der Airlines: Für den Passagier ist es wie beim Ticketpreis irrelevant, ob die Fluggesellschaft jung oder alt ist, bzw. welche Geschichte und Geschäftsmodell sie hat. Ähnlich wie beim Ticketkauf entscheidet er sich für eine der Airlines, die den gewünschten Flug anbietet. Der Markt regelt die Konkurrenz zwischen den Airlines und führt dazu, dass einige Airlines

einen Flug eine Zeitlang anbieten, dann wieder nicht, dann mit anderem Gerät, neue Airlines hinzukommen etc.. Alle Fluggesellschaften haben unabhängig vom Geschäftsmodell Zugang zu den gleichen Flugzeugherstellern und damit zur gleichen Technologie. Die Fluggesellschaften können daher CO₂ mit in ihr Angebotskalkül einbeziehen, ohne dass es dabei Benachteiligungen für eine Fluggesellschaft gäbe, die sich nicht auf ihr selbst gewähltes Geschäftsmodell zurückführen ließen. Das CO₂ pro Passagier hier in den Wettbewerb mit einzubeziehen, stellt somit kein grundsätzliches Problem dar, sondern nur das Hinzufügen eines weiteren Wettbewerbselements zwischen den Fluggesellschaften.

3.3. Bemessungsgrundlage II: Vergleich auf CityPairs

Das Ranking basiert auf dem Vergleich von Airlines auf einem gegebenen CityPair. Die Einzelwertungen der Airlines auf den verschiedenen, von ihr beflogenen CityPairs werden zwar später für das Gesamtranking gemittelt, aber die eigentlichen Effizienzpunkte werden einzeln auf CityPairs vergeben, auf denen jede Airline genau die gleichen physikalischen Randbedingungen erfüllt.

Das Prinzip des CityPairs als Grundlage löst alle physischen Herausforderungen an ein Airline-Ranking: Auf einem CityPair sind die physikalischen und zentralen ökonomischen Randbedingungen für alle Airlines gleich: Distanz, Luftraumstruktur, Wind, Flughäfen, Nachfrage etc. Wenn sich also eine Airline entscheidet, auf einem CityPair ein bestimmtes Flugzeug mit einer bestimmten Bestuhlung und technischen Ausstattung in einer bestimmten Frequenz anzubieten, dann trifft sie damit vollständig eigenständige Entscheidungen, die ihre Antwort auf diese zentralen Randbedingungen auf diesem CityPair darstellt. Eine andere Airline wird das gleiche, ein anderes oder gar kein Angebot für dieses CityPair erstellen. Damit wird auch das CO₂ pro Passagierkilometer (genauer: Nutzlastkilometer) zum Resultat der frei bestimmten Entscheidungen einer Fluggesellschaft im Wettbewerb mit anderen Fluggesellschaften. Sollte eine Fluggesellschaft auf einem bestimmten CityPair nicht anbieten können, z.B. weil sie bei der Slot-Politik der betroffenen Flughäfen nicht berücksichtigt wird, so erwächst ihr daraus im Airline-Index kein Nachteil, denn eine Fluggesellschaft wird nur auf einem CityPair gewertet, dass sie auch bedient.

Ein weiteres grundlegendes Problem, welches der Vergleich auf Basis der CityPairs löst: Der spezifische Verbrauch je Nutzlastkilometer hängt stark vom Flugprofil bzw. der Distanz ab. Vor allem Mittelstreckenflüge sind, bei ansonsten gleichen Randbedingungen (gleiches Flugzeug, gleiche Auslastung usw.), aus Sicht des Klimas effizienter als Kurz- oder Langstreckenflüge. Bei einer reinen Betrachtung auf Basis CO₂ je Nutzlastkilometer wären Airlines mit vielen Mittelstreckenflügen im Vorteil und Airlines diskriminiert, die solche Strecken gar nicht anbieten. Auch aus Nachfragesicht wäre dies irreführend: Dem Nutzer des AAI ist nicht damit gedient, wenn er einen Langstreckenflug

beabsichtigt und dem AAI entnehme, dass er aus Klimasicht doch lieber einen Mittelstreckenflug buchen sollte. Durch den Vergleich der Airlines auf Ebene der CityPairs entfällt dieses Problem, da Distanz und Flugprofil der Flüge der zu vergleichenden Airlines auf einem CityPair stets gleich sind.

3.4. Sonderfall LowCost Airlines

Das Klima wird durch absolute Emissionen erwärmt, also Tonnen CO₂, die Menschen verursachen. Diese hängen zunächst von der Distanz des Reiseziels und dem gewählten Verkehrsmittel ab. Aus der Nachfragerperspektive fällt der Passagier zuerst die Entscheidung zu reisen und wird so verantwortlich für die damit verbundenen absoluten CO₂-Emissionen. Die Airline ist dann verantwortlich dafür, die spezifischen CO₂-Emissionen auf dem Flug des Kunden zu minimieren. Auf diesem Prinzip der Nachfragerperspektive und den spezifischen CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer einer Airline beruht das Ranking im AAI.

Bis hierher haben wir gezeigt, dass in der Nachfragerperspektive eines Passagiers und basierend auf zwei Grundprinzipien (CO₂ pro Nutzlastkilometer und per CityPair) alle Unterschiede zwischen den Airlines soweit eliminiert sind, dass diese im AAI ohne Schiefelage aus Klimasicht vergleichbar werden. Die Voraussetzungen, Bedingungen und Ziele eines CharterCarriers, LowCost Carriers oder NetzCarriers mögen noch so unterschiedlich sein, sie werden für den Kunden nur darin sichtbar, ob eine Airline auf dem von ihm gewünschten CityPair zu den von ihm angestrebten Konditionen (Flugzeit, Flexibilität, Klasse, Preis etc.) Flüge anbietet oder nicht.

Während aber die Faktoren Flugplan und Flugklasse aus Klimasicht neutral sind, ist es der Preis nicht, und hier liegt ein Unterschied zwischen LowCost Airlines und den anderen Airlines. Die niedrigen Ticketpreise rufen bei vielen Passagieren erst die Reise hervor. Es ist bekannt, dass LowCost Airlines durch ihre Preispolitik Nachfrage induzieren und damit zusätzliche absolute CO₂-Emissionen verursachen⁸. So fand der europäische Verband der LowCost Carrier ELFAA in einer Studie, dass in der EU knapp zwei Drittel aller Passagiere von LowCost Airlines ohne das Angebot dieser Airlines nicht geflogen wären⁹, und Nilsson schlussfolgert nach einem Vergleich von drei Studien, dass der größere Teil von LowCost Flügen „neuer“ Verkehr ist¹⁰. Etwa drei Viertel der in der ELFAA – Studie befragten Fluggäste wäre nach eigener Aussage auch nicht mit einem anderen Verkehrsmittel gereist.

⁸ NILSSON 2009, S. 121f.

⁹ ELFAA 2004.

¹⁰ NILSSON 2009, S. 122; nach ELFAA 2004, DOGANIS 2006 und KNORR 2007.

Auch die Wachstumsraten unterscheiden sich signifikant: LowCost Carrier wachsen um ein vielfaches schneller als die übrigen Airlines¹¹ und mit ihnen ihre absoluten CO₂-Emissionen.

Ökonomisch gibt es hier keinen Unterschied zwischen den Airlines. Alle maximieren als Wirtschaftsunternehmen ihre Gewinne. Ein Weg dahin führt über die Kostenreduktion. LowCost Carrier sind erfolgreich darin, ihre Betriebskosten zu reduzieren, indem sie z.B. von preisgünstigen Regionalflughäfen fliegen, nur eine Buchungsklasse anbieten, wenige Flugzeugtypen in der Flotte haben, geringe Umlaufzeiten, geringe Vertriebskosten durch Direktvertrieb, Verzicht auf nicht notwendige Service etc.. Generell kann ein Unternehmen einen Kostenvorteil entweder dadurch gegenüber den Wettbewerbern nutzen, dass es seine Produkte zu ähnlichen Preisen wie die Konkurrenz bei besseren Margen verkauft, oder bei geringerem Preis und geringeren Margen höhere Stückzahlen erzielt. Beides sind gängige Strategien zur Gewinnmaximierung und aus mikroökonomischer Sicht neutral, da hier Marktprozesse ablaufen, die optimale Ressourcenallokation gewährleisten.

LowCost Carrier wählen den Weg zur Gewinnmaximierung über Senkung des Preises und Erhöhung der Stückzahlen. Dies tun sie in einem Maße, das zu Flügen führt, die sonst nicht entstanden wären. Damit verändern die LowCost Airlines die Abfolge „Nachfrage der Passagiere zieht Angebot der Airlines nach sich“, was zusätzliches CO₂, nach sich zieht. Solange der Gesetzgeber aber nicht durch Klimaschutzgesetzgebung etc. eingreift, und sich eine Fluggesellschaft an die bestehenden Gesetze hält, kann dies aber den LowCost Carriern nicht zugerechnet werden.

Der Airline Index aber richtet sich an Passagiere. Der größere Teil wäre ohne die LowCost Carrier gar nicht geflogen. Da Vermeiden aus Umweltsicht Priorität vor Optimieren hat, müssten aus Klimaschutzsicht diese Passagiere diese Flüge vermeiden. Daher ist es schwierig, die LowCost Carrier und die anderen Anbieter auf einer Ebene im Airline Index darzustellen, ohne die Lenkungswirkung für den Klimaschutz zu verzerren.

3.4.1. Subventionen

Ein weiterer möglicher Unterschied zwischen den traditionellen und den LowCost Airlines liegt in der finanziellen Unterstützung der öffentlichen Hand. Zwar profitieren Fluggesellschaften im allgemeinen von Sonderregelungen, etwa bei der Nichtbesteuerung von internationalen Tickets, von Kerosin, der Unterstützung von Flugzeugherstellern etc.. Dies gilt aber für alle Fluggesellschaften und ist daher für ein Ranking nicht relevant.

¹¹ In 2007 (2006) wuchsen die LowCost Carrier weltweit um 20% (14%), wohingegen der restliche Flugverkehr weltweit nur um 4% (2%) zunahm. Zwischen 2001 und 2005 haben die LowCost Carrier ihren Marktanteil von 6% auf 12% verdoppelt. Vgl. OAG Press Releases 2005 bis 2010

Der relevante Unterschied könnte dagegen bei den direkten finanziellen Unterstützungen der öffentlichen Hand für einzelne Airlines bestehen, die hier für die beiden Klassen der NetzCarrier und LowCost Airlines dargestellt sind:

- NetzCarrier: Diese können von der öffentlichen Hand durch Subventionen und staatliche Interventionen zugunsten der nationalen (Ex) FlagCarrier profitieren (z.B. staatliche Beihilfen an Air France, Rettung der Alitalia, Schuldenfreistellung der AUA vor der Übernahme durch die Lufthansa etc.).
- LowCost Airlines: Diese profitieren häufig von niedrigen Landegebühren und „Marketing Unterstützung“, die vom kommunalen Flughafen aber nicht in Form einer Sachleistung erbracht wird, sondern direkt als Geld an die Airline fließen kann¹². Am Beispiel Ryanair wurde geschätzt, dass die direkten Zahlungen pro Passagier zwischen etwa 10 und 30 EUR pro Flug ausmachen und damit einen erheblichen Teil des günstigen Ticketpreises ermöglichen¹³. Zudem fliegen die LowCost Airlines bevorzugt von kleinen Regionalflughäfen, bei denen die öffentliche Hand im Vergleich zu anderen Flughäfen am stärksten an der Finanzierung beteiligt ist¹⁴.

Aus Sicht der Umweltökonomie bedeuten Subventionen externe Kosten, da sie die optimale Ressourcenallokation beeinträchtigen. Da aber Subventionen an Airlines wie oben dargestellt verbreitet sind, gibt es hier keinen prinzipiellen Unterschied zwischen den LowCost und den anderen Airlines. Allerdings führen diese Subventionen bei den LowCost Carriern zusätzlich zur Marktverzerrung zu externen Kosten in der Form von Billigangeboten und in der Folge Klimaerwärmung durch mehr CO₂.

Der Effekt kann erheblich sein, was sich bereits in einer Überschlagsrechnung zeigt: Wir nehmen als konservatives Beispiel die genannten Untergrenze von 10 EUR der oben genannten 10 – 30 EUR Subventionen für einen Passagier auf einem Flug von Ryanair. 10 EUR entspricht derzeit dem Handelspreis von etwa 600kg CO₂ im EU Emissionshandelssystem. Das heißt, der Subventionsgeber könnte, anstatt einen Flug von Ryanair zu subventionieren, mit dem gleichen Geld ca. 600 kg CO₂ in der EU von der Industrie einsparen lassen. Diese 600kg CO₂ sind aber mehr als das doppelte der Menge von CO₂, die bei einem Kurzstreckenflug pro Passagier selbst in der schlechtesten Effizienzklasse G (siehe Kapitel 11.3) freiwerden. Und 600kg CO₂ entsprechen etwa dem Unterschied

¹² Bei dem derzeitigen Streit etablierter Netz - Carrier mit den LowCost Airlines geht es im Wesentlichen um die Frage, ob die Subventionen nach EU-Recht den Tatbestand der unzulässigen Beihilfe erfüllen oder nicht. Die EU-Kommission hat dazu 2005 eigene Leitlinien verabschiedet. Dass aber die öffentliche Hand einige LowCost Carrier finanziell unterstützt, bestreiten auch die LowCost Carrier nicht.

¹³ Vgl. LE FIGARO 2010, o. S.

¹⁴ Deutsche Bank, 2005.

zwischen den Effizienzklassen A und der Klasse D bei einem Hin- und Rückflug pro Passagier von Frankfurt auf die kanarischen Inseln.

Die Subventionen sind also tatsächlich in einer Größenordnung, die eine Fluggesellschaft im Klimaranking leicht von ganz oben nach ganz unten befördern können, wenn sie in die Rechnung mit einbezogen würden. Da aber die Daten nicht für alle Fluggesellschaften verfügbar sind, kann das im AAI derzeit nicht geschehen.

3.4.2. Umwege

LowCost Carrier bieten Flüge von und zu dezentralen Flughäfen an¹⁵. Damit erzeugen sie Umwege für die Reisenden, da angenommen werden kann, dass quantitativ die Fluggäste eher aus den Zentren kommen und daher bei einem Flug von oder zu einem Zentrum über die dezentralen Flughäfen im Mittel größere Umwege anfallen, als bei Flügen von und zu zentralen Flughäfen. Diese Umwege erzeugen je nach Länge und eingesetztem Verkehrsmittel CO₂, das im Vergleich zu den Netz Carriern eigentlich noch in die Bilanz des LowCost Fluges eingerechnet werden müsste. Da dieser Effekt aber von einer Reihe von Faktoren abhängt, zu denen keine vergleichbaren Daten vorliegen, kann der AAI diesen Effekt quantitativ nicht erfassen.

3.4.3. Abgrenzung der LowCost Airlines

Wie auch bei den anderen Arten von Fluggesellschaften sind die Grenzen zwischen LowCost Airlines und übrigen Airlines nicht klar gezogen. Auch die übrigen Airlines erzeugen durch Werbung, Vielfliegerprogramme, Sonderangebote etc. teilweise Nachfrage, die sonst nicht entstanden wäre. Es ist bekannt, dass auf vielen Flugstrecken, die die LowCost Carrier mit NetzCarriern im Wettbewerb bedienen, die Netz- oder Chartercarrier auch die Preise auf das Niveau der LowCostCarrier senken¹⁶, bzw. eigene LowCost-Tochtergesellschaften ausgründen. Zudem sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen LowCost Carriern erheblich. Der LowCost Monitor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zeigt für den deutschen Markt die Unterschiede und Abgrenzungen zwischen den Airlines auf¹⁷:

„Die im LowCost Bereich tätigen Airlines gestalten ihr Angebot zum Teil sehr unterschiedlich. Auf Grund dieser Inhomogenität lassen sich nur wenige eindeutige Abgrenzungskriterien für das Marktsegment LowCost definieren wie z.B. niedriger Preis, generelle Verfügbarkeit niedriger Preise und Direktvertrieb über das Internet. Es besteht deshalb in einigen Fällen ein gewisser

¹⁵ Pompl 2007, S. 115

¹⁶ Vgl. VERBRAUCHERZENTRALE NIEDERSACHSEN 2010

¹⁷ Vgl. DLR Low Cost Monitor 2/2010

Ermessensspielraum in der Zuordnung einer Luftverkehrsgesellschaft zum LCC Segment. Bei einigen Fluggesellschaften findet darüber hinaus eine Verschmelzung der Geschäftsmodelle statt, die eine eindeutige Zuordnung zum LowCost Markt zusätzlich erschwert. Für diese Ausgabe klassifizieren die Verfasser des Monitors derzeit 19 der auf deutschen Flughäfen tätigen Airlines, die ganz oder teilweise LowCost Angebote vorhalten.¹⁸

Die Einteilung der Fluggesellschaften als LowCost Carrier erfolgt beim DLR nach ähnlichen Kriterien wie beim Datendienstleister ATI der internationalen zivilen Luftfahrtorganisation ICAO (siehe Kapitel 9.2.3). Bei ATI lautet die Definition von LowCost Airlines wie folgt:

“Precise definition of a low-cost carrier is difficult given the evolution of the model and increasing common ground with network carriers, but we specify a low-cost carrier as a point-to-point scheduled operator which largely adheres to the core principles of the low-cost carrier model. The airline will have a stand-alone management team and will market itself on price, mostly with a single class offering. Carriers will sell most of their tickets through direct sales via the Internet, and onboard frills will be available only for a fee.”¹⁹

3.4.4. Behandlung der LowCost Airlines

Die LowCost Carrier sind gesondert zu betrachten, weil sie methodische Probleme bei der CO₂-Berechnung und Darstellung bereiten, die atmosfair bisher nicht lösen konnte. Diese Probleme sind:

- Subventionen: Viele (aber nicht alle) LowCost Carrier erhalten Subventionen und erzeugen damit Flüge, die sie sonst nicht zu den niedrigen Preisen hätten anbieten können. Diese Subventionen erzeugen CO₂, das auch in die Klimabilanz der subventionierten Airline einfließen müsste.
- Umwege: Viele Billigflieger fliegen von und zu Regionalflughäfen. Die Anfahrtswege sind dann aber überwiegend länger als beim Flug von Zentrum zu Zentrum. Durch diese längeren Anfahrten entsteht zusätzliches CO₂, das im Ranking mit eingerechnet werden müsste.
- Darstellung für den Kunden: Billigflieger erzeugen mit ihrem Geschäftsmodell Flüge und damit CO₂, das ohne die niedrigen Preise nicht entstanden wäre. Das kann den Billigfliegern

¹⁸ Ebd., S. 2 (Appendix 5 führt weitere Passagen aus dem DLR Low Cost Monitor auf, die die Abgrenzung von Fluggesellschaften im Einzelfall beleuchten)

¹⁹ ATI, persönliche Mitteilung, Februar 2011.

nicht angelastet werden, weil sie ja nur legales Business betreiben. Der Airline Index richtet sich aber an Passagiere. Viele wären ohne die Billigflieger gar nicht geflogen. Wenn es um die Relevanz für den Klimaschutz geht, müssten diese Passagiere zuerst das CO₂ dieser Flüge vermeiden. Da Vermeiden aus Umweltsicht Priorität vor Optimieren hat, ist es schwierig, beide Kategorien von Anbietern auf einer Ebene im Airline Index darzustellen, ohne das Bild zu verzerren.

Ausnahme aus dem AAI

Wie oben gezeigt, ist es derzeit nicht möglich, LowCost Airlines ohne Verzerrung in einem Klimaranking mit anderen Airlines zu vergleichen. Aus diesen Gründen werden die LowCost Carrier derzeit nicht in den AAI aufgenommen. Die Einteilung als LowCost Carrier übernimmt der AAI von ATI, der die großen Fluggesellschaften der Welt in verschiedene Kategorien einordnet. Sobald atmosphärische Lösungen für die methodischen Probleme findet, können die Billigflieger in zukünftige Rankings aufgenommen werden.

4. Welche Einflussfaktoren bestimmen das CO₂ pro Nutzlastkilometer?

In diesem Kapitel werden alle Faktoren aus Kapitel 2 diskutiert, die sich auf das CO₂ pro Nutzlastkilometer auswirken können. Dieses Kapitel untersucht nur, ob ein Faktor einbezogen wird oder nicht und gibt den Ansatz für die Wahl der Methode wieder. Die genaue Methode wird dann im Kapitel 5 beschrieben.

4.1. Kriterien für die Einbeziehung von Faktoren in die Berechnung des AAI

Dieses Kapitel diskutiert bei jedem Einflussfaktor, ob

1. eine Airline den Faktor überhaupt beeinflussen kann,
2. sich die Airlines in der Handhabung dieses Faktors unterscheiden,
3. das Gewicht des Faktors groß genug ist, um ihn im AAI zu berücksichtigen (Relevanzkriterium). Die Schwelle ist so definiert, dass ein Faktor die CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer um mindestens 1% beeinflussen muss.

Nur wenn alle drei Kriterien erfüllt sind, bezieht der AAI den jeweiligen Faktor in die Berechnungen mit ein.

4.2. Flugdistanz

Die Flugdistanz beeinflusst direkt den Treibstoffverbrauch eines Fluges. Je weiter der Flug, desto mehr Treibstoff verbraucht ein Flugzeug. Jede Airline bestimmt selbst, wie weit sie fliegen will und damit auch den absoluten Treibstoffverbrauch und CO₂ Emissionen.

Jedoch folgen alle Airlines in der Regel derselben Route zwischen den jeweiligen CityPairs, wodurch die Distanz für alle gleich, und damit kein Unterscheidungsmerkmal gegeben ist. Da die Bewertung im AAI auf Einzelwertungen auf gleichen CityPairs beruht (siehe Kapitel 6), fließt die Distanz also nicht gesondert in den AAI ein.

Des Weiteren besteht ein Zusammenhang zwischen Distanz und Flughöhe. So ist bekannt, dass Kurzstreckenflüge pro Kilometer mehr Treibstoff verbrauchen als z.B. Mittelstreckenflüge, weil der energieintensive Steigflug mehr ins Gewicht fällt. Dieser Aspekt wird im nächsten Abschnitt gesondert behandelt.

Flugdistanz	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja, aber nicht auf einem gegebenen CityPair
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Nein, nicht auf einem CityPair
Aufnahme in den AAI	Nur indirekt über das Flugprofil

Tabelle 2: Zusammenfassung des Faktors Flugdistanz

4.3. Flugprofil (Steigflug und Reiseflughöhe in Abhängigkeit von der Distanz)

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 folgenden Phasen:

1. Start bis zum Abheben.
2. Steigflugphase, in der das Flugzeug nach dem Start bis auf Reiseflughöhe steigt.
3. Reiseflugphase, in der das Flugzeug mit relativ konstanter Höhe eine bestimmte Distanz zurücklegt. Sie wird in unterschiedlicher Flughöhe durchgeführt: bei Kurzstreckenflügen im Bereich von etwa 5 bis 7 Kilometern, bei Langstreckenflügen häufig bei etwa 10 Kilometern bis zu etwa 13 Kilometern.
4. Sinkflugphase, in der das Flugzeug von der Reiseflughöhe wieder bis zur Landung absteigt.
5. Landung.

Das Flugprofil hängt ab von der Distanz des CityPairs, sowie vom gewählten Flugzeugtyp. Flughöhen werden zum Teil seitens der Flugsicherung vorgegeben. Existieren keine Vorgaben (vor allem bei Langstrecke außerhalb nationaler Hoheitsgebiete) steigen die Flugzeuge in die Höhen, in denen der Treibstoffverbrauch insgesamt minimal wird bzw. störende Wettereinflüsse minimiert werden.

Das Flugprofil bestimmt den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs insofern, als dass die treibstoffintensive Phase des Steigfluges bei kurzen Strecken mehr ins Gewicht fällt als bei mittleren oder langen Strecken.

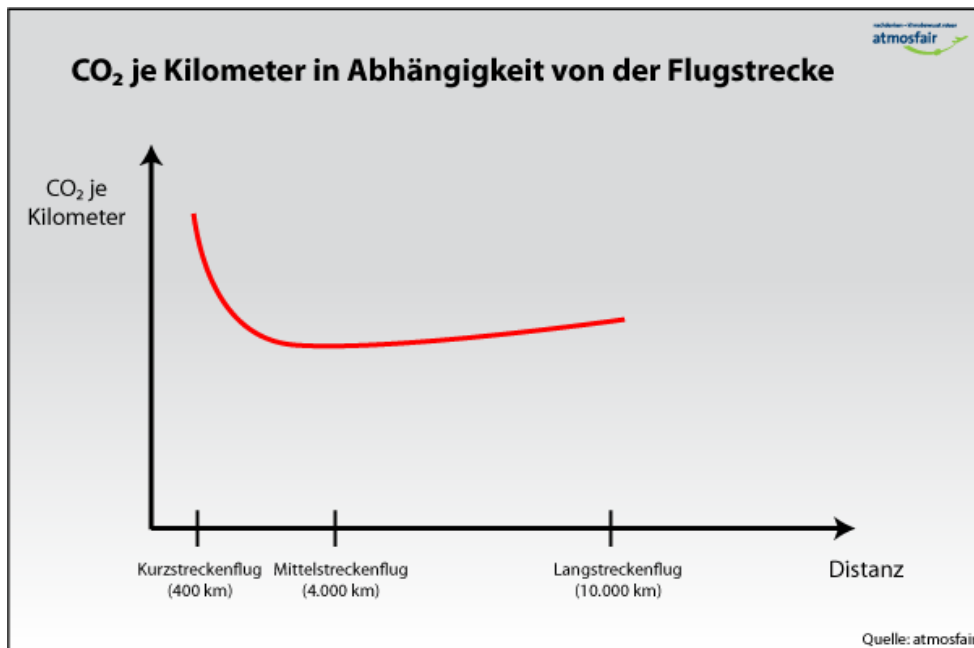


Abbildung 1: CO₂ - Emissionen eines Flugzeuges in Abhängigkeit von der Flugstrecke

Eine Fluggesellschaft, die nur auf Kurzstrecken fliegt und deswegen auch bei optimalem Flugzeugpark höhere CO₂ –Emissionen pro Kilometer hat als eine andere Fluggesellschaft, die optimal ausschließlich Mittelstrecken bedient, würde also im AAI schlechter abschneiden, weil dieser ja als Bemessungsgrundlage die spezifischen CO₂-Emissionen ansetzt. Dieses Ergebnis wäre aber nicht gewollt, da für einen Passagier, der sich entschieden hat, eine Kurzstrecke zu fliegen, die Information wenig hilfreich ist, dass diese oder eine andere Airline auf der Mittelstrecke effizienter fliegt.

Diesen unerwünschten Effekt vermeidet der AAI dadurch, dass er Airlines ausschließlich auf gleichen CityPairs vergleicht und erst danach die Effizienzpunkte über alle Flüge mittelt. So wird der Vergleich aussagekräftig für Passagiere, für die bei jedem Flug unabhängig von der Distanz nur eine Kaufentscheidung anfällt.

Das treibstoffoptimale Flugprofil zu einem gegebenen CityPair hängt direkt vom eingesetzten Flugzeug ab. Die Auswahl kann die Fluggesellschaft direkt steuern und hier kann sie sich auch von anderen Fluggesellschaften unterscheiden. Der jeweilige zum Einsatz kommende Flugzeugtyp wird mit dem von ihm auf einem CityPair geflogenen Flugprofil im AAI exakt abgebildet. Für jede Distanz und für jeden Flugzeugtyp berechnet der AAI einzeln Treibstoffverbrauch und CO₂–Emissionen. In diesem Sinne geht das Flugprofil detailliert in den AAI ein.

Flugprofil (Steigflug, Reiseflug und Landeanflug)	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja, über Flugzeugwahl
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja, über Flugzeugwahl
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	siehe Flugzeugtyp
Aufnahme in den AAI	Ja, über die Wertung auf CityPairs und den ausgewählten Flugzeugtypen

Tabelle 3: Zusammenfassung des Faktors Flugprofil

4.4. Atmosphärenzustand

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. Der Zustand der Atmosphäre umfasst u.a. die Temperatur, Luftfeuchte, Konzentration von Stickoxiden, vertikale Strömungskomponenten etc. Diese haben Auswirkungen auf das Entstehen und die Lebensdauer sowie Strahlungseigenschaften von Kondensstreifen, die Bildung oder Abbau von Ozon, den Abbau von Methan etc., die wiederum direkt den Strahlungshaushalt der Erde verändern, mit der Wirkung einer Erwärmung oder Abkühlung²⁰.

Der momentane lokale Zustand der Atmosphäre entzieht sich dem Einfluss der Airlines, daher bleibt dieser Faktor im AAI unberücksichtigt, auch wenn er die Klimawirksamkeit eines Fluges erheblich beeinflusst, z.B. durch die Bildung von Kondensstreifen.

Atmosphärenzustand	
Beeinflussbar durch die Airline	Nein
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Nein
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 4: Zusammenfassung des Faktors Atmosphärenzustand

4.5. Meteorologie

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.

²⁰ Vgl. IPCC 1999 und LEE et al. 2009

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.

Wetter & Wind	
Beeinflussbar durch die Airline	Nein
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Nein
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 5: Zusammenfassung des Faktors Wetter & Wind

4.6. Flugrouten und Umwege

Als Flugrouten werden die Wege bezeichnet, die die Flugzeuge zurücklegen. Aus ökonomischen Gründen versuchen die Airlines, die kürzest möglich Verbindung zwischen zwei Punkten (Großkreisdistanz) zu fliegen, jedoch ist das auf Grund einer Reihe von Einschränkungen nicht immer möglich.

- Luftraum innerhalb nationaler Hoheitsgebiete

Im Luftraum innerhalb der Hoheitsgebiete des jeweiligen Landes teilt die Flugsicherung Flugrouten sowie Flughöhen zu. Ein Abweichen hiervon ist lediglich in Ausnahmefällen oder Notsituationen zulässig. Gerade im innereuropäischen Luftraum, der trotz Harmonisierung weiterhin auf Grund der Inkompatibilität der Luftsicherungssysteme zersplittert ist, müssen Flugzeuge somit oft verschiedene Gebiete umfliegen, wodurch sich die Flugstrecke teilweise erheblich verlängert.

Im Luftraum außerhalb von Hoheitsgebieten dagegen steht dem Piloten die Wahl der Flugroute frei, jedoch gibt es auch hier Einschränkungen.

- ETOPS

Die ETOPS (**E**xtended-range **T**win-engine **O**perational **P**erformance **S**tandards) sind Vorschriften der ICAO, die für zweistrahlige Flugzeuge die Wahl der Flugrouten einschränken. Diese dürfen nur Strecken fliegen, bei denen sichergestellt ist, dass bei einem Triebwerksausfall der nächste für das Flugzeug zugelassene Flughafen innerhalb einer bestimmten Zeit erreichbar ist. Dies schränkt die freie Flugroutenwahl ein. Aus Kostengründen setzen die Airlines im zunehmenden Maße auf zweistrahlige Flugzeuge, so dass die ETOPS für immer mehr Langstreckenflüge eine Rolle spielen. Drei- oder vierstrahlige Flugzeugmodelle sind hiervon nicht betroffen.

Flugroute	
Beeinflussbar durch die Airline	Teilweise
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Nein
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	Abhängig vom Umweg
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 6: Zusammenfassung des Faktors Flugroute

4.7. Warteschleifen

Auch Warteschleifen werden seitens der Flugsicherung vorgeschrieben. Eine Einflussnahme von einer Airline zu Lasten einer anderen Airline ist dabei nicht möglich.

Umwege und Warteschleifen	
Beeinflussbar durch die Airline	Nein
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Nein
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 7: Zusammenfassung des Faktors Warteschleifen

4.8. Bodenbetrieb auf dem 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 Flug²¹. 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

²¹ Brockhagen, 1995

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

Die drei beschriebenen Punkte entziehen sich weitestgehend dem Einfluss der Airlines, sie müssen den Vorgaben des jeweiligen Flughafens folgen. Da alle Airlines gleichermaßen betroffen sind, wird der Verbrauch des Flugzeugs am Flughafen nicht im AAI betrachtet.

Bodenbetrieb auf dem Flughafengelände	
Beeinflussbar durch die Airline	Kaum
Unterschiede zwischen den Airlines	Nein
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	< 1%
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 8: Zusammenfassung des Faktors Flughafen

4.9. Operation: Continuous Descent Approach (CDA), langsames Fliegen

4.9.1. Operation

Der Begriff Operation bezeichnet den Betrieb eines Flugzeuges und kann mit mehreren Bedeutungen gebraucht werden. Die Bedeutung von Operation im Sinne des AAI umfasst bestimmte Formen der

Flugzeugführung, die sich systematisch auf den Treibstoffverbrauch und damit die CO₂ – Emissionen auswirken. Im Folgenden werden die beiden Formen diskutiert, die am meisten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch eines Fluges haben.

4.9.2. Continuous Descent Approach (CDA)

Das CDA ist ein spezielles Anflugverfahren, welches im Vergleich zum herkömmlichen Step-Down 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 gibt²².

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 möglich²³. 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 Landen mittels CDA möglich ist. Daher wird das Kerosinsparpotential einer Airline, die viele Flughäfen anfliegt in der Realität deutlich weniger betragen als 1%. Somit erfüllt der CDA nicht das Relevanzkriterium und wird im AAI nicht berücksichtigt.

²² DFS Continuous Descent Approach, 2010

²³ CAO, SUN, DELAURENTIS w/o year

Operation: Continuous Descent Approach (CDA)	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja, aber Restriktionen durch Flughafenbetrieb
Unterschiede zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	< 1%
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 9: Zusammenfassung des Faktors CDA

4.9.3. Reduzierte Fluggeschwindigkeit

Eine Reduktion der Geschwindigkeit im Reiseflug verringert den Treibstoffverbrauch eines Flugzeuges und somit seine CO₂ – 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 9.1) 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 Geschwindigkeit²⁴. 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 erfüllt der Faktor Langsames Fliegen nicht das Relevanzkriterium und wird vom AAI nicht berücksichtigt.

Operation: langsames Fliegen	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	< 1%
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 10: Zusammenfassung des Faktors Langsames Fliegen

²⁴ Die 50 km/h sind hier ein Beispiel in der Sensitivitätsanalyse.

4.10. Flugzeug

Der Treibstoffverbrauch eines Fluges ist von einer Reihe von Faktoren abhängig, die im Folgenden diskutiert werden. Dazu gehören Flugzeugtyp, Winglets, Flugzeugalter und Wartung, Triebwerke, Bestuhlung, Frachtkapazität und Auslastungen, sowie das Operating Empty Weight OEW.

4.10.1. 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 eingesetzte Flugzeugtyp auf einem CityPair kann also direkt von den Airlines beeinflusst werden. Diese unterscheiden sich bei der Flugzeugwahl direkt voneinander. Unterschiedliche Flugzeugtypen können sich beim Treibstoffverbrauch um etwa 10% – 50% und mehr unterscheiden (siehe auch Faktoranalyse, Kapitel 12). Aus diesen Gründen wird der Flugzeugtyp in den AAI aufgenommen.

Flugzeug: Flugzeugtyp	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	>10%
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 11: Zusammenfassung des Faktors Flugzeugtyp

4.10.2. Triebwerk

Flugzeugtriebwerke werden häufig direkt für ein oder mehrere spezielle Flugzeugtypen gebaut, abgestimmt auf deren bauliche Eigenschaften und Leistungsanforderungen. Oder andersherum – für jeden Flugzeugtyp gibt es entweder genau ein, meist jedoch einige wenige passende Triebwerke.

Triebwerke können sich auf zwei Arten auf die Klimabilanz eines Fluges auswirken:

1. Über den spezifischen Treibstoffverbrauch und damit CO₂-Emissionen
2. Über die anderen Schadstoffemissionen (NO_x, UHC etc.).

Wir werden im Folgenden diese beiden Bereiche diskutieren.

Spezifischer Treibstoffverbrauch

Der spezifische Treibstoffverbrauch (SFC, specific fuel consumption) drückt aus, wie viel Treibstoff ein Triebwerk pro erzeugter Schubeinheit und Zeit verbraucht. Der im Flugzeug erreichte SFC hängt dabei wiederum von einer Reihe von Einflussparametern ab, u.a. von:

1. Druck und Temperatur in der Brennkammer
2. Nebenstromverhältnis (Bypass Ratio), also das Verhältnis von innerem (zur eigentlichen Turbine) zu äußerem Luftstrom bei Turbofantriebwerken.
3. Gewicht des Triebwerks
4. Luftwiderstand des Triebwerks inkl. Eingliederung in die Flugzeugzelle.
5. Fluggeschwindigkeit und Schub

Airlines richten sich bei der Auswahl der Triebwerke für ihre Flugzeuge nach diesen und nach rein wirtschaftlichen Faktoren. So können schwerere und einfachere Triebwerke mit höherem SFC weniger Verschleiß aufweisen und damit höhere Zyklenanzahlen vertragen, was diese Triebwerke trotz höherem SFC für häufig beflogene Kurzstrecken ökonomisch attraktiv machen würde etc.²⁵. Die Unterschiede im SFC können deutlich über 1% betragen, wie wir später zeigen werden (siehe Kapitel 5.3). Daher muss der SFC in den AAI mit einbezogen werden.

Andere Schadstoffemissionen

Die Optimierung der Triebwerke hin zu immer größeren Drücken, Temperaturen und Nebenstromverhältnissen hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass der SFC gesenkt werden konnte, aber gleichzeitig die Stickoxidemissionen NO_x anstiegen. NO_x bewirkt den Aufbau von Ozon in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Der Zusammenhang ist annähernd linear, d.h. je mehr NO_x emittiert wird, desto mehr O_3 bildet sich²⁶. Da Ozon in diesen Atmosphärenschichten als Treibhausgas wirkt, müssen die NO_x Emissionen als gegenläufiger Effekt zum SFC mit berücksichtigt werden, wenn der SFC mit in den AAI einfließt. Eine weitere Klimawirkung wird durch Kondensstreifen induziert (Kapitel 4.12). Es besteht ein Trade-Off zwischen Kondensstreifen und dem spezifischen Treibstoffverbrauch: je effizienter ein Triebwerk im Treibstoffverbrauch, desto häufiger entstehen Kondensstreifen²⁷. Da jedoch bisher keine quantitativen Erkenntnisse über diesen Zusammenhang vorliegen und die Bildung von Kondensstreifen außerdem stark vom momentanen Atmosphärenzustand abhängen, wird dieser Effekt im AAI nicht betrachtet. Die weiteren Schadstoffe neben CO_2 werden detailliert in Kapitel 4.12 diskutiert.

²⁵ Vgl. CFM INTERNATIONAL 2007

²⁶ LEE et al. 2009

²⁷ Gierens et al., 1999

Flugzeugtriebwerk: SFC und NO_x-Emissionen	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	>1% und indirekte Klimawirkung über NO _x -Emissionen
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 12: Zusammenfassen des Faktors Triebwerk

4.10.3. Winglets

Winglets sind an den Tragflächen angebrachte Flügelspitzen, die die aerodynamischen Eigenschaften des Flugkörpers verbessern und zu Treibstoffeinsparungen führen. Form und Größe der Winglets (raked Winglets, blended Winglets etc.) richten sich nach den baulichen Eigenschaften eines Flugzeugtyps und werden individuell angepasst. Mehrere Flugzeuge vom Hersteller Boeing können gegenwärtig entweder nachgerüstet oder auch serienmäßig mit Winglets bestückt werden. Für die im AAI enthaltenen Flugzeugtypen des Herstellers Airbus gibt es aktuell die Möglichkeit der optionalen Nachrüstung nicht, die Flugzeuge sind standardmäßig mit Wingtip Fences (A320 Familie, A380, A310-300, A300B4-600) oder Winglets (A330, A340) ausgestattet.

Der Einsatz von Winglets bei Flugzeugen von Boeing erlaubt Treibstoffeinsparungen von 3 - 5%²⁸. Da die Airlines selbst und frei über die Verwendung von Winglets entscheiden, unterscheidet der AAI bei nachrüstbaren Boeing - Flugzeugen mit und ohne Winglets.

Flugzeug: Winglets	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	3% – 5%
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 13: Zusammenfassung des Faktors Winglets

4.10.4. Sitzplatzkapazität

Die Anzahl der Sitze an Bord des Flugzeugs haben großen Einfluss auf die tatsächlich transportierte Nutzlast und somit auf den Treibstoffverbrauch des Fluges. Die Bestuhlung kann unterschiedlich ausfallen. Business und First Class Sitze sind größer und schwerer als Economy-Sitze. Erstere nehmen also mehr Raum ein und verdrängen somit Economy – Plätze.

²⁸ Boeing, 2000

Aber auch bei der Frage, wie viele Sitze in eine Sitzreihe aufgenommen werden, unterscheiden sich die Fluggesellschaften. Jede Fluggesellschaft versucht, ihre Flugzeuge so zu bestuhlen, dass sie damit ihr Kundenprofil in Bezug auf Zahlungswilligkeit und Komfortbedürfnis optimal bedient.

Die Bestuhlung muss als Faktor in den AAI einfließen, da sich einerseits die Airlines hierin unterscheiden und sie andererseits direkt von der Airline beeinflussbar ist. Zudem zeigt die Faktoranalyse (Kapitel 12), dass die Wirkung auf den spezifischen Treibstoffverbrauch groß genug ist, um bei der Wertung berücksichtigt zu werden.

Flugzeug: Sitzplatzkapazität	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	ca. 5% – 40%
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 14: Zusammenfassung des Faktors Sitzplatzkapazität

4.10.5. Frachtkapazität

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.

Die Faktoranalyse (Kapitel 12) zeigt zuletzt, dass das Gewicht des Faktors Frachtkapazität in der Wirkung auf den spezifischen Treibstoffverbrauch groß genug ist, um berücksichtigt werden zu müssen.

Flugzeug: Frachtkapazität	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	bis ca. 10%
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 15: Zusammenfassung des Faktors Frachtkapazität

4.10.6. Operating Empty Weight (OEW)

Das Operating Empty Weight ist die Leermasse des Flugzeugs ergänzt um die eingebaute, ständige Ausrüstung (Sitze, Küche, TV – Bildschirme, Treppen, Schwimmwesten usw.), sowie nicht nutzbare Treibstoffe und Flugpersonal.

In aller Regel rüsten die Airlines ihre Flugzeuge selbst aus. Dafür gibt es Anbieter für passagierbezogene Ausrüstung z.B. für Sitze. Um den Treibstoffverbrauch zu senken, hat jede Airline ein Interesse an gewichtsreduzierter Ausrüstung. Letztlich bedeuten z.B. leichtere Sitze ein niedrigeres OEW, wodurch das Startgewicht und der Treibstoffverbrauch sinken. Das OEW kann also von den Airlines beeinflusst werden, wobei der Einfluss im Wesentlichen auf die Innenausstattung wie Küchen, Sitze, Bildschirme, Toiletten, Treppen beschränkt ist. Das OEW eines Flugzeugs kann sich durch Einflussnahme einer Airline auf folgende Art und Weise ändern:

1. Anzahl der Sitzplätze und Umfang der Ausstattung

Die Anzahl der angebotenen Sitzplätze eines Flugzeugs sowie die Art und Umfang der Ausstattung bestimmen die Airlines im Hinblick auf ihr Geschäftsfeld und Kundenprofil selbst. Die Fachliteratur belegt, dass pro angebotenen Sitzplatz das OEW steigt, da für jeden Passagier neben dem Sitz noch weitere Ausrüstung vorgehalten werden muss wie Handgepäckfächer, Küchen, Toiletten, Schwimmwesten, Verpflegung etc.. Deswegen rechnen die Fluggesellschaften statt 100kg für einen Passagier inkl. Gepäck mit Werten zwischen 140 und 200 kg pro Passagier, je nach Airline und Streckenlänge²⁹. Dies bedeutet, dass im Mittel ca. 60 kg pro Passagier an zusätzlichem OEW anfallen, wenn die Airline einen Sitzplatz anbietet. Dieser Punkt unterscheidet die Airlines direkt voneinander, da diese gleiche Flugzeuge mit einer unterschiedlichen Anzahl von Sitzen ausstatten.

2. Art der Ausstattung

Zusätzlich kann es Unterschiede bei der Art und damit dem Gewicht der Ausstattung geben. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde das Potential an Treibstoffeinsparungen für verschiedene Ausrüstungsgewichte untersucht. Dafür wurden für verschiedene Distanzen (1000 km, 5000 km,

²⁹ Vgl. WIT et al. 2002, S. 30

10000 km) sowie verschiedene Flugzeugmodelle der Treibstoffverbrauch mit piano-x berechnet. Das Ergebnis ist in folgender Tabelle am Beispiel eines Airbus A340-600 dargestellt:

OEW reduzierende Maßnahme am A340-600	Gewichtersparnis der Maßnahme	Ø Treibstoffreduktion
Einbau leichter Economy – Sitze (Ersparnis 5 Kilo pro Sitz)	1.900 kg (bei 380 Economy – Sitzen)	1%
Einbau leichter Küchen	400 kg	0,2%
Einbau wassersparender Toiletten	200 kg	0,1%
Umrüstung auf papierloses Cockpit	bis 50 kg Einsparung	0,02%
Trinkflaschen aus leichterem Plastik, leichtere Plastiklöffel, papierlose Passagierkabine	ca. 150 kg	0,06%
Leichtere Hauptbildschirme	ca. 50 kg	0,02%
Gesamtersparnis	2.750kg	1,4%

Tabelle 16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse OEW am Beispiel eines A340-600

Nutzt eine Airline das in der Tabelle 16 dargestellte Einsparpotential von bis zu knapp drei Tonnen voll aus, könnte sie durch die zugrunde liegende Reduktion des OEW demnach insgesamt bis zu etwa 1,5% an Treibstoff einsparen. Aus einem Bericht einer Airline geht hervor, dass dort aber für genau dieses Flugzeug schon eine deutlich geringere Gewichtersparnis als Zielmarke formuliert wird³⁰. Die Gewichtersparnis durch leichtere Ausrüstungsgegenstände (in Tabelle 16 sind das ca. 7 kg je Sitz) ist um eine Größenordnung kleiner als der o.a. generelle Effekt, wonach mit jedem angebotenen Sitzplatz das OEW um ca. 60 kg steigt.

Die Reduktion bzw. die Vergrößerung des OEW um 60 kg je mehr oder weniger je angebotenen Sitz eines Flugzeugs berücksichtigt der AAI. OEW Änderungen durch leichtere Ausrüstung dagegen werden vernachlässigt.

Flugzeug: Operating Empty Weight	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	> 1%
Aufnahme in den AAI	Ja, über Sitzplatzkapazität

Tabelle 17: Zusammenfassung des Faktors OEW

4.10.7. Flugzeugalter und Wartung

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. Dem kann

³⁰ Virgin Atlantic, 2007

eine Airline durch gute Wartung entgegenwirken. Nach Angaben einer Airline kann regelmäßige Wartung der Flugzeugzelle bis zu 2% Treibstoffersparnis im Vergleich zum nicht gewarteten Zustand erbringen³¹.

Intervalle, Qualität und Umfang der Wartung ist aus Sicherheitsgründen streng geregelt (in der EU etwa durch VO 2042/2003³²). 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 Focus 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.

Der AAI geht deswegen davon aus, dass die realen Unterschiede zwischen den Airlines deutlich kleiner sind als die maximalen 2% bei der Zelle, die oben genannt sind. Daher wird das Alter eines gegebenen Flugzeugs im Unterschied zum Flugzeugtyp im AAI nicht betrachtet.

Flugzeug: Alter und Wartung	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja, aber auf Minimum beschränkt durch Gesetzgebung für Wartung
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	< 1%
Aufnahme in den AAI	Nein

Tabelle 18: Zusammenfassung des Faktors Alter & Wartung

4.11. Passagier- und Frachtauslastung

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 Kerosinverbrauch.

Die von den Fluggesellschaften erreichte Auslastung (Passagiere und Beiladefracht) hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von den Ticketpreisen, der Flugart und der Flugregion bei der Passagierauslastung, sowie den Preisen und Kapazitäten bei der Fracht. Bei der letzteren haben die Airlines die Möglichkeit, bei niedrigeren Passagierzahlen die Menge an transportierter Beiladefracht zu erhöhen.

³¹ LUFTHANSA 2002

³² VERORDNUNG (EG) Nr. 2042/2003 DER KOMMISSION

Die Auslastung ist der gewichtigste Faktor beim spezifischen Treibstoffverbrauch (siehe Kapitel 12, Faktoranalyse). Da zudem die Airlines die Auslastung vollständig kontrollieren und sich dabei unterscheiden, muss die Auslastung im AAI berücksichtigt werden.

Flugzeug: Auslastung Passagiere und Fracht	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja
Einfluss auf den Treibstoffverbrauch	Passagiere: ca. 30% – 60% Fracht: bis ca. 10%
Aufnahme in den AAI	Ja

Tabelle 19: Zusammenfassung des Faktors Auslastung

4.12. Weitere Schadstoffe neben CO₂

Neben CO₂ emittieren Flugzeugtriebwerke weitere Schadstoffe. Dazu gehören u.a. NO_x, Partikel, Schwefel, UHC und Wasserdampf. Alle haben direkte oder indirekte Klimawirkungen.

NO_x bewirkt eine Netto-Produktion von Ozon in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Der Zusammenhang ist direkt, d.h. je mehr NO_x emittiert wird, desto mehr O₃ bildet es. Da Ozon in diesen Atmosphärenschichten als Treibhausgas wirkt, werden die NO_x-Emissionen im AAI mittels eines Triebwerkfaktors berücksichtigt.

Partikel, Schwefel und Wasserdampf wirken sich u.a. auf die Wolkenbildung aus. Schwefel und Partikel haben zudem eine abkühlende Wirkung, da sie die eingehende Sonneneinstrahlung abschirmen. Die vom Flugverkehr induzierten Wolken (linienförmige Kondensstreifen und flächige Zirruswolken) haben insgesamt eine klimaerwärmende Wirkung³³. Daher müssten die ursächlichen Schadstoffe in den AAI mit einbezogen werden.

Die Prozesse bei der Wolkenbildung sind aber nicht nur komplex, sie hängen auch von einer Vielzahl von externen Parametern ab, wie Temperatur und Umgebungsluftfeuchte. Daher gibt es für diese Schadstoffe keine direkten Zusammenhänge zwischen Schadstoffausstoß und Strahlungsantrieb und damit Klimaerwärmung. Aus diesem Grund kann der AAI hier keinen Wirkungszusammenhang herstellen, in der Form: Je mehr Schadstoffe eine Airline verursacht, desto größer die Klimaerwärmung. Solch ein Zusammenhang ließe sich nur für die globale Summe über alle Fluggesellschaften herstellen.

Zusammengenommen haben diese nicht-CO₂-Schadstoffe eine erwärmende Wirkung auf das Klima. Eine Berücksichtigung im AAI erfordert, dass ein Faktor von den Airlines unterschiedlich gehandhabt werden kann. Auf diese anderen Schadstoffe kann zwar eine Airline einwirken (z.B. durch Triebwerkauswahl). Die Auswirkung dieser Maßnahme aber ist wegen des fehlenden direkten

³³ Vgl. LEE et al. 2009

Wirkungszusammenhangs zwischen Schadstoff und Klimaerwärmung auf der Ebene eines Fluges nicht nachweisbar. Daher bleiben die anderen Schadstoffe außer dem CO₂ und NO_x im AAI unberücksichtigt.

Flugzeug: andere Schadstoffe	
Beeinflussbar durch die Airline	Ja
Unterschiede möglich zwischen den Airlines	Ja, aber Klimawirkung nicht klar
Aufnahme in den AAI	Nein, nur NO _x über den Triebwerksfaktor

Tabelle 20: Zusammenfassung des Faktors weitere Schadstoffe

4.13. Zusammenfassung: Abgrenzung relevanter Einflussfaktoren

Im Folgenden sind alle Einflussfaktoren aufgelistet, die im AAI für das Ranking zu berücksichtigen sind. Der Einfluss jedes Einzelnen auf den Treibstoffverbrauch ist zusätzlich angegeben. Das Gewicht der Faktoren im AAI wird detailliert im Kapitel 12 diskutiert (Faktoranalyse)

Faktor	Einfluss auf den spezifischen Treibstoffverbrauch
Flugzeugtyp	>10%
Winglets	3 – 5%
Triebwerke (SFC und NO _x)	Über Triebwerksfaktor
Sitzplatzkapazität	ca. 5 – 40%
Frachtkapazität	bis ca. 10%
Passagierauslastung	ca. 30 – 60%
Frachtauslastung	bis ca. 10%

Tabelle 21: berücksichtigte Einflussfaktoren im AAI

Diese sieben Faktoren berücksichtigt der AAI bei der Bestimmung der CO₂ – Emissionen je Nutzlastkilometer. Wie der AAI bei der Berechnung dieser Faktoren vorgeht, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

5. Berechnung des CO₂ je Nutzlastkilometer auf einem CityPair

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen zur Berechnung von CO₂ je Nutzlastkilometer auf einem CityPair. Zu jedem der sieben Faktoren, die im vorigen Kapitel als relevant bestimmt wurden, wird der Ansatz und Aufbau der Methode ausgeführt, sowie die Datenquellen benannt. Eine detaillierte Beschreibung inkl. der Formeln folgt in Kapitel 8.

5.1. Ausgangsbasis ICAO-Methode

Die Methodik des AAI beruht in wesentlichen Teilen auf der CO₂ –Berechnungsmethode der ICAO³⁴. Die AAI Methode ist jedoch nicht nur weitaus detaillierter, sondern berücksichtigt zusätzliche Einflussfaktoren, die in ICAO fehlen. Die wesentlichen Verbesserungen des AAI im Vergleich zur ICAO – Methode sind:

- Aufnahme aller Flugzeugfamilien und Flugzeugmodelle
- Detaillierte Flugzeugtypen
- Einbeziehung der exakten Bestuhlung
- Dreimal höhere Auflösung bei der Flugdistanz
- Genaue Betrachtung der Beiladefracht
- Einbeziehung der Triebwerke
- Einbeziehung von Winglets

Im Folgenden wird beschrieben, wie der AAI aus den Einflussfaktoren das CO₂ je Nutzlastkilometer eines Fluges auf einem CityPair berechnet. Dabei wird auch das Gewicht des Faktors mitgeteilt, das besagt, wie stark dieser Faktor die globalen Effizienzpunkte einer Airline und damit ihren Platz im Ranking beeinflusst (Kapitel 12, Faktoranalyse). Diese Effizienzpunkte kann eine Airline auf einem CityPair erzielen (maximal 100, minimal 0, siehe Kapitel 6.2).

Zusätzlich angegeben ist die Genauigkeit der Berechnung der Effizienzpunkte. Diese Genauigkeit wird später ausführlich diskutiert (Kapitel 13, Fehleranalyse), in diesem Kapitel werden nur die Ergebnisse mitgeteilt. Angegeben sind für die Genauigkeit jeweils die Vertrauensgrenzen. Diese geben an, um wie viele Effizienzpunkte sich das wahre Ergebnis von dem im AAI berechneten unterscheiden kann. Die verwendeten Datenquellen werden in Kapitel 9, die genauen Berechnungsformeln im Kapitel 8 beschrieben.

³⁴ Vgl. ICAO Carbon Emissions Calculator (Version 3) 2010

5.2. Flugzeugtypen

Der AAI unterscheidet 107 Flugzeugtypen. Dazu gehören nicht nur die Flugzeugfamilien, sondern auch die einzelnen Modelle sowie deren Untervarianten. Weiterhin sind die größeren Turbopropellerflugzeuge sowie die Boeing Modelle mit/ohne Winglets detailliert enthalten. Damit decken die vom AAI erfassten Flugzeugtypen mehr als 95% der im Weltluftverkehr eingesetzten Flugzeugtypen ab.

Die Flotten der Fluggesellschaften sind im JP Airline Fleet detailliert enthalten. Der Treibstoffverbrauch bzw. die CO₂ - Emissionen der 107 Flugzeugtypen im AAI werden mit piano-x detailliert berechnet (Kapitel 5.9).

Erfassung der Flugzeugtypen im AAI	
Datenquellen	Piano-x, JP Fleet Airline (Kapitel 9)
Datenumfang	107 Flugzeugtypen
Datenreichweite	95% aller kommerziellen Flüge von Verkehrsflugzeugen weltweit
Datenformate	IATA & ICAO Codes, Klartexte (z.B.: „B767-400“)
Mittleres Gewicht im Ranking	31% (Kapitel 12)
Methode	<p>Detaillierte Erfassung der nutzlast- und distanzabhängigen Treibstoffverbräuche und Flugprofile bis auf die Untervariante eines Flugzeugtyps, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boeing 767-400ER • Airbus A320-200
Vertrauensgrenze	± 0,2 Effizienzpunkte (Kapitel 13.2.3)

Tabelle 22: Erfassung des Einflussfaktors Flugzeugtyp im AAI

5.3. Triebwerke

Der AAI unterscheidet Triebwerke mit einem so genannten Triebwerksfaktor. Dieser bildet die beiden zentralen Parameter spezifischer Treibstoffverbrauch (specific fuel consumption, SFC) und Ozonbildung bzw. Methanlebenszeitverkürzung durch NO_x-Emissionen ab. Der Triebwerksfaktor ist kleiner, gleich oder größer eins, je nachdem, ob das Triebwerk inkl. der NO_x -Korrektur im Vergleich zu anderen Triebwerken, die an einem Flugzeugtyp eingesetzt werden können, mehr oder weniger Treibstoff verbraucht.

Im JP Fleet Katalog sind die Flugzeugflotten der betrachteten Airlines inklusive der verwendeten Triebwerke enthalten. Ist das Triebwerk eines Flugzeuges bestimmt, berechnet der AAI den effektiven SFC und die NO_x-Korrektur.

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 (siehe Kapitel 8.1.4).
2. Korrektur des isolierten SFC mit dem Luftwiderstand des Triebwerks.
3. Korrektur des isolierten SFC mit dem Gewicht des Triebwerks.

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.

NO_x-Korrektur

NO_x hat 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 CO₂. Um die Effekte von NO_x über Ozon und Methan mit dem Effekt des SFC und damit CO₂ vergleichen zu können, benutzt der AAI näherungsweise absolute Global Warming Potentials (AGWPs) von CO₂, CH₄ und O₃. 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 Forschung³⁵.

Durch den langen Zeithorizont von 100 Jahren, auf dem nur das CO₂ wesentliches Gewicht behält, wird so der NO_x Korrekturfaktor klein und fällt i.d.R. nicht größer aus als der Gewichtskorrekturfaktor. Aus diesem Grunde ist es ausreichend genau, dass der AAI die NO_x – Ausstöße in g/kg Kerosin für die Schubeinstellungen Climbout der ICAO Engine Emission Database entnimmt³⁶.

Abdeckung

Der AAI beinhaltet 308 Triebwerke, darunter alle wichtigen Triebwerke der großen Hersteller. Somit können 97% aller Flüge im AAI triebwerksseitig detailliert erfasst werden. Die restlichen 3% verteilen sich auf zwei Gruppen:

1. Unbekannte Turboprop-Triebwerke (2,5% alle Flüge)

Die im AAI enthaltenen Turboprop-Flugzeuge werden triebwerksseitig wie beschrieben bestimmt. Es gibt aber auch Turboprop-Triebwerke, die zwar dem AAI über JP Airline Fleets bekannt, aber nicht in der ICAO-Datenbank enthalten sind. Für diese wird als

³⁵ Vgl. PEETERS, WILLIAMS 2009.

³⁶ Vgl. CAA (2010), ICAO Engine Emission Database (Stand 12/2010)

Triebwerksfaktor eins angesetzt. Der damit eingehende Fehler ist klein und wird in Kapitel 13.2.8 behandelt.

2. Triebwerke der Flugzeugtypen russischer Produktion (0,5% alle Flüge)

Die Triebwerke der russischen Flugzeugtypen (Illyushin, Tupolev) sind nicht in der ICAO Engine Emission Datenbank enthalten, wodurch sich kein Triebwerksfaktor für diese Triebwerke und somit für die zugehörigen Flüge ermitteln lässt. Dagegen sind die Triebwerke der Flugzeuge, die zeitgleich mit den russischen Modellen entwickelt und in Dienst gestellt wurden, im AAI enthalten. Für diese hat der AAI den Triebwerksfaktor bestimmt und bringt diesen auch für die russischen Modelle zur Anwendung. Dieses Vorgehen zieht einen Fehler mit sich, der im Kapitel 13.2.8 diskutiert wird

Erfassung der Triebwerke im AAI	
Datenquellen	JP Fleet Airline, ICAO Engine Emission Database
Datumumfang	308 Triebwerke
Datenreichweite	97% aller Triebwerke von Verkehrsflugzeugen weltweit
Erfassungsmethode	Detaillierte Erfassung aller Triebwerke, die die Airlines des AAI einsetzen inklusive ihrer NO _x – Ausstöße bei verschiedenen Schubeinstellungen, Umrechnung in einen Triebwerksfaktor <1, 1 oder >1.
Datenformat	Kürzel der Triebwerkshersteller sowie Klartexte
Mittleres Gewicht im Ranking	3% (Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	± 0,15 Effizienzpunkte (siehe Kapitel 13.2.7)

Tabelle 23: Erfassung des Faktors Triebwerk im AAI

5.4. Winglets

Der AAI unterscheidet nur bei Flugzeugen des Herstellers Boeing, die optional mit Winglets nachgerüstet werden können, nach Modellen mit Winglets und ohne, d.h. es sind im Sinne des AAI zwei verschiedene Flugzeugmodelle (z.B. B737-800 und B737-800 Winglets). Der JP Fleet Katalog liefert die Angabe, ob in der Flotte die entsprechende Boeing Maschine mit Winglets ausgerüstet ist oder nicht. Auch OAG macht Angaben, ob ein Modell auf einem bestimmten Flug mit oder ohne Winglets eingesetzt wird. Mit diesen Quellen ist es also möglich, für jede Airline und jeden einzelnen Flug auf einem CityPair mit einer Boeing festzulegen, ob das Flugzeug mit Winglets fliegt oder nicht.

Da es für Flugzeuge des Herstellers Airbus derzeit nicht die Möglichkeit gibt, optional Winglets nachzurüsten, müssen diese auch nicht gesondert berücksichtigt werden. Die bereits serienmäßig mit Winglets bestückten Airbus werden dagegen im AAI durch das Treibstoffberechnungsmodell piano-x detailliert erfasst, da piano-x diese intern hinterlegt hat.

Erfassung der Winglets im AAI	
Datenquellen	JP Fleet Airline, piano-x
Datenumfang	37 der 107 Flugzeugtypen mit Winglets
Datenreichweite	quasi 100% aller Verkehrsflugzeuge mit Winglets weltweit
Erfassungsmethode	Erfassung aller Flugzeuge mit Winglets innerhalb der Flotten der Airlines (alle Boeing und Airbus – Modelle)
Datenformat	ICAO & IATA Codes sowie Klartexte
Mittleres Gewicht im Ranking	2% (Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	$\pm 0,1$ Effizienzpunkte (Kapitel 13.2.9)

Tabelle 24: Erfassung des Faktors Winglets im AAI

5.5. Sitzplatzkapazität

Die Sitzplatzkapazität ist neben der Passagierauslastung die Grundlage für die Bestimmung der Passagiernutzlast. Je nach Kundensegment, welches eine Airline bedient, kann die Verteilung der Sitze innerhalb der Klassen zwischen den Airlines variieren. Die Anzahl der angebotenen Sitzplätze eines Fluges liefern bis zu drei Quellen (siehe Kapitel 9). Der Wert fließt in die Berechnung des AAI ein. Die Gesamtbestuhlung des Flugzeugs entspricht dabei 100% der Passagierkapazität eines Fluges. Der AAI unterscheidet nicht nach Sitzklassen. Diese fließen aber dennoch mit in die Berechnung des CO₂ je Nutzlastkilometer ein. Rüstet eine Airline ein Flugzeug von einer Einklassen- auf eine Mehrklassenbestuhlung um, nehmen die nun vorhandenen Business bzw. First Class Stühle mehr Raum ein, wodurch die Anzahl der insgesamt vorhandenen Sitzplätze auf Grund des limitierten Platz innerhalb der Flugzelle sinkt. Verschiedene Airlines, welche sich im Verhältnis der Sitze je Klasse zueinander (Anzahl Sitze in Economy zu Business zu First Class) sowie beim Abstand der Sitzreihen unterscheiden, werden daher im AAI automatisch über den Faktor Sitzplatzkapazität richtig erfasst. Der AAI ermittelt für jeden Flug der betrachteten Fluggesellschaften die Anzahl der insgesamt vorhandenen Sitzplätze. Diese Bestuhlung wird mit der Passagierauslastung des jeweiligen Fluges verrechnet, um die transportierte Anzahl an Passagieren zu bestimmen.

Erfassung der Sitzplatzkapazität im AAI	
Datenquellen	OAG, ICAO TFS, AirlineData T100I (siehe Kapitel 9)
Datumumfang	Alle Bestuhlungen einer Airline auf allen von ihr angebotenen Flügen und Flugzeugtypen
Datenreichweite	Ca. 92% aller von der IATA erfassten weltweiten Passagierflüge
Erfassungsmethode	Detaillierte Erfassung der Bestuhlung je Airline, CityPair, Flugzeugtyp und Flug.
Datenformat und Einheiten	Absolute Werte, dimensionslos
Mittleres Gewicht im Ranking	8% (Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	$\pm 0,6$ Effizienzpunkte (Kapitel 13.2.5)

Tabelle 25: Erfassung des Faktors Sitzplatzkapazität im AAI

5.6. Frachtkapazität

Viele Flugzeuge haben im Unterdeck Platz für Luftfracht. Prinzipiell ist die Kapazität für den Transport der Luftfracht in einem Flugzeugtyp begrenzt. Die Grenzen sind durch das Volumen des Frachtraums sowie dem MTOW des Flugzeugs gesetzt und hängen u.a. von zwei Parametern ab:

- Distanz: Je größer die zu fliegende Distanz, umso mehr Treibstoff muss getankt werden und umso weniger Nutzlastkapazität steht zur Verfügung.
- Passagiere: Je mehr Passagiere sich an Bord des Flugzeugs befinden, umso weniger Frachtkapazität steht zur Verfügung, bis das MTOW erreicht ist.

Die angebotene Frachtkapazität eines jeden Fluges entnimmt der AAI bis zu drei Datenquellen (siehe Kapitel 9). Im Gegensatz zu den angebotenen Sitzplätzen können die Angaben hierbei unvollständig oder unplausibel sein. Grund hierfür sind Datenlücken in den Quellen bei ca. 8% aller Flüge. Um diese Lücke zu schließen, kommt folgendes zweistufiges Verfahren zum Einsatz:

- Stufe 1: Die Frachtkapazität eines Fluges (charakterisiert durch Airline, CityPair sowie Flugzeug) berechnet der AAI aus den Angaben zur maximalen Nutzlast und er maximalen Passagierkapazität aus den Quellen ICAO TFS und AirlineDataT100I. Der AAI identifiziert dafür zuerst den jeweiligen Flug aus OAG in den beiden anderen Datenquellen. Anschließend leitet er aus den o.a. Kapazitätsangaben die verfügbare Frachtkapazität ab. Mit diesem Verfahren kann der AAI knapp die Hälfte der o.a. 8% Datenlücken schließen.
- Stufe 2: Die Frachtkapazität des jeweiligen Fluges wird näherungsweise bestimmt. Das ist nötig, wenn Airline und Flugzeugtyp des betrachteten Fluges aus OAG nicht einem Datensatz aus ICAO TFS oder AirlineData T100I zugeordnet werden können. In diesem Fall ermittelt der AAI für eine Airline die durchschnittliche Frachtkapazität je Flugzeugtyp auf allen anderen Flügen dieser Airline mit diesem Flugzeugtyp, für die die ICAO TFS und T100I

Daten zugeordnet werden konnten. Die restliche Hälfte der Datenlücken konnte auf dieser Stufe geschlossen werden.

Erfassung der Frachtkapazität im AAI	
Datenquellen	OAG, ICAO TFS, AirlineData T100I, IATA WATS
Datenumfang	Alle Frachtkapazitäten einer Airline auf allen von ihr angebotenen Flügen und Flugzeugtypen
Datenreichweite	Ca. 92% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Erfassungsmethode	Detaillierte Erfassung der angebotenen Frachtkapazität je Flug, wird einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.
Datenformat und Einheiten	Absolute Werte in der Einheit Kilogramm
Mittleres Gewicht im Ranking	4% (Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	± 0,1 Effizienzpunkte (Kapitel 13.2.6)

Tabelle 26: Erfassung des Faktors Frachtkapazität im AAI

5.7. Passagierauslastung

Die Passagierauslastung bestimmt wesentlich die Höhe der Nutzlast und somit den absoluten Treibstoffverbrauch eines Fluges. Jeder der im AAI enthaltenen Flüge besitzt eine individuelle Auslastung. Die Passagierauslastung (PLF, Passenger Load Factor) für alle Flüge unterteilt sich im AAI in vier Genauigkeitsstufen:

- Stufe 1: ein PLF je Airline je CityPair und je Flugzeugtyp (ICAO TFS und T100I)
- Stufe 2: ein PLF je Airline je CityPair (ICAO TFS und T100I)
- Stufe 3: ein PLF je Airline (je ein Wert national / international) (IATA WATS)
- Stufe 4: ein PLF je Airline (ATI, Air Transport Intelligence)

Die Auslastungsfaktoren selbst wurden den Datenquellen ICAO TFS, AirlineData T100I, IATA WATS und ATI entnommen. Für Flüge innerhalb der USA bzw. aus und in die USA wurden die PLF aus AirlineData priorisiert, da diese von allen Datenquellen die höchste Vollständigkeit aufweisen. Für alle anderen Flüge wurde ICAO TFS als führende Datenquelle herangezogen. Die Ermittlung der PLF folgte dabei einem Verfahren, in dem die Stufe zwei greift, falls Daten der Stufe eins nicht vorhanden sind, etc.. Der hierbei entstehende Fehler wird in Kapitel 13.2.10 diskutiert.

Für alle nicht in AirlineData und ICAO erfassten Flüge wurden die Passagierauslastungen von IATA WATS zur Rate gezogen (Stufe 3). Dabei wurde zwischen Inlandsflügen sowie Internationalen Flügen unterschieden, da WATS diese Daten separat erhebt. Auf der letzten Stufe verwendet der AAI Werte aus er Quelle ATI, die ebenfalls einen Load Factor je Airline enthält.

Für etwas weniger als 5% aller Flüge ließen sich keine PLF ermitteln, die damit im AAI entfallen. Dies hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse und wird später bei der Fehlerrechnung (Kapitel 13.2.1) diskutiert.

Erfassung der Passagierauslastung im AAI	
Datenquellen	ICAO TFS, AirlineData T100I, IATA WATS
Datenumfang	Auslastungsfaktoren auf drei verschiedenen Genauigkeitsstufen
Datenreichweite	Ca. 87% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Erfassungsmethode	Je nach Quelle Erfassung der Passagierauslastung auf der Ebene Airline / CityPair / Flugzeugtyp.
Datenformat und Einheiten	Absolute Werte (vergleichbar mit den Kapazitäten) und relative Werte (in Prozent).
Mittleres Gewicht im Ranking	48% (siehe Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	$\pm 0,7$ Effizienzpunkte (siehe Kapitel 13.2.10)

Tabelle 27: Erfassung des Faktors Passagierauslastung im AAI

5.8. Frachtauslastungen

Die tatsächlich transportierte Nutzlast hängt neben den Passagieren auch von der Frachtauslastung ab. Luftfracht sind Güter sowie Post. Die Auslastungsfaktoren für Fracht im Airline Index stammen aus denselben Quellen wie die Passagierauslastungen: AirlineData T100I, ICAO TFS, IATA WATS. Die letztere Quelle unterscheidet bei den CLF zwischen Inlandsflügen und internationalen Flügen. Die Genauigkeitsstufen sind identisch mit denen des PLF:

- Stufe 1: ein CLF je Airline je CityPair und je Flugzeugtyp (ICAO TFS und T100I)
- Stufe 2: ein CLF je Airline je CityPair (ICAO TFS und T100I)
- Stufe 3: ein CLF je Airline (je ein Wert national / international) (IATA WATS)

Bei weniger als 9% aller Flüge fehlte der CLF in den Datenquellen. Hier wendet der AAI folgendes Verfahren an:

1. Bei Frachtkapazität Null: keine Beiladefracht, d.h. der AAI rechnet hier automatisch mit 0 kg Beiladefracht (2% aller Flüge im AAI).
2. Bei Frachtkapazität größer Null: Dieser Flug gelangt nicht in den AAI (7% der Flüge). Der hierbei entstehende Fehler ist klein und wird in Kapitel 13.2.10 diskutiert.

Erfassung der Frachtauslastung im AAI	
Datenquelle	IATA WATS, ICAO TFS und AirlineData T100I
Datenumfang	Auslastungsfaktoren auf drei verschiedenen Genauigkeitsstufen
Datenreichweite	Ca. 85% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Erfassungsmethode	Erfassung der Frachtauslastung auf Ebene der Airline, CityPair und Flugzeugtyp
Datenformat und Einheiten	Absolute Werte (vergleichbar mit den Kapazitäten) und relative Werte (in Prozent).
Mittleres Gewicht im Ranking	4% (siehe Kapitel 12)
Vertrauensgrenze	± 0,8 Effizienzpunkte (siehe Kapitel 13.2.10)

Tabelle 28: Erfassung des Faktors Frachtauslastung im AAI

5.9. Flugprofile & Distanz, Kombination mit Flugzeugtypen zu Einzelflügen

Das Flugprofil bestimmt den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs insofern, als dass die treibstoffintensive Phase des Steigfluges bei kurzen Strecken mehr ins Gewicht fällt als bei mittleren oder langen Strecken. Daher bewirkt das Flugprofil, dass das CO₂ je Nutzlastkilometer auf Kurzstreckenflügen bei ansonsten gleichen Parametern (Flugzeug, Sitzplatzkapazität usw.) höher ist als bei Mittelstreckenflügen (vgl. Kapitel 4.2). Das Flugprofil ist abhängig vom eingesetzten Flugzeugtyp und wird daher vom AAI über diesen abgebildet. Somit ist eine detaillierte Treibstoffberechnung für jeden Flugzeugtyp nötig.

Die Berechnung wird mittels des Programms piano-x durchgeführt (Kapitel 9.1). Dieses Programm berücksichtigt bei der Treibstoffberechnung das spezifische Flugprofil jedes Flugzeugstyps (Steigflug, Steigfluggeschwindigkeit usw.) auf einer vorgebbaren Distanz. Der AAI erzeugt mittels piano-x genaue Treibstoff- und damit CO₂-Ergebnisse für eine Reihe von Einzelflügen. Zur Erstellung dieser Einzelflüge variiert der AAI alle 107 Flugzeuge mit bis zu 29 Distanzen, abhängig von der maximalen Reichweite des Flugzeugtyps.

Abstände der Einzelflüge in km	Distanzen der Einzelflüge in km
250	0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750, 3000
500	3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000
1000	8000, 9000, 10000, 11000, 12000, 13000, 14000, 15000, 16000

Tabelle 29: Distanzen der Einzelflüge des AAI

Nicht jedes Flugzeug kann alle Distanzen zurücklegen. Bestimmt man aus den 107 Flugzeugtypen sowie den 29 möglichen Distanzen die möglichen Flugzeug – Distanz Paare, liefert der AAI 1745

mögliche Flugzeugtyp – Distanz Paare. Für jedes einzelne kann der AAI die anderen sechs Einflussfaktoren folgendermaßen variieren:

- Maximale Sitzplatzkapazität sowie vom Hersteller empfohlene Standardsitzplatzkapazität je Flugzeugtyp
- Maximale und durchschnittliche Frachtkapazität
- Passagiere: Auslastungen von 20% und 100%
- Beiladefracht: Auslastungen von 20% und 100%
- Flugzeug mit Winglets ausgerüstet / nicht mit Winglets ausgerüstet

Somit ergeben sich insgesamt knapp 3400 verschiedene Einzelflüge, die sich durch alle möglichen Kombinationen der o.a. Parameter unterscheiden. Für jeden dieser Einzelflüge bestimmt der AAI den Treibstoffverbrauch mit piano-x. In den Treibstoffverbrauch auf den Einzelflügen fließt später noch der Triebwerksfaktor ein. Den Treibstoffverbrauch des jeweiligen Fluges interpoliert der AAI linear aus den Einzelflügen (siehe Kapitel 8.1.2). Der hierbei entstehende Fehler ist nahezu Null (Kapitel 13.2.3).

Erfassung der Flugprofile und Distanzen, Kombination mit Flugzeugtypen zu Einzelflügen im AAI	
Datenquellen	Piano-x, sowie Quellen für Sitzplatz und Frachtkapazitäten
Datenumfang	3390 Einzelflüge
Erfassungsmethode	Berechnung des Treibstoffverbrauchs eines einzelnen Fluges mit festgelegten Parametern Distanz, Flugzeugtyp etc. über piano-x.
Datenformat und Einheiten	Kilogramm Kerosin und Kilometer
Mittleres Gewicht im Ranking	Nicht anwendbar, da jeweils über die Faktoren Flugzeugtyp, Kapazitäten etc. bereits enthalten
Genauigkeit	± 0,05 Effizienzpunkte durch Interpolation

Tabelle 30: Erfassung der Faktoren Flugprofil und Distanz im AAI

Die nachstehende Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Flüge im AAI, verteilt über die verschiedenen Distanzklassen.

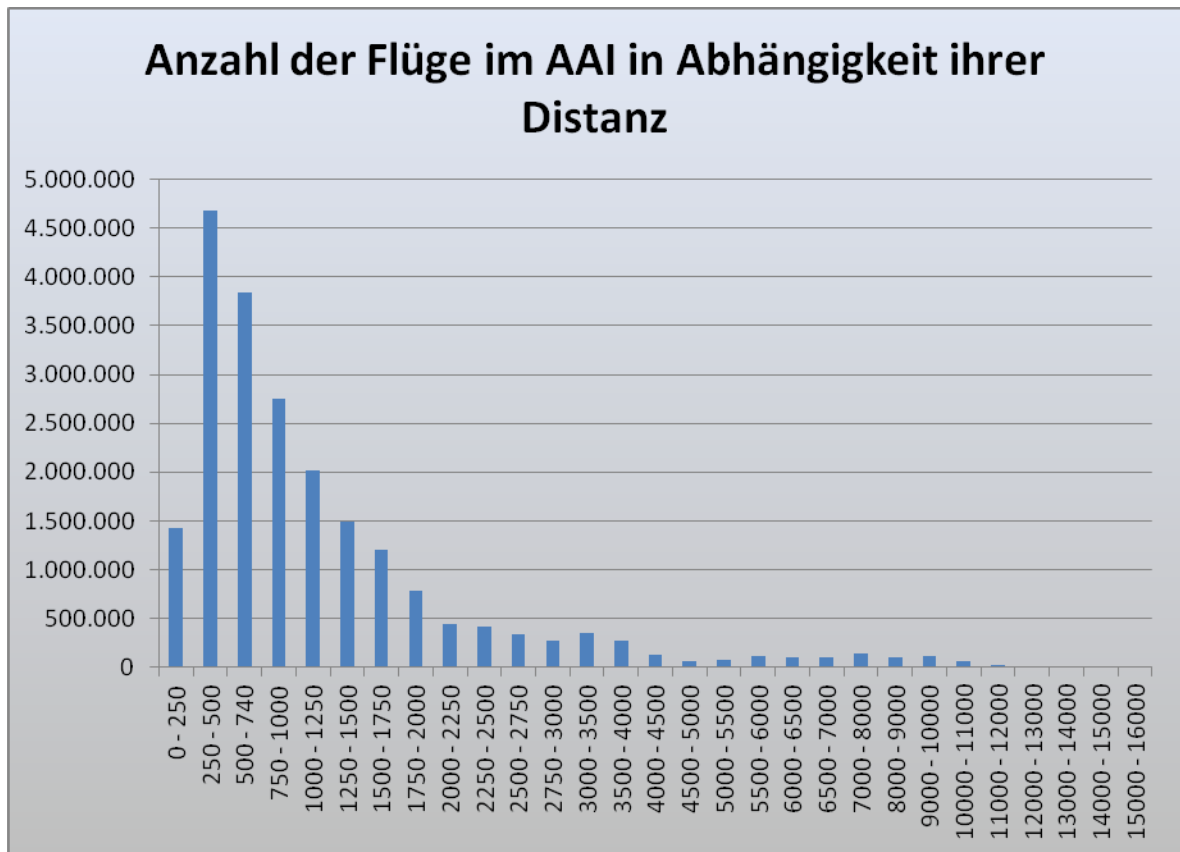


Abbildung 2: Anzahl Flüge in Abhängigkeit von ihrer Distanz (km)

5.10. Die Ergebnisse des Kapitels im Überblick

Die diskutierten Faktoren erlauben die Bestimmung des CO₂ je Nutzlastkilometer für jeden Flug im AAI. Die Methoden und Datenquellen dazu sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Faktor	Datenquelle	Datenumfang	Erfassungsmethode	Gewicht im Ranking	Datenreichweite
Flugzeugtyp	OAG, JP Fleet Airlines, piano-x	107 Flugzeugtypen	Detaillierte Erfassung der Nutzlast- und distanzabhängigen Treibstoffverbräuche und Flugprofile bis auf Untervariante eines Flugzeugtyps	31%	95% aller kommerziellen Flüge von Verkehrsflugzeugen weltweit
Triebwerk	JP Fleet Airline, ICAO Engine Emission Database	308 Triebwerke	Detaillierte Erfassung aller Triebwerke, die die Airlines des AAI einsetzen inklusive ihrer NO _x – Ausstöße bei verschiedenen Schubeinstellungen, Umrechnung in einen Triebwerksfaktor <1, 1 oder >1.	3%	97% aller Triebwerke von Verkehrsflugzeugen weltweit
Winglets	JP Fleet Airline, piano-x	Alle Flugzeugtypen mit nachrüstbaren Winglets	Erfassung aller Boeing Flugzeuge mit optional nachrüstbaren Winglets innerhalb der Flotten der Airlines	2%	quasi 100% aller Verkehrsflugzeuge mit Winglets weltweit
Sitzplatzkapazität	OAG, ICAO TFS, AirlineData T100I	Angebotene Sitzplätze je Flug	Detaillierte Erfassung der Bestuhlung je Airline, City-Pair, Flugzeugtyp und Flug.	8%	Ca. 92% aller von der IATA erfassten weltweiten Passagierflüge
Frachtkapazität	OAG, ICAO TFS, AirlineData T100I, IATA WATS	Angebotene Frachtkapazität je Flug	Detaillierte Erfassung der angebotenen Frachtkapazität je Flug, wird einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.	4%	Ca. 92% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Passagierauslastung	IATA WATS, ICAO TFS und AirlineData T100I	Auslastungsfaktoren auf drei verschiedenen Genauigkeitsstufen	Erfassung der Passagierauslastung auf Ebene der Airline und/ oder des CityPairs und/oder des Flugzeugtyps	48%	Ca. 87% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Frachtauslastung	IATA WATS, ICAO TFS und AirlineData T100I	Auslastungsfaktoren auf drei verschiedenen Genauigkeitsstufen	Erfassung der Frachtauslastung auf Ebene der Airline, CityPair und Flugzeugtyp	4%	Ca. 85% aller von der IATA erfassten weltweiten Flüge
Flugprofil & Distanz	Vom AAI berechnet	3390 Einzelflüge	Berechnung des Treibstoffverbrauchs eines einzelnen Fluges mit festgelegten Parametern Distanz, Flugzeugtyp etc. über piano-x.	n.a.	Über die sieben Einflussfaktoren

Tabelle 31: Zusammenfassung, Berechnung von CO₂ pro Nutzlastkilometer

6. Vom CO₂ je Nutzlastkilometer zu CityPair Effizienzpunkten

In Kapitel 5 wurde die Methode beschrieben, mit der der AAI CO₂ in Kilogramm je Nutzlastkilometer berechnet. Der nächste Schritt ist nun, diese Werte einzuordnen und vergleichbar zu machen. Dazu wird mit dem Best- und WorstCase ein neutraler Maßstab eingeführt, der unabhängig von den Airlines ist. Als Ergebnis dieses Schrittes rechnet der AAI für jeden Flug einer Airline das CO₂ je Nutzlastkilometer in Effizienzpunkte auf einem CityPair um.

Dieser Ansatz erlaubt es, Airlines zu vergleichen, die auf verschiedenen Distanzen fliegen, da jede Airline auf einem CityPair ihre Punkte nach absoluten Maßstäben und unabhängig von anderen Airlines erhält. Gleichzeitig erlaubt es dieser Ansatz, auch Flüge von Airlines zu werten, die ohne Konkurrenz allein ein CityPair bedienen.

6.1. BestCase & WorstCase

Um die Klimateffizienz der Fluggesellschaften zu bewerten, führt der AAI auf jedem CityPair einen theoretischen Best- bzw. WorstCase ein. Der Best- bzw. WorstCase entspricht dem mit heutigem Material möglichen effizientesten bzw. ineffizientesten Flug auf dem betrachteten CityPair, bezogen auf die CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer. Beide Werte sind also Emissionen je Nutzlastkilometer für ein bestimmtes CityPair. Die CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer einer Airline auf diesem CityPair werden mit diesen beiden Werten verglichen, unter Einbeziehung des Triebwerkfaktors.

BestCase

Für die Ermittlung des BestCase auf einem bestimmten CityPair berechnet der AAI das CO₂ pro Nutzlastkilometer für alle im AAI vorkommenden Flugzeuge unter folgenden Annahmen:

1. Flugdistanz des CityPairs.
2. Maximale Bestuhlung, Sitzklassen nach ICAO Methode (all Economy).
3. Volle Passagierauslastung (100%).
4. Wenn dann zusätzliche Frachtkapazität möglich ist, wird diese ebenfalls voll ausgelastet.
5. Effizientestes Triebwerk (geringster SFC und NO_x – Ausstoß) für das jeweilige Flugzeugmodell.

Der Flugzeugtyp, der bei diesem Vergleich die geringsten CO₂-Emissionen pro Nutzlast aufweist, definiert mit seinem Wert von CO₂ je Nutzlastkilometer den BestCase.

Der BestCase ist damit ein Best Practice Maßstab, anhand dessen sich die Performance einer Airline immer messen lässt. Er entwickelt sich mit neuen Flugzeugtypen, die auf den Markt kommen weiter und setzt so die „Meßlatte“ immer höher, ohne dabei Technologie vorzugeben, die es noch nicht gibt.

WorstCase

300% des BestCase (CO₂ pro Nutzlastkilometer) bilden den WorstCase. Insgesamt liegen durch die Definition des WorstCase auf 300% des BestCase gut 98% aller Flüge im AAI zwischen BestCase und WorstCase. Die übrigen 2%, die bei einem Flug unter dem WorstCase liegen, erhalten dafür negative Effizienzpunkte (siehe unten). Streng genommen ist die Festlegung auf einen Wert wie 300% aber gar nicht nötig, da sich das Ranking nach CityPair-Effizienzpunkte (siehe unten) nicht anders ergäbe, wenn für den WorstCase mit z.B. 200% oder 150% ein anderer Wert gewählt würde. In diesen Fällen würden einfach nur mehr Flüge, die mit ihren Verbrauchswerten schlechter als der WorstCase liegen, negative Punkte erhalten. Diese ergäben aber in der Gesamtwertung (Kapitel 7) über alle CityPairs einer Airline wieder das gleiche Endergebnis in der Abfolge der Airlines.

6.2. CityPair Effizienzpunkte

Der AAI vergibt CityPair Effizienzpunkte je Airline und je CityPair. Hierbei vergleicht er die berechneten CO₂-Emissionen je Nutzlastkilometer einer Airline mit dem BestCase und WorstCase des CityPairs. Da eine Airline mehrere Flugzeugtypen auf einem CityPair einsetzen kann, werden im ersten Schritt alle CO₂ - Emissionen je Nutzlastkilometer einer Airline auf einem CityPair ermittelt und gewichtet gemittelt zu einem Wert zusammengefasst.

Dann gleicht der AAI diesen Wert linear mit dem BestCase und WorstCase ab und bezieht dabei noch den Triebwerksfaktor mit ein. Der BestCase entspricht dabei 100 CityPair Effizienzpunkten, der WorstCase Null CityPair Punkten. Die Fluggesellschaften erhalten somit auf jedem CityPair, auf dem sie fliegen, zwischen 0 und 100 CityPair Punkten.

In knapp 2% aller Flüge, bei denen die CO₂-Emissionen je Nutzlastkilometer schlechter als der WorstCase liegen, erhält die Airline für dieses CityPair eine entsprechende Anzahl negativer Effizienzpunkte, die im Gesamtranking dieser Airline über alle CityPairs mit verrechnet werden.

7. Vom CityPair zu globalen Effizienzpunkten für alle Airlines

Für das globale Ranking mittelt der AAI die Effizienzpunkte, die eine Fluggesellschaft auf den von ihr bedienten CityPairs erreicht zu globalen Effizienzpunkten, gewichtet mit den Nutzlastkilometern auf den CityPairs der Airline. Die globalen Effizienzpunkte bewegen sich damit automatisch auch im Rahmen von 0 bis 100 Punkten. Negative Punktzahlen auf einzelnen CityPairs, in denen eine Airline höhere Emissionen als den WorstCase aufweist, gehen eins zu eins in den Mittelwert über alle CityPairs mit ein (Kapitel 6.2). 100 globale Effizienzpunkte entsprechen der maximal erreichbaren Klimateffizienz. Dies bedeutet, dass eine Airline, welche die 100 Punkte erreicht, u.a. immer die bestmöglichen Flugzeuge eingesetzt, diese voll bestuhlt und ausgelastet hat. Die globalen Effizienzpunkte sind absolute Punkte. Sie beinhalten und transportieren alle Faktoren, die in den vorigen Kapiteln genannt wurden (z.B. Flugzeugtyp, Winglets, Triebwerke, vgl. Kapitel 5).

Bei der Berechnung der Gesamteffizienzpunkte werden die CityPair-Effizienzpunkte auf einem CityPair mit den Nutzlastkilometern gewichtet. Dies ist deswegen nötig, weil CO₂ immer pro Nutzlastkilometer entsteht und damit auf langen Flügen mehr als auf kurzen Flügen, was aus Klimasicht relevant ist. Dies bedeutet, dass bei einer Airline mit vielen Langstreckenflügen diese stärker ins Gewicht fallen, wobei das Gewicht in beide Richtungen wirkt: Wenn die Fluggesellschaft auf der Langstrecke besser ist als auf der Kurzstrecke, wird sie sich stark verbessern, umgekehrt aber auch stark verschlechtern. Die Gewichtung nach Nutzlastkilometern ist wettbewerbsneutral: Jede Fluggesellschaft, die ihre CityPairs effizient befliegt, kann das Ranking gewinnen, egal, ob sie nur auf der Langstrecke oder nur auf der Kurzstrecke fliegt.

Teil II

Die Methode des Airline Index im Detail

8. Die Berechnungen Schritt für Schritt

8.1. CO₂-Emissionen eines Fluges im AAI

8.1.1. Überblick

Aus allen möglichen Kombinationen der für den Treibstoffverbrauch relevanten Flugparameter (Flugzeugtyp, Flugdistanz und Nutzlast) erstellt der AAI ein engmaschiges Set an Einzelflügen, für die er den absoluten Treibstoffverbrauch ermittelt (Kapitel 8.1.2). Für einen tatsächlichen Flug einer Airline, für den der AAI das CO₂ pro Nutzlastkilometer berechnet, identifiziert der AAI Einzelflüge, deren Flugparameter möglichst dicht bei denen des tatsächlichen Fluges liegen und erhält den absoluten Treibstoffverbrauch des betrachteten Fluges durch Interpolation. Unter Einbeziehung der transportierten Nutzlast, der Flugdistanz und des Triebwerkfaktors ermittelt der AAI das CO₂ pro Nutzlastkilometer auf dem betrachteten Flug.

Dabei geht der AAI wie folgt vor:

1. Mit der Betrachtung eines bestimmten Fluges ist zunächst das beflogene CityPair und damit die Flugdistanz festgelegt.
2. Der AAI ermittelt den genauen Flugzeugtyp (inkl. Triebwerkstyp und Winglets), mit dem der Flug durchgeführt wurde.
3. Aus der Sitzplatzkapazität, der Frachtkapazität, der Passagierauslastung und der Frachtauslastung bestimmt der AAI die transportierte Nutzlast des Fluges sowie eine Korrektur des Flugzeugleergewichts (OEW) (Kapitel 8.1.3).
4. Den so ermittelten Parametern Flugzeugtyp, Flugdistanz und Nutzlast des betrachteten Fluges können die absoluten Treibstoffverbräuche von vier Einzelflügen zugeordnet werden (zwei Paare von Flugdistanzen und Nutzlasten), die denjenigen des Fluges umgeben (Kapitel 8.1.5).
5. Aus diesen vier Werten interpoliert der AAI den genauen absoluten Treibstoffverbrauch des betrachteten Fluges (Kapitel 8.1.5).
6. Zusätzlich bezieht der AAI das Triebwerk und dessen Triebwerksfaktor als Korrekturfaktor für diesen Flug mit ein (Kapitel 8.1.4).
7. Das CO₂ pro Nutzlastkilometer berechnet der AAI durch das Verhältnis des absoluten Treibstoffverbrauchs zu Nutzlast und Flugdistanz (Kapitel 8.1.5).

8.1.2. Treibstoffverbrauch von Einzelflügen

Der Kerosinverbrauch eines Fluges im AAI wird aus den detailliert berechneten Verbräuchen der Einzelflüge ermittelt. Den Treibstoffverbrauch jedes Einzelfluges bestimmt der AAI mit dem

Berechnungsprogramm piano-x. Dabei kommen folgende Variationen der Parameter zum Einsatz, die insgesamt in 3.248 Einzelflügen resultieren:

- 107 Flugzeugtypen; Flugzeuge mit Winglets sind extra ausgewiesen
- 29 Einzelflughdistanzen (je nach Reichweite des Flugzeugtyps ggf. weniger, siehe Kapitel 5.9)
- 2 Nutzlasten, die sich aus realistischen Annahmen ergeben und die Spannweite möglichst gut abdecken:
 - Hohe Nutzlast: Berechnet aus Standardangaben zur Sitzplatzkapazität (in piano-x voreingestellt) in Kombination mit 100% Passagierauslastung.
 - Geringe Nutzlast: Berechnet aus Standardangaben zur Sitzplatzkapazität (in piano-x voreingestellt) in Kombination mit 20% Passagierauslastung

Das Gewichtäquivalent eines Passagiers beträgt hierbei 100 kg, was dem Gewicht eines Menschen zuzüglich Gepäck entspricht. Dies ist ein international von der Flugindustrie verwendeter Wert³⁷.

Aus der Kombination dieser Parameter berechnet der AAI den absoluten Kerosinverbrauch eines Einzelfluges F_{EF} mithilfe von piano-x. Durch die engmaschige Wahl der Flugdistanzen für die Einzelflüge kann der Fehler, der bei der linearen Interpolation entsteht, vernachlässigt werden (Kapitel 13). Für die lineare Interpolation auf die Nutzlast sind die zwei obigen Nutzlasten für die Einzelflüge ausreichend, da der absolute Treibstoffverbrauch innerhalb der möglichen Nutzlastspanne näherungsweise linear vom Flugzeuggewicht abhängt.

8.1.3. Die Berechnung der Nutzlast, OEW-Korrektur

Die Nutzlast (Payload) eines Fluges P_{FL} setzt sich aus der Masse der beförderten Passagiere P_{PAX} sowie der Masse der mitgeführten Beiladefracht P_{Cargo} zusammen:

$$P_{FL} = P_{PAX} + P_{Cargo}$$

Das Gewichtäquivalent eines Passagiers beträgt 100 kg (siehe 8.1.2). Die tatsächliche Passagierauslastung des Fluges (PLF, passenger load factor) zusammen mit dem Gewichtäquivalent eines Passagiers sowie der Anzahl der angebotenen Sitze (C_{PAX}) des Fluges ergibt die Masse der transportierten Passagiere.

$$P_{PAX} = C_{PAX} * 100 \text{ kg} * PLF$$

³⁷ Wit et al., 2002

Die Beiladefrachtkapazität C_{CARGO} im AAI berechnet sich als

$$C_{\text{CARGO}} = C_t - C_{\text{PAX}}$$

wobei C_t für maximale Nutzlastkapazität steht. Mit der Frachtauslastung des Fluges (CLF, cargo load factor) ergibt die Frachtkapazität C_{CARGO} die Menge an Beiladefracht.

$$P_{\text{CARGO}} = C_{\text{CARGO}} * \text{CLF}$$

OEW-Korrektur

Weicht die ermittelte Sitzplatzkapazität auf dem Flug von der bei piano-x voreingestellten Standardbestuhlung ab, geht der AAI davon aus, dass sich damit auch das entsprechende Leergewicht des Flugzeugs (Operating Empty Weight, OEW) ändert. Wie in Kapitel 4.10.6 diskutiert veranschlagt der AAI in diesem Falle eine OEW-Änderung von 60 kg je Sitzplatz. Für die anschließende Berechnung des absoluten Treibstoffverbrauchs auf dem betrachteten Flug (Kapitel 8.1.5) korrigiert der AAI daher die Nutzlast um das Gewichtsäquivalent der zusätzlichen bzw. fehlenden Sitze.³⁸ Bei der Berechnung der CO₂ pro Nutzlastkilometer (Kapitel 8.1.6) wird wiederum lediglich die tatsächliche Nutzlast (Passagiere und Beiladefracht) berücksichtigt.

8.1.4. Der Triebwerksfaktor

Der Triebwerksfaktor besteht aus verschiedenen Komponenten:

1. SFC des isolierten Triebwerks
2. SFC-Korrektur durch Luftwiderstand
3. SFC-Korrektur durch Gewicht des Triebwerks
4. Korrekturfaktor der CO₂-Wirkung des SFC über NO_x Emissionen und nachfolgend O₃ und CH₄ Effekte

Für die Berechnung des Triebwerksfaktors wird zunächst der SFC-Faktor des isolierten Triebwerks berechnet (Schritt 1). Dieser wird dann in den Schritten 2-4 um Luftwiderstand, Gewicht und NO_x – Emissionen korrigiert. Das Endergebnis ist der Triebwerksfaktor, ein SFC-Korrekturfaktor, der über piano-x in die Berechnung des Treibstoffverbrauchs eingeht.

³⁸ Dieser Schritt ist äquivalent mit einer direkten Änderung des OEW in piano-x, bietet jedoch recheninterne Vorteile und ist übersichtlicher.

1. SFC des isolierten Triebwerks

Der SFC des isolierten Triebwerks hängt zunächst von der Konstruktion des Triebwerks selbst ab und dabei von seinen thermodynamischen Kreisprozessdaten, Nebenstromverhältnis und Brennkammerkonzept etc.³⁹ Dazu kommen im Flug noch die Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Geschwindigkeit. Diese Faktoren sind vollständig und detailliert über alle Flugzustände (Start, ClimbOut, Cruise etc.) in piano-x mit einem repräsentativem Triebwerk für jeden Flugzeugtyp und jede Distanz abgebildet. Dennoch ist hier die Schwankung zwischen unterschiedlichen Triebwerken nicht berücksichtigt, die vor allem bei älteren Flugzeugen und Triebwerken groß sein kann.

Deswegen berechnet der AAI für den SFC des isolierten Triebwerks einen dimensionslosen SFC-Korrekturfaktor, der Werte >1 für Triebwerke mit hohem SFC und <1 für Triebwerke mit geringem SFC annimmt. Dieser Faktor kann in piano-x eingegeben werden und lässt dann über den gesamten Flug mit allen Phasen die relative Qualität des Triebwerks mit einfließen. Wir werden sehen, dass in der Praxis die Unterschiede zwischen modernen Flugzeug-Triebwerkskombinationen vernachlässigbar klein sind, bei älterem Material aber durchaus zum Tragen kommen können.

Zur Ermittlung des SFC-Faktors bildet der AAI im ersten Schritt die SFCs aus der ICAO Datenbank bei 85% Schub und dazugehörigem FuelFlow und rechnet diese nach der Boeing Fuel Flow Method 2 in SFC im Reiseflug um⁴⁰. Dabei verwendet der AAI die Angaben für Reiseflughöhe und Geschwindigkeit aus piano-x für den jeweiligen Flugzeugtyp und Distanz und entnimmt die entsprechenden Werte für Druck und Temperatur der von der ICAO definierten ISA Standardatmosphäre. Dieses Vorgehen ist nicht präzise genug, um den absoluten SFC berechnen zu können, oder den momentanen FuelFlow. Dies liegt daran, dass jedes Triebwerk bei einer ihm eigenen optimalen Fluggeschwindigkeit den optimalen SFC erzielt, und zudem der hier verwendete Schub von 85% nicht während des ganzen Fluges gilt. Dem AAI geht es aber nicht darum, den absoluten Treibstoffverbrauch zu ermitteln (das tut schon piano-x), sondern nur die Unterschiede zwischen Triebwerken per Faktor einfließen zu lassen. Dafür reicht der Ansatz der Boeing Fuel Flow Method 2 und die Datenbasis ICAO Triebwerksdatenbank aus.

Diesen Schritt wiederholt der AAI mit jedem Flugzeugtyp auf allen Einzelflughöhen und mit allen zu dem jeweiligen Flugzeugtyp in Frage kommenden Triebwerken. Bei einer Detailanalyse untersuchte der AAI 73 Flugzeugtypen, die in der Praxis in Kombinationen mit bis zu 10 verschiedenen Triebwerken auftraten. Dabei zeigte sich, dass bei 50 Flugzeugtypen die so berechneten SFC-Unterschiede zwischen den Triebwerken bei maximal 3% lagen, in der Regel aber bei $<1\%$. Bei weiteren 18 Flugzeugtypen (inkl. der älteren B737 200-500, B747-100 und B757) lag der SFC-Unterschied bei bis zu 10%. Nur bei fünf älteren Flugzeugtypen (u.a. B727 und DC9) traten Extremwerte von über 10% Abweichung auf.

³⁹ Vgl. GMELIN 2008

⁴⁰ Vgl. BAUGHUM et al. 1996, Appendix D

2. SFC Korrektur durch den Luftwiderstand des Triebwerks

Höhere Bypassverhältnisse haben in der Vergangenheit den SFC von Turbofantriebwerken erheblich gesenkt. Als unerwünschter Nebeneffekt steigt mit dem Bypass Verhältnis aber auch der Durchmesser des Triebwerks und damit sein Luftwiderstand. Dieser Effekt mindert den Gewinn beim SFC durch höhere Bypassverhältnisse. Im AAI wird dieser Effekt dadurch abgebildet, dass die Erhöhung des Luftwiderstandes als Faktor über piano-x in die Treibstoffberechnung eingeht. Dazu wird mit piano-x die Veränderung des Anteils am Gesamtwiderstand bestimmt, die die Vergrößerung des eingesetzten Triebwerks gegenüber dem mittleren Triebwerk bewirkt. Dazu wird näherungsweise über den Durchmesser des Triebwerks nur die Stirnfläche des Triebwerks herangezogen, nicht aber die Außenhaut und die Einbettung des Triebwerks in die Gondel, die vernachlässigt werden. Dies ist als einfache Näherung ausreichend⁴¹. Diesen Schritt vollzieht der AAI wiederum bei allen Flugzeug-Triebwerkskombinationen und Distanzen. Die Werte der Triebwerksdurchmesser entnimmt der AAI einschlägigen Industrie-Verzeichnissen⁴².

3. SFC Korrektur durch das Gewicht des Triebwerks

Höhere Bypassverhältnisse erhöhen auch das Gewicht eines Triebwerks. Dies geht beim AAI direkt über eine Erhöhung des OEW gegenüber dem Standard OEW ein, das in piano-x bereits hinterlegt ist. So wird der Gewichtsnachteil detailliert abgebildet. Auch diesen Schritt vollzieht der AAI bei allen Flugzeug-Triebwerkskombinationen und Distanzen. Die Werte der Triebwerksgewichte entnimmt der AAI Industrie-Verzeichnissen⁴³.

Auswertung der Schritte 1-3

Die bisherigen Schritte werden zu einem Triebwerksfaktor als Korrekturfaktor für jede Flugzeugtriebwerkskombination auf allen Einzelflughdistanzen zusammengefasst. Dabei zeigen sich folgende Punkte:

- Die Unterschiede im SFC des isolierten Triebwerks sind bei modernen Flugzeugen und Triebwerken meist vernachlässigbar. Dies stimmt mit Expertenaussagen überein, wonach sich die Triebwerkshersteller durch die permanente Entwicklung der letzten Jahre und Jahrzehnte im Wettbewerb beim SFC sehr nahe gekommen sind. Bei alten Flugzeugen und Triebwerken kann der Unterschied aber in wenigen Extremfällen über 10% betragen. Im Mittel über alle Flüge und Triebwerke hat das Triebwerk aber nur ein Gewicht von etwa 3% bei der Bestimmung der globalen Effizienzpunkte einer Airline (siehe auch Kapitel 12, Faktoranalyse).

⁴¹ Vgl. GREENER BY DESIGN 2005

⁴² Vgl. UBM AVIATION. ENGINE YEARBOOKS 2006-2011

⁴³ Vgl. UBM AVIATION. ENGINE YEARBOOKS 2006-2011

- Die Analyse zeigt, dass der Korrekturfaktor Luftwiderstand zwar spürbar ist, aber bei der Zunahme des Bypass-Verhältnisses in der Vergangenheit nicht den Vorteil beim SFC aufgewogen hat. Noch geringer fällt die Korrektur um den Gewichtungsfaktor aus, der sich nur bei Langstreckenflügen stärker auswirkt.

4. Korrekturfaktor der CO₂-Wirkung des SFC über NO_x-Emissionen und nachfolgend O₃ und CH₄ Effekte (NO_x-Korrekturfaktor für SFC)

Der NO_x-Korrekturfaktor bewertet die Stickoxidemissionen von Triebwerken. Da er auf NO_x und dessen Wirkung basiert, kann er nicht direkt mit dem SFC eines Triebwerks verrechnet werden, da er ja auf Treibstoffverbrauch und damit CO₂ basiert. Er wird deswegen hier als dimensionsloser Faktor auf den SFC angewendet, wobei das Ergebnis nicht eine rein quantitative Änderung des SFC ist, sondern eine quantitativ-qualitative Umwandlung des SFC in einen klimaäquivalenten SFC. Da sich der NO_x-Korrekturfaktor aber als klein erweisen wird, werden wir in dieser Dokumentation weiter einfach von SFC sprechen. Die Ermittlung des NO_x-Korrekturfaktors erfolgt in zwei Schritten.

Schritt 1: Bestimmung NO_x-Emissionen im Reiseflug

Der AAI unterscheidet im Folgenden zwischen einem global gemittelten Triebwerk (mit etwa 14,3g NO_x/ kg Kerosin⁴⁴) und dem jeweiligen Triebwerk, das der AAI für einen Flug aus den Datenquellen erhält. Für die Bestimmung des NO_x-Korrekturfaktors wird zunächst für jedes Triebwerk der absolute NO_x – Ausstoß bei 65% Schubeinstellung (entspricht ungefähr dem Cruise Mode⁴⁵) aus den Werten der ICAO Datenbank ermittelt. Dafür werden die NO_x – Ausstöße der Triebwerke im AAI bei 85% (ClimbOut) bzw. 30% (Approach) Schub auf den Wert von 65% Schub interpoliert. Tabelle 32 zeigt Extremwerte der NO_x – Ausstöße verschiedener Triebwerke bei unterschiedlichen Schubeinstellungen. Der Wert für 65% Schub ist hier bereits interpoliert. Es zeigt sich, dass in diesem Extremfall die NO_x-Emissionen um etwa ±100% von einem mittleren Wert abweichen können.

⁴⁴ Vgl. KIM et al. 2007, S. 331

⁴⁵ Vgl. TORENBEEK 1982

Schubeinstellung	NO _x -Emissionen pro Kerosinverbrauch (EI-NO _x), [g/kg] Maximal	NO _x -Emissionen pro Kerosinverbrauch (EI-NO _x), [g/kg] Minimal
30%	16,59*	3,4***
65%	33,2**	5,6***
85%	46,31**	6,8***
*GE90-94B **RB211-524H ***Pratt & Whitney JT15D-1		

Tabelle 32: Minimale und maximale NO_x-Emissionen von extremen Triebwerken in Abhängigkeit vom Schub, auf Meeresspiegelhöhe⁴⁶

Auf diese Weise erhält jedes Triebwerk einen NO_x-Emissionsindex (EI-NO_x TW) zugeteilt. Zugleich kann so ein weltweiter Mittelwert (EI-NO_x global) ermittelt werden, wobei bei der Mittelung die einzelnen EI-NO_x TW nach den absolvierten Flugkilometern der Triebwerke gewichtet werden.

Schritt 2: AGWP Vergleich von Triebwerk mit weltweitem Mittelwert

Das ausgestoßene absolute NO_x verursacht einen zeitlich veränderlichen netto Strahlungsantrieb. Um diesen mit demjenigen des emittierten CO₂ vergleichen zu können, werden beide Strahlungsantriebe in ihrem zeitlichen Verlauf über einen international in der UNFCCC etablierten Zeithorizont von 100 Jahren integriert. Man erhält so für jeden Schadstoff absolute Global Warming Potentials, die für den Flugverkehr des Jahres 2005 in Tabelle 33 ausgewiesen sind.

Schadstoff	AGWP [10 ⁻¹⁴ Wm ⁻² kgCO ₂ ⁻¹ Jahr]	Verwendung im AAI
CO ₂	9,15	Direkt im AAI berücksichtigt
O ₃ und CH ₄ netto	-0,038	Über NO _x -Korrektur des Triebwerkfaktors im AAI berücksichtigt
Kondensstreifen	1,8	Gleich für alle Airlines, daher nicht im AAI berücksichtigt
AIC	5,6 (0-14,4)	Gleich für alle Airlines, daher nicht im AAI berücksichtigt

Tabelle 33: AGWPs des weltweiten Flugverkehrs 2005, nach Peeters und Williams⁴⁷

Um abschließend den NO_x-Korrekturfaktor eines bestimmten Triebwerks auszurechnen, wird das netto AGWP von O₃ und CH₄ mit den NO_x-EI des Triebwerks (siehe Schritt 1) gewichtet und mit den AGWPs aller Schadstoffe des weltweit mittleren Triebwerks verglichen. In der Formel steht AP für AGWP.

$$NO_x - \text{Korrekturfaktor} - SFC = \frac{AP_{CO_2} + AP_{O_3+CH_4} \cdot \frac{EI - NO_{xTW}}{EI - NO_{xglobal}} + AP_{contrails} + AP_{AIC}}{AP_{CO_2} + AP_{O_3+CH_4} \cdot net + AP_{contrails} + AP_{AIC}}$$

⁴⁶ Vgl. CAA (2010). ICAO Engine Emission Database

⁴⁷ Vgl. PEETERS, WILLIAMS 2009

Es zeigt sich, dass der NO_x-Korrekturfaktor auch bei extremen Triebwerken (siehe Tabelle 32) nur bei <1,01 bzw. >0,99 liegt. Die Korrekturwirkung des NO_x-Korrekturfaktors liegt also im Promillebereich und ist damit eine Größenordnung kleiner als der Korrekturfaktor, der beim Luftwiderstand des Triebwerks (siehe oben) anfällt. Dies liegt in erster Linie daran, dass über den Zeithorizont von 100 Jahren das CO₂ eine wesentlich stärkere Wirkung als der Nettoeffekt von O₃ und CH₄ hat.

Aufgrund der geringen Größe könnte der NO_x-Korrekturfaktor für den SFC eigentlich vernachlässigt werden. Da aber die Erhöhung der NO_x-Emissionen als gegenläufiger Effekt zur Senkung des SFC bei höheren Drücken und Temperaturen in der Brennkammer auftritt, wird er aus Gründen der systematischen Vollständigkeit bei der Ermittlung des Triebwerksfaktors mit einbezogen.

8.1.5. Nutzlast und Distanz zu Kerosinverbrauch

Der Verbrauch eines Fluges im AAI über die Distanz des CityPairs und mit der transportierten Nutzlast wird zwischen den Werten der Verbrauchsmatrix linear interpoliert. Dazu interpoliert der AAI mittels der realen CityPair - Distanz (D_{CP}) sowie der berechneten Nutzlast (P_{FL}) den Kerosinverbrauch aus den zugehörigen Einzelflügen (8.1.2). Dafür benötigt der AAI die beiden benachbarten Paare von Nutzlasten und Distanzen auf Einzelflügen, wobei nur diejenigen Einzelflüge herangezogen werden, deren Material (Flugzeugtyp, Winglets) dem des Fluges entspricht. Der Treibstoffverbrauch des Fluges wird wie folgt interpoliert, dabei stehen D für Distanz, o und u für oberer und unterer Wert der Einzelflüge:

$$F_{oPD_{CP}} = \left(\frac{(F_{oPoD} - F_{oPuD})}{(oD - uD)} * (D_{CP} - uD) \right) + F_{oPuD}$$

$$F_{uPD_{CP}} = \left(\frac{(F_{uPoD} - F_{uPuD})}{(oD - uD)} * (D_{CP} - uD) \right) + F_{uPuD}$$

Der zweite Schritt interpoliert dann aus den beiden vorher bestimmten Werten den Kerosinverbrauch des Fluges:

$$F_{Flug} = \left(\frac{(F_{oPD_{CP}} - F_{uPD_{CP}})}{(oP - uP)} * (P_{FL} - uP) \right) + F_{uPD_{CP}}$$

Der bei den Interpolationen insgesamt auftretende Fehler ist vernachlässigbar klein (<0,05% des Verbrauchs), weil die Werte der Einzelflüge in der Verbrauchsmatrix engmaschig gewählt sind (siehe Kapitel 5.9).

8.1.6. CO₂ je Nutzlastkilometer, spezifische Emissionen.

Der CO₂ – Ausstoß hängt direkt proportional vom Kerosinverbrauch des Fluges ab. Der Umrechnungsfaktor beträgt 3,16 kg CO₂ / kg Kerosin. So erhält der AAI aus dem oben berechneten absoluten Treibstoffverbrauch des Fluges (8.1.5), der Nutzlast und der CityPair Distanz abschließend das gewünschte CO₂ je Nutzlastkilometer auf einem Flug. Diese CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer nennen wir in dieser Dokumentation „spezifische CO₂-Emissionen“.

8.2. CO₂ - Emissionen pro Nutzlastkilometer auf einem CityPair pro Airline

Bis hier hat der AAI die spezifischen CO₂ - Emissionen eines bestimmten Fluges berechnet. Als Zwischenschritt zu den CityPair Effizienzpunkten (8.3.2) fasst der AAI nun die spezifischen CO₂ – Emissionen auf der Ebene eines CityPairs für eine Airline zusammen. Notwendig wird dieser Schritt, da eine Airline auf einem CityPair mehrere Flugzeugmodelle einsetzen und diese mit unterschiedlichen Betriebsparametern betreiben kann. Die spezifischen CO₂ – Emissionen einer Airline auf einem CityPair fasst der AAI für eine Airline über alle ihre Flüge zusammen. Das Ergebnis ist ein repräsentativer Wert für die spezifischen CO₂ - Emissionen einer Airline auf diesem CityPair.

8.3. Effizienzpunkte auf einem CityPair

8.3.1. Berechnung des BestCase und WorstCase

Als Grundlage für das Globale Ranking vergibt der AAI Effizienzpunkte für jedes CityPair: Die Fluggesellschaften, die auf einem CityPair fliegen, erhalten hierfür zwischen 0 und 100 Effizienzpunkte.

Wie in Abschnitt Punkt 6.1 beschrieben, werden dazu als Bezugspunkte für jedes CityPair ein BestCase und ein WorstCase für die spezifischen CO₂ - Emissionen berechnet. Um diese Werte zu bestimmen, werden die Rechenschritte von 8.1.3 – 8.1.6 wiederholt, aber mit modifizierten Eingangsparametern:

BestCase

Flugzeugtyp: Die Berechnung wird für alle möglichen Flugzeuge durchgeführt, die das CityPair physisch befiegen können. Ein Kurzstreckenjet wie z.B. der A318 kann also nicht für die BestCase – Berechnung einer Langstrecke herangezogen werden.

- Triebwerk: Hier wird jeweils der Triebwerksfaktor (siehe 0) des besten Triebwerks für den jeweiligen Flugzeugtyp herangezogen.
- Nutzlast: Diese beträgt je Flugzeugtyp 100% Auslastung bei maximaler Sitzplatzkapazität (ICAO Full Economy Methode) sowie 100% Auslastung der maximal möglichen Frachtkapazität je Flugzeugtyp. Sollte die berechnete Nutzlast des BestCase Fluges das MTOW übersteigen, wird sie beim MTOW begrenzt.

Die Berechnung des Kerosinverbrauchs für den BestCase Flug wird analog bis zu Abschnitt 8.1.6 durchgeführt, mit allen Flugzeugtypen, die die Distanz des jeweiligen CityPairs bewältigen können (also bis zu 107 Flugzeugtypen), inkl. des Triebwerksfaktors. Als Ergebnis existiert für jedes CityPair

eine Reihe von spezifischen CO₂ – Emissionen; ein Wert je Flugzeugtyp. Der Flugzeugtyp mit den geringsten spezifischen CO₂-Emissionen definiert dann zusammen mit dem bestmöglichen Triebwerksfaktor den BestCase auf diesem CityPair. Der BestCase stellt also den heute mit dem vorhandenen Flugmaterial möglichen effizientesten Flug auf diesem CityPair dar.

WorstCase

Diesen definiert der AAI als 300% der spezifischen CO₂-Emissionen des BestCases. Er könnte ohne Veränderung der Ergebnisse auch mit einem anderen Wert gewählt sein (siehe Kapitel 6.1).

8.3.2. Ermittlung der CityPair Effizienzpunkte

Die spezifischen CO₂ Emissionen je Nutzlastkilometer aller Airlines auf diesem CityPair werden mit dem BestCase bzw. WorstCase verglichen. Für die Berechnung der CityPair Effizienzpunkte gelten dann folgende Regeln:

- BestCase entspricht 100 Effizienzpunkten.
- WorstCase entspricht 0 Effizienzpunkten.

Die Effizienzpunkte einer Airline auf diesem CityPair werden nun linear zwischen Worst- und BestCase ermittelt. Dabei geht bei jedem Flug einer Airline noch der jeweilige Triebwerksfaktor (siehe 0) linear als Multiplikator mit ein.

Die Herangehensweise mit dem möglichen effizientesten Flug als BestCase bietet den Vorteil, dass die CityPair Effizienzpunkte einer Airline unabhängig von den Flügen anderer Airlines auf demselben CityPair sind. Der BestCase ist ein Best Practice Maßstab, anhand dessen sich die Performance einer Airline immer messen lässt. Er ist insofern lebendig, als er sich mit neuen Flugzeugtypen, die auf den Markt kommen mitentwickelt und so die „Meßlatte“ immer höher setzt, ohne dabei Technologie zu verlangen, die es noch nicht gibt.

8.4. Effizienzpunkte im globalen AAI Ranking

Das globale AAI Ranking mittelt die Effizienzpunkte der beflogenen CityPairs einer Airline und ermittelt so für jede Fluggesellschaft die globalen Effizienzpunkte zwischen 0 und 100. 100 Punkte markieren dabei die höchste Klimateffizienz.

$$\text{GlobaleEffizienzpunkte} = \frac{\sum_{\text{alleCityPairs}} \text{CityPairEffizienzpunkte} * \text{Nutzlastkilometer}}{\sum_{\text{alleCityPairs}} \text{Nutzlastkilometer}}$$

9. Datenquellen

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.

9.1. Piano-x (Lissys Ltd)

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, sowie Flugbehörden und Universitäten und Forschungseinrichtungen benutzen Piano-x (siehe Appendix 1). Auch die ICAO greift für ihren Emissionsrechner auf Piano-x zurück⁴⁸.

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 (z.B. Luftwiderstand und Auftrieb in Abhängigkeit von Klappeneinstellungen, Schub etc.). 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.

9.2. Daten der 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.

⁴⁸ Vgl. ICAO (Carbon Emissions Calculator, Version 3) 2010

9.2.1. ICAO TFS

Die ICAO Traffic By Flight Stage Database (TFS) liefert für internationale Linienflüge die Passagier- und Frachtkapazität sowie die Auslastungen auf der Ebene CityPair / Fluggesellschaft / Flugzeugtyp. Da diese Datenquelle nicht vollständig ist, greift der AAI für Daten zu Kapazität und Auslastung zusätzlich auf andere Quellen zurück (siehe unten, OAG, Airline Data, IATA WATS).

ICAO TFS	
Anzahl betrachtete Airlines	152
Umfang	Internationale Linienflüge, keine Inlandsflüge, kein Charter
Anzahl Flüge	4,8 Millionen
Anzahl Passagiere	Ca. 550 Millionen
Passagierauslastungsfaktoren	Detailliert (angebotene und tatsächlich nachgefragte Sitzplatzkapazitäten), je CityPair je Airline je Flugzeugmodell
Transportierte Fracht	Detailliert (angebotene und tatsächlich nachgefragte Frachtkapazitäten), je CityPair je Airline je Flugzeugmodell, aufgeschlüsselt in Fracht und Post

Tabelle 34: Umfang der ICAO TFS

9.2.2. ICAO Engine Emission Database

Die ICAO Engine Emission Database beinhaltet (u.a.) NO_x-Emissionswerte aller 308 gängigen Flugzeugtriebwerke bei vier verschiedenen Standard-Schubeinstellungen⁴⁹ (Stand Dezember 2010), siehe Kapitel 8.1.4.

9.2.3. ATI – Air Transport Intelligence

ATI ist ein Online Datenservice der Firma FlightGlobal. Er stellt u.a. die Flugverkehrsdaten der ICAO in aufbereiteter Form zur Verfügung. Der AAI verwendet U. a. die folgenden Daten von ATI:

- 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.

⁴⁹ Vgl. CAA - ICAO Engine Emission Database (Stand 12/2010)

9.3. 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)⁵⁰. 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. 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 verteilt⁵¹. 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	
Anzahl betrachtete Airlines	Ca. 8.000
Umfang	Linienflüge, Charterflüge, LowCost Flüge, Frachtflüge, Flüge von Regierungsmaschinen
Grundlage	Flugpläne, weltweit
Anzahl Flüge	Ca. 33 Millionen
Passagierkapazität	Ca. 3 Milliarden
Sitzplatzkapazität	Angebotene Sitze je CityPair je Airline je Flugzeugmodell
Frachtkapazität	angebotene Frachtkapazität je CityPair je Airline je Flugzeugmodell

Tabelle 35: Zusammenfassung OAG

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 Passagieren⁵², 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

⁵⁰ Vgl. OAG-UBM History

⁵¹ Vgl. OAG DATA 2003

⁵² Vgl. IATA FACT SHEET 2010

aus ATI (siehe 9.2.3). Diese Fluggesellschaften berichten ihre Flugpläne ohne Ausnahme an OAG, so dass hier die für den AAI relevante Abdeckung 100% beträgt.

9.4. 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.

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 Auslastung⁵³.

AirlineData T100International	
Anzahl betrachtete Airlines	221
Umfang	Linienflüge, Charterflüge, Frachtflüge
	Flüge von, nach und innerhalb der USA
Anzahl Flüge	ca. 10 Millionen
Anzahl Passagiere	1.022 Millionen
Passagierauslastungsfaktoren	Detailliert, je CityPair je Airline je Flugzeugmodell
Transportierte Fracht	Detailliert, je CityPair je Airline je Flugzeugmodell, aufgeschlüsselt in Fracht und Post

Tabelle 36: Zusammenfassung AirlineData T100International

9.5. JP Airline Fleets International

Der JP Airline Fleets International (JP) Katalog wird seit über 40 Jahren von BUCHair (USA) Inc. herausgegeben⁵⁴. 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.

9.6. IATA WATS

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

⁵³ Vgl. DATA BASE PRODUCTS 2011

⁵⁴ Siehe Webseite von Buchair: www.buchair.com

IATA WATS	
Anzahl betrachtete Airlines	Ca. 300
Umfang	Linienflüge, Charterflüge, unterteilt in Domestic und International
Passagierauslastungsfaktoren	Je Airline, differenziert nach national/international
Frachtauslastungsfaktoren	je Airline, aufgeschlüsselt in Fracht & Post, differenziert nach national/international

Tabelle 37: Zusammenfassung IATA WATS

9.7. AeroSecure

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. AeroSecure unterteilt die in Airlines in verschiedene Kategorien, die zum Teil im AAI übernommen wurde (vgl. Kapitel 10.2).

9.8. Abdeckung der Einflussfaktoren durch die Datenquellen, Konsistenzchecks

Die sieben maßgeblichen Einflussfaktoren des AAI speisen sich aus folgenden Datenquellen:

	Flugzeug- typ	Sitzplatz- kapazität	Fracht- kapazität	Auslastung Passagiere	Auslastung Fracht	Trieb- werke	Winglets
ICAO TFS	x	x	X	x	x		
IATA WATS				x	x		
AD T100I	x	x	X	x			
ICAO Engine Emission Database						x	
OAG	x	x	X			x	x
Piano-x							
JP Airline Fleets	x					x	x
Konsistenzcheck möglich	ja	ja	Ja	ja	ja	ja	ja

Tabelle 38: Übersicht über die Einflussfaktoren des AAI und die zugehörigen Datenquellen

Jeder Einflussfaktor lässt sich aus mehr als einer Datenquelle mit Daten unterlegen. Somit ist ein Konsistenzcheck der Quellen untereinander möglich.

Die für diese Dokumentation durchgeführten Konsistenzchecks vergleichen in zufällig gezogenen Stichproben die jeweilig gleichen Daten aus verschiedenen Quellen. Dabei stimmten in der Regel die Angaben aus den verschiedenen Quellen überein. Die Fehleranalyse (Kapitel 13) diskutiert einzelne Abweichung und ihre Auswirkungen im Detail.

10. Aufnahme und Einteilung der Airlines

In diesem Kapitel diskutieren wir die Auswahl der Airlines für den AAI sowie Einteilung der Airlines in die vier Kategorien Netz, Charter, Regional und LowCost, sowie später Sonderfälle wie Code Sharing, Leasing etc..

10.1. Auswahl der Airlines für den AAI

Der AAI betrachtet die größten Airlines der Welt. Maßgeblich für die Aufnahme ist hier die Transportleistung; dabei wird Größe in geflogenen Passagierkilometern gemessen. Das Vorgehen ist dabei wie folgt:

1. Anhand der Quelle ATI (siehe Kapitel 9.2.3) wählt der AAI aus allen Airlines weltweit die 130 aus, die am meisten Passagierkilometer fliegen, unabhängig von ihrem Businessmodell und Märkten.
2. Für diese Airlines prüft der AAI die Datenlage. Airlines, bei denen die Datenlage nicht ausreicht, um alle Einflussfaktoren ausreichend detailliert abzubilden, werden nicht in den AAI aufgenommen. Somit reduziert sich die Anzahl der Airlines auf 120.
3. Einige der 130 Airlines bieten Regional- und Zubringerflüge unter einer eigenen Dachmarke an (z.B. Continental Airlines mit Continental Connection). Zum Teil setzt die Airline eigene Flugzeuge ein, zum Teil beauftragt sie Subcarrier (vgl. 10.3.4), wodurch sich hinter der Dachmarke die Flugzeuge mehrere Airlines verbergen können. Der AAI identifiziert die Flugzeuge, die der Subcarrier für die Regionalsparte der jeweiligen Airlines einsetzt und ordnet diese der Dachmarke zu. Der AAI betrachtet die Dachmarke als eigenständige „Airline“ und ordnet die Flugzeuge der Subcarrier dieser zu (Colgan Air zu Continental Connection). Somit erhöht sich die Zahl der Airlines auf 145. Hinter jeder der 25 Dachmarken verbergen sich ein oder mehrere Subcarrier (insgesamt 52), wodurch sich die Zahl der betrachteten Airlines im AAI auf knapp 200 erhöht.

Im Ergebnis bestimmt der AAI die globalen Effizienzpunkte für deutlich mehr als 100 Airlines.

10.2. Kategorisierung der Airlines im AAI anhand spezialisierter Dienstleister

Der AAI weist die Ergebnisse für die Airlines aus und verwendet dabei die Einteilung der Airlines von Branchendiensten in vier Kategorien, die weiter unten beschrieben werden. Diese Einteilung ist

branchenüblich und so auch in der Literatur zu finden. Spätestens mit der Liberalisierung des Flugverkehrsmarktes und dem Auftreten der LowCost Airlines werden aber die traditionellen Klasseneinteilungen schwieriger, weil zwar die Merkmale der Klassen theoretisch noch scharf sind, aber viele Fluggesellschaften mehrere Geschäftsmodelle gleichzeitig verfolgen und auf verschiedenen Flügen oder in verschiedenen Märkten verschiedene Ausprägungen aufweisen⁵⁵.

Aus diesem Grund dient die Aufteilung der Airlines in Kategorien im AAI nur zur ersten Orientierung für den Nutzer. Es gehört nicht zum Ziel des AAI, neue Kriterien oder eigenständige Einteilungen der Airlines in Kategorien vorzunehmen, noch diese Kategorien an sich zu bewerten. Die jeweilige Einordnung einer Airline in eine Kategorie übernimmt der AAI daher von Dienstleistern aus der Luftfahrtbranche. Die wichtigsten Quellen sind hier ATI und AeroSecure. ATI unterscheidet zwischen LowCost, Charter- und Regional Carriern, AeroSecure zusätzlich noch nach (Ex) National-Airline. Die Einteilung der Airlines in die jeweiligen Kategorien durch die beiden Dienstleister stand bei keiner Airline im Widerspruch zueinander.

Im Folgenden geben wir eine kurze Übersicht über Kriterien, die in der Literatur⁵⁶ und von ATI bzw. AeroSecure zur Kategorisierung von Airlines herangezogen werden.

- Linienfluggesellschaften (NetzCarrier)⁵⁷

Viele Fluggesellschaften entwickelten sich aus Staatsbetrieb bzw. -Förderung heraus und wurden danach zunehmend privatisiert. Wenn der Staat mehrheitlich beteiligt ist, spricht man auch von einem Flag- oder NationalCarrier. Auf einem bestimmten Markt – bspw. international, national, kontinental – decken NetzCarrier mögliche Flugrouten mit einem netzartigen Angebot inkl. Umsteigeflügen ab. Dabei führen sie Linienflüge durch, also Flüge zu festgelegten Tagen und Uhrzeiten, die nicht nur saisonal angeboten werden.

- Charterfluggesellschaften⁵⁸

Dies sind Fluggesellschaften, die in großem Umfang Charterflüge anbieten. Im Unterschied zu Linienflügen werden die Flüge nur zu Zeiten angeboten, in denen die Fluggesellschaften große Nachfrage erwarten. Rechtlich haben die Charterfluggesellschaften keine Pflicht, ungenügend gebuchte Flüge durchzuführen. In der Praxis werden aber viele Plätze bei diesen Airlines über Reiseveranstalter im Paket mit der gesamten Urlaubsreise gebucht, für die häufig durch ein Reisevertragsgesetz die Beförderungspflicht de facto hergestellt ist. Auch mit der Bekanntgabe von Sommer- und Winterflugplänen verwischt in der Praxis bei der Regelmäßigkeit eine Abgrenzung zwischen Charter- und Netz Carriern.

⁵⁵ Vgl. POMPL 2007, S. 99ff.

⁵⁶ Ebd.

⁵⁷ Ebd.

⁵⁸ Ebd.

Seit 1993 ist die verkehrsrechtliche Trennung zwischen Linien- und Charterverkehr in Deutschland aufgehoben. In der Abwicklung und im Vertrieb bestehen aber die bisherigen Unterschiede weiterhin. Der Linienflugverkehr ist netzorientiert und die Tickets werden vorwiegend direkt an den Endverbraucher verkauft. Der Charterverkehr ist dagegen überwiegend ein Punkt-zu-Punkt-Verkehr und wird zu über 80% als Teil von Pauschalreisepaketen über Reiseveranstalter vertrieben.

Bei der Entwicklung von Charterfluggesellschaften ist erkennbar, dass sie sich immer mehr zu touristisch orientierten Linienfluggesellschaften entwickeln. Das bedeutet, dass viele Ziele über das ganze Jahr mit einem festen Flugplan angefliegen werden.

- LowCost – Fluggesellschaften

Seit Mitte der 1990er Jahre setzen LowCost Carrier an verschiedenen Punkten an, um die Preise für Flugtickets zu senken: Die Reduzierung oder kompletter Verzicht auf Komfort, Ein-Klassenauslegung, Nutzung von Regionalflughäfen, Beschränkung auf wenige Flugrouten ohne Umsteigen sind typische Geschäftsmerkmale. Da aber auch Linienfluggesellschaften auf Strecken, in denen sie in direkter Konkurrenz zu den LowCost Airlines fliegen ihre Preise häufig senken, ist es hier zunehmend schwierig, LowCost Airlines eindeutig von Linienfluggesellschaften abzugrenzen.

Der AAI übernimmt die Definition der LowCost Carrier von ATI⁵⁹: „Precise definition of a low-cost carrier is difficult given the evolution of the model and increasing common ground with network carriers, but we specify a low-cost carrier as a point-to-point scheduled operator which largely adheres to the core principles of the low-cost carrier model. The airline will have a stand-alone management team and will market itself on price, mostly with a single class offering. Carriers will sell most of their tickets through direct sales via the Internet, and onboard frills will be available only for a fee. Carriers will have simplified fleet structures and fast turnarounds.“

Diese Definition entspricht dem Ansatz von atmosfair, die LowCost Carrier als Sonderfall anzusehen (siehe Kapitel 3.4), weil auch ATI mit den oben genannten „core principles of the low-cost model“ die niedrigen Preise ins Zentrum stellt, die wegen ihrer fluginduzierenden Wirkung aus Klimasicht einen Sonderfall darstellen.

⁵⁹ ATI, persönliche Mitteilung, Februar 2011.

- Regionalfluggesellschaften

Dies sind Fluggesellschaften, die Zubringerflüge zu den großen Luftdrehkreuzen durchführen (Flüge von kleinen Regionalflughäfen zu Drehkreuzen und umgekehrt). Sie setzen häufig Regionalflugzeuge oder Commuterflugzeuge ein, vereinzelt auch Kurzstrecken Jets (z.B. Embraer ERJ).

10.3. Code Sharing, Tochtergesellschaften und Leasing

Trotz der klaren Quellen für die Kategorisierung der Airlines müssen zusätzliche Abgrenzungen in Sonderfällen diskutiert werden, da es bei manchen Flügen Überschneidungen unter den Airlines geben kann. Folgende Fälle sind möglich:

1. Code Sharing
2. Tochtergesellschaften
3. Mehrheitsbeteiligungen
4. Subcarrier
5. Leasing

10.3.1. Code Sharing

Bei diesem Verfahren bietet eine Airline einen Flug unter einer eigenen Flugnummer an, der Flug selbst wird jedoch durch eine andere Airline durchgeführt. Diese verkauft unter ihrer eigenen Flugnummer ebenfalls Tickets für diesen Flug. Somit existieren für ein und denselben Flug mindestens zwei Flugnummern. In den meisten Fällen gehören aber beide Airlines zu einem größeren ökonomischen Zusammenschluss von Fluggesellschaften (Allianzen). Dadurch können die Fluggesellschaften ihr Angebot an Flügen erhöhen, ohne eigene Flugzeuge einzusetzen. Potentiell verbessert sich so auch die Auslastung eines Fluges.

Behandlung im AAI: Die Datenquellen des AAI erlauben bei Code Sharing eine Unterscheidung, welche der beteiligten Airlines lediglich Ticketkontingente verkauft und welche den Flug tatsächlich mit ihren eigenen Flugzeugen durchgeführt hat. Da alle Airlines Zugriff auf Flugkapazitäten haben, sind alle mit verantwortlich für die CO₂ – Emissionen des Fluges. Dennoch weist der AAI diese der Airline zu, die den Flug tatsächlich mit ihrem Flugzeug durchführt. Einerseits weil sie als einzige alle Einflussfaktoren des AAI (vgl. Kapitel 12) beeinflussen kann, andererseits auf Grund der Passagiersicht des AAI. Der Passagier kann um die Tatsache, dass sein Flug ein Code Sharing Flug ist, wissen, und nimmt die ihn transportierende Airline war. Aus diesen Gründen ordnet der AAI bei Code Sharing die CO₂ - Emissionen der Airline zu, die den Flug tatsächlich durchführt.

10.3.2. Tochtergesellschaften

Viele Airlines besitzen 100%ige Tochtergesellschaften. Damit lagern sie Geschäftsfelder aus, vor allem Zubringer- und Regionalflüge, z.T. auch Inlandsflüge sowie bestimmte nationale Märkte. In der Regel sind die Tochterairlines rechtlich selbständig, werden jedoch in ihren Geschäften vom Mutterkonzern teilweise oder vollständig kontrolliert.

Behandlung im AAI: Auch wenn die Tochtergesellschaften dem Mutterkonzern angehören, so sind sie rechtlich gesehen eigenständige Unternehmen und werden im AAI als eigenständige Airlines betrachtet, selbst wenn sie nur Flüge für die Muttergesellschaft durchführen.

Der AAI nimmt die Sicht des Passagiers ein. Dieser nimmt in der Regel nur die ihn transportierende Fluggesellschaft in ihrer Außenwirkung wahr. Die Flugzeuge der Tochtergesellschaften haben von den Flugzeugen der Muttergesellschaft abweichende Lackierungen oder zumindest abweichende Beschriftungen. Diese unterschiedliche Außendarstellung veranlasst den AAI, Tochtergesellschaften als eigenständige Airlines zu betrachten und ihre spezifischen CO₂-Emissionen in eigene Effizienzpunkte umzurechnen.

10.3.3. Mehrheitsbeteiligungen

Viele Airlines halten Eigenkapitalbeteiligungen (in Form von Gesellschafteranteilen oder Aktien) an anderen Airlines. Eine Mehrheitsbeteiligung von einer Airline A an einer anderen Airline B ermöglicht es A theoretisch, direkt in die Geschäfte von B einzugreifen. Im ungünstigsten Fall kann B die Faktoren, die in das Ranking einfließen, nicht eigenständig beeinflussen (z.B. der eingesetzte Flugzeugtyp oder die angebotene Sitzplatzkapazität) sondern muss sich nach den Vorgaben von A richten.

Behandlung im AAI: Der AAI berücksichtigt Mehrheitsbeteiligungen nicht. Er tut dies aus zwei Gründen: Erstens nimmt auch hier der Passagier die Airline nur in ihrer Außenwirkung dar. Die jeweiligen Eigentumsverhältnisse sind ihm auch hier nicht bekannt; in der Regel wird er nicht wissen, ob die Airline, die ihn fliegt, in ihren Geschäften fremdbestimmt ist. Zweitens könnte eine Betrachtung von Mehrheitsbeteiligungen das Ranking verzerren, was durch das folgende hypothetische Beispiel verdeutlicht wird.

Auf einem CityPair fliegen drei Airlines:

- Airline A mit 16,8 kg CO₂ / 100 Tkm
- Airline B mit 17,0 kg CO₂ / 100 Tkm
- Airline C mit 25,2 kg CO₂ / 100 Tkm.

A hält die Mehrheit an C und bestimmt diese in ihren Geschäften (Wahl der Flugzeugtypen, Anzahl und Verteilung der Sitzklassen usw.). Berücksichtigt der AAI die Mehrheitsbeteiligung und ordnet das CO₂ je Nutzlastkilometer der Flüge von C auf diesem CityPair der Airline A zu, ergeben sich zwei Probleme:

1. Der Passagier, der mit C fliegt, findet diese Airline nicht im Ranking vor. Er muss die Zuordnung von C zu A im AAI Ranking selbst vornehmen.
2. Das Zusammenfassen der Flüge von A und C verändert das Ranking z.B. wie folgt:
 - Airline A: 21 kg CO₂ / 100 Tkm
 - Airline B: 17 kg CO₂ je 100 Tkm

Ein umweltbewusster Passagier könnte anhand dieses Rankings von Airline A auf Airline B wechseln, ohne zu wissen, dass A ohne das Zurechnen von C effizienter wäre als die vom Passagier gewählte Airline B. Letztlich würde der Passagier auf Basis des AAI mehr CO₂ auf diesem CityPair verursachen, was im Konflikt zum Ziel des AAI steht.

Unabhängig davon, ob bei einer Airline die Mehrheit des Eigenkapitals in den Händen einer anderen Airline liegt und somit in ihren Geschäften fremdbestimmt ist: der AAI ordnet die Flüge einer Airline und damit die Effizienzpunkte auch dieser Airline zu.

10.3.4. Subcarrier

Einige Airlines bieten unter ihrer Flugnummer Flüge an, die sie jedoch nicht selbst durchführen sondern hierfür kleinere Airlines (Subcarrier) beauftragen. Die Subcarrier verwenden dabei Flugzeuge mit der Lackierung des Auftraggebers sowie dessen Flugnummern. Über die vertragliche Vereinbarung der Erbringung der Flugdienstleistung hinaus besteht jedoch keine wirtschaftliche oder rechtliche Verbindung zwischen Airline und Subcarrier.

Behandlung im AAI: Der Flüge, die der Subcarrier durchführt, geschehen im Auftrag einer Airline unter Verwendung ihrer Flugnummer. Dem Passagier ist nicht klar, dass die ihn transportierende Airline eine andere ist als auf seinem Ticket ausgewiesen. Daher werden diese Flüge der beauftragenden Airline zugeordnet.

10.3.5. Leasing und gecharterte Flugzeuge

Viele Flüge führen die Airlines nicht mit eigenen Maschinen durch, sondern chartern oder leasen Maschinen anderer Fluggesellschaften.

Behandlung im AAI: Die Emissionen des Fluges mit einer geleasten oder gecharterten Maschine werden der mietenden Fluggesellschaft und nicht dem Eigentümer zugerechnet. Dem Passagier sind auch hier die tatsächlichen Eigentumsverhältnisse nicht bewusst. Zudem ist die charternde bzw. leasende Fluggesellschaft frei, die jeweiligen Flugzeuge auch nach Umweltgesichtspunkten auszuwählen.

11. Ergebnisdarstellung im AAI

Dieses Kapitel beschreibt die Darstellung der Ergebnisse im AAI.

11.1. Effizienzpunkte

Das Ranking im AAI erfolgt in der Ergebnisdarstellung nach den Effizienzpunkten. Der Sprachgebrauch orientiert sich an der Darstellung von Effizienzlabels nach der der EU-Richtlinie 2002/91/EG.

11.2. Darstellung in verschiedenen Airlinekategorien

Der AAI weist die Netz-, Regional, und Charter Carrier in einem Ranking unter Ausweisung ihrer Kategorie aus (siehe Kapitel 10.2). Ungeachtet ihrer Kategorie liegt allen Fluggesellschaften dieselbe Berechnungsgrundlage der Effizienzpunkte zugrunde.

11.3. Aufteilung in Effizienzklassen

Die Darstellung des AAI Rankings ist an die Energieeffizienzrichtlinie der EU angelehnt⁶⁰. Hierfür übernimmt der AAI den EU-Ansatz von sieben Effizienzklassen A - G. Die Breite der sieben Effizienzklassen ist in der EU-Richtlinie nicht vorgegeben. Der AAI übernimmt hier von einem britischen Energieeffizienzlabel die Klassenbreitenverteilung, die ebenfalls auf einer Skala von 0 bis 100 Punkten angelegt ist. Dabei entspricht der vom AAI gewählte Ansatz, die Klassen mit wachsender Effizienz enger, d.h. anspruchsvoller zu definieren dem EU Labelling Schema für Autos und für Gebäude⁶¹.

Klasse	AAI Effizienzpunkte
Effizienzklasse A	100 – 90
Effizienzklasse B	89 – 79
Effizienzklasse C	78 – 67
Effizienzklasse D	66 – 54
Effizienzklasse E	53 – 39
Effizienzklasse F	38 – 21
Effizienzklasse G	20 - 0

Tabelle 39: Klassen und Klassenbreiten des AAI Rankings

Die Darstellung im AAI übernimmt auch die Formwahl der Klassen aus der EU-Energieeffizienz-Richtlinie.

⁶⁰ Richtlinie 92/75/EEC, 1992.

⁶¹ Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

11.4. Fehlerdarstellung

Die in der Fehleranalyse quantifizierten Ungenauigkeiten werden transparent im AAI in Unterschriften zu den jeweiligen Grafiken ausgewiesen (siehe Kapitel 13.4).

12. Faktoranalyse

Dieses Kapitel beschreibt, welches Gewicht die Faktoren im CO₂-Ergebnis einer Airline haben. Dieses wurde im Rahmen einer Faktoranalyse bestimmt, die untersucht, welche Auswirkung die Änderung eines Faktors auf das CO₂ je Nutzlastkilometer eines Fluges hat, unter der Annahme, dass alle anderen Faktoren ceteris paribus mit ihrem mittlerem Wert in den Flug einfließen.

Der AAI bezieht auf jedem CityPair folgende Faktoren ein (siehe Kapitel 4.13):

- Flugzeugtyp
- Sitzplatzkapazität
- Beiladefrachtkapazität
- Passagierauslastung
- Frachtauslastung
- Winglets
- Triebwerke

12.1. Schritt I: Mittelwert und Standardabweichungen der Einflussfaktoren

Für jeden Faktor werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung bestimmt.

Faktor	Mittelwert	Standardabweichung
Flugzeugtyp	Mittelwert der CO ₂ -Emissionen aller möglichen Flugzeugtypen auf einer Distanz	1 Sigma innerhalb der Reihe von diskreten CO ₂ -Werten (je Flugzeug)
Sitzplatzkapazität	je Flugzeugtyp: Mittelwert aller real vorkommenden Bestuhlungen	1 Sigma
Beiladefrachtkapazität	je Flugzeugtyp: Mittelwert aller real vorkommenden Kapazitäten	1 Sigma
PLF	Mittelwert der PLF aller Flüge im AAI	1 Sigma
CLF	Mittelwert der CLF aller Flüge im AAI	1 Sigma
Winglets	Nicht sinnvoll, da nur zwei reale Werte möglich	Flugzeug mit / ohne Winglets
Triebwerk	Je Flugzeugtyp: Median aller NO _x – Ausstöße der möglichen Triebwerke	Unterer Wert: ineffizientestes Triebwerk, oberer Wert: effizientestes Triebwerk

Tabelle 40: Einflussfaktoren des AAI, deren Mittelwerte und Standardabweichungen

Dieser Schritt läuft bei den einzelnen Faktoren unterschiedlich ab:

- Flugzeugtyp: Für den Flugzeugtyp kann ein Mittelwert nicht direkt festgelegt werden, weil dieser keine kontinuierliche Größe darstellt, sondern nur diskrete Werte aufweist (z.B. Boeing 757-200 oder Boeing 767-300, aber keine Werte zwischen diesen beiden). Dennoch ist der Flugzeugtyp wichtig für die CO₂ - Emissionen und wird im AAI in der Faktoranalyse wie folgt berücksichtigt: Für eine ausgewählte Distanz von z.B. 1000 Kilometer werden Flüge mit allen auf dieser Distanz möglichen Flugzeugtypen rechnerisch durchgeführt, und zwar mit immer festen Werten für die übrigen 6 Einflussfaktoren (Sitzplätze bis Triebwerk). Faktoren die vom Flugzeugtyp abhängen, wie z.B. die Bestuhlung werden dabei mit Mittelwerten so mit dem Flugzeugtyp mitskaliert, dass sie keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. So erhält man bei bspw. 85 Flugzeugtypen ceteris paribus insgesamt 85 verschiedene CO₂-Emissionen, die hier nur noch vom Flugzeugtyp abhängen, da alle anderen Faktoren fest sind. So erhält man eine Reihe von 85 diskreten CO₂-Werten, aus denen sich Mittelwert und Standardabweichung bestimmen lassen. Dieses Verfahren wird getrennt für die wichtigsten Distanzen durchgeführt.
- Passagierauslastung (PLF) und Frachtauslastung (CLF): Hier ist das Vorgehen einfach, da beide Größen im AAI Reihen von kontinuierlichen Werten darstellen. Für diese werden konventionell Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet, über alle Flugzeugtypen und über alle Airlines.
- Sitzplatzkapazität und Frachtkapazität: Für diese werden über alle Flüge im AAI Mittelwert und Standardabweichung aller vorkommenden Bestuhlungen gebildet, je Flugzeugtyp, aber über alle Airlines.
- Winglets: Für diesen Einflussfaktor ist eine Mittelwertbestimmung nicht sinnvoll, da es nur zwei Werte gibt: Flugzeug mit Winglets und Flugzeug ohne Winglets. Diese bilden die „Standardabweichung“.
- Triebwerke: Hier findet keine Mittelwertbestimmung statt. Da je Flugzeugtyp in vielen Fällen nicht mehr als drei Triebwerke zur Verfügung stehen, wird als „Mittelwert“ der Median der Triebwerke ermittelt. Die „Standardabweichung“ definieren wir mit kleinem Fehler als das jeweils effizienteste bzw. ineffizienteste Triebwerk (bezogen auf den NO_x – Ausstoß je kg Kerosin).

12.2. Schritt II: Bestimmung der CO₂-Differenzen bei Variation des Einflussfaktors um eine Standardabweichung

Für einen Flug wird die Berechnung des CO₂ je Nutzlastkilometer für jeden der sieben Einflussfaktoren zweimal durchgeführt. Dabei fließt der zu betrachtende Faktor einmal mit seinem oben beschriebenen Mittelwert ein, beim zweiten Mal mit seiner oben diskutierten Standardabweichung vom Mittelwert. Die übrigen sechs Faktoren bleiben bei beiden Rechnungen

konstant bei ihren Werten (ceteris paribus). Das Ergebnis sind sieben faktorbedingte CO₂-Differenzen (eine Differenz je Einflussfaktor).

Die CO₂-Differenz (im Folgenden „faktorbedingte CO₂-Differenz“ genannt) zwischen den beiden Berechnungen (Mittelwert – Standardabweichung) wird dann im dritten Schritt weiter verarbeitet. Tabelle 41 zeigt die faktorbedingten CO₂-Differenzen der sieben Einflussfaktoren.

Einflussfaktor	Mittlerer Wert	Standardabweichung	faktorbedingte CO ₂ -Differenz
Flugzeugtyp	z.B. McDonnell Douglas MD-87	In diesem Beispiel repräsentiert durch Boeing 737-400	10% bis 45%
Winglets	z.B. B737-800 ohne Winglets	B737-800 mit Winglets	3%
Triebwerksfaktor	1	±0,03	3%
Sitzplatzkapazität	z.B. 268 für A340-300	z.B. ±21 für A340-300	2% - 19%
Frachtkapazität	z.B. 6.650 kg für A340-300	z.B. ±2.300 kg für A340-300	0% - 7%
Passagierauslastung	74%	±20%	10% - 19%
Frachtauslastung	17%	±15%	0% - 6%

Tabelle 41: Faktorbedingte CO₂ - Differenzen der Einflussfaktoren, auf Distanzen von 1000 bis 8000 Kilometer.

12.3. Schritt III: Das Gewicht der Faktoren relativ zueinander

Die sieben faktorbedingten CO₂-Differenzen werden im dritten Schritt summiert und dann für jede Differenz ihr prozentualer Anteil an der Summe bestimmt. Dies ist das Ergebnis der Faktoranalyse. Es besagt, mit welchem Gewicht ein Faktor das Ergebnis (CO₂ je Nutzlastkilometer) bei der Veränderung um eine Standardabweichungen relativ zu den anderen Faktoren verändert. Die Faktorgewichte verschieben sich relativ zueinander mit den Flugdistanzen. Die Abbildung 3 gibt dafür einen Mittelwert wieder.

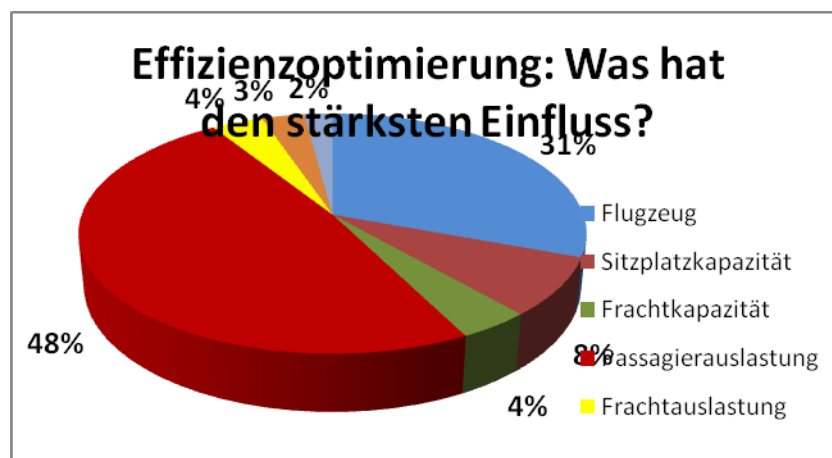


Abbildung 3: Mittlerer Einfluss der Faktoren im AAI global Ranking

13. Fehleranalyse

13.1. Einleitung

Wie genau ist der AAI? Ist das Ranking belastbar? Dieses Kapitel beantwortet diese Fragen. Der AAI basiert auf CO₂ pro Nutzlastkilometer und NO_x und damit auf physischen Größen. Diese unterliegen wie alle physischen Größen Fehlern bei ihrer Bestimmung. Aus diesem Grund bestimmt dieses Kapitel die Genauigkeit des AAI mit der Methode der Fehlerrechnung der Physik.

Für jeden der Faktoren, die in den AAI einfließen, werden die Fehler bestimmt, sowie die Auswirkungen des Gesamtfehlers im Ranking analysiert. Zudem erläutern wir, wie die ermittelten Ungenauigkeiten in die Darstellung des AAI eingehen.

13.1.1. Fehlerarten

Die Fehlerrechnung unterscheidet zwischen folgenden Fehlerarten:

- Grobe Fehler (z.B. unsachgemäße Handhabung eines Messgerätes).
- Konstante Fehler (z.B. falsch geeichte Messinstrumente).
- Systematische Fehler (z.B. vorgehende Messuhr).
- Zufällige Fehler (unkontrollierbare Fehler, die in positiver wie negativer Richtung auftreten).

Grobe, konstante und systematische Fehler treten im AAI nicht auf, weil er auf Berechnungen und nicht direkten Messungen beruht. Die Daten könnten fehlerhaft sein; dies rechnen wir aber den zufälligen Fehlern zu, weil wir keine Angaben darüber haben, dass Daten einer Quelle systematisch in eine Richtung abweichen. Bei den zufälligen Fehlern unterscheiden wir drei Kategorien:

- Fehler von Betriebsdaten (Auslastung, Bestuhlung, Flugzeugtyp etc.): Die für den AAI kommerziell erworbenen Daten (siehe Kapitel 9) können Fehler enthalten, die im Kapitel 13.2.2 besprochen werden.
- Unvollständigkeit von Betriebsdaten: Einzelne Datensätze fehlen, somit treten Datenlücken auf. In der Fehleranalyse behandeln wir dies als Stichprobe und berechnen den Fehler, der daraus resultiert.
- Unschärfe von Betriebsdaten: Der Datensatz ist in diesem Fall zwar vorhanden und korrekt, aber unscharf. Dieser Fehler betrifft nur die Flugzeuge, wenn statt des Flugzeugtyps nur Flugzeugmodell oder Flugzeugfamilie bekannt sind (siehe Kapitel 5.5 und folgende).
- Ungenauigkeit von physischen Daten. Dies betrifft die folgenden Einflussfaktoren:

- Treibstoffverbrauch eines Flugzeugtyps, der im AAI mit piano-x (Kapitel 8.1.2) berechnet wird.
- Winglets und die damit verbundene Treibstoffersparnis.
- Triebwerke und dem damit verbundenen Triebwerksfaktor (Kapitel 8.1.4).

Da alle diese Fehler in die Kategorie zufällige Fehler fallen, wird für sie, wenn im Folgenden nicht anders ausgeführt, Normalverteilung mit symmetrischen Abweichungen in beide Richtungen angenommen.

13.1.2. Fehlerfortpflanzung

Das Endergebnis des AAI sind die Effizienzpunkte (EP) für eine Airline. Diese berechnen sich in Abhängigkeit der Einflussfaktoren F_i zu

$$(1) \quad EP = f(F_1, F_2, \dots, F_i)$$

Da die Fehler der Einflussfaktoren zufällig und voneinander unabhängig sind, können wir für den Gesamtfehler ΔEP die Gaußsche Fehlerfortpflanzung ansetzen:

$$(2) \quad \Delta EP = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial F_i}\right)^2 (\sigma F_i)^2}$$

13.1.3. Signifikanz

Im AAI erhalten Airlines absolute Effizienzpunkte, nach denen sie ihren Platz im Ranking einnehmen. Zwei Rankingplatzierungen sind signifikant verschieden, wenn sich ihre jeweils umgebenden Fehlerintervalle nicht überlappen. Die Fehlerintervalle entsprechen dem Konfidenzintervall bei einem Vertrauensniveau von 95%. In der Fehlerrechnung werden wir daher für jeden Einzelfehler und nachfolgend auch für den Gesamtfehler die Vertrauensgrenzen zu einem Vertrauensniveau von 95% ermitteln (entspricht der zweifachen Standardabweichung (Sigma)).

13.1.4. Ablauf der Fehlerrechnung

Damit sind die Grundlagen für die Fehlerrechnung des AAI gelegt. Diese folgt in diesem Kapitel bei jedem der sieben Einflussfaktoren dem folgenden Ablauf:

1. Was verursacht den Fehler eines Einflussfaktors? Der Fehler sowie seine Quelle werden hierbei diskutiert.

2. Wie groß ist der Fehler eines Faktors an der Quelle? Hier diskutieren wir, wie groß der Fehler eines Einflussfaktors im Extremfall und bei einer Standardabweichung von zwei Sigma ist.
3. Einzelfehler: Wie wirkt sich der Fehler auf die Effizienzpunkte der Airlines aus? Dazu berechnet der AAI die Effizienzpunkte zweimal: Einmal mit dem originalen Quellwert und einmal mit dem Quellwert, der um die beiden o.a. Fehler aus Schritt 2 abweicht. Die Differenz der Ergebnisse bedeutet für jeden Faktor den Maximalfehler und die Vertrauensgrenze bei zweifacher Standardabweichung. Diese Fehler für jeden einzelnen Einflussfaktor nennen wir Einzelfehler.
4. Gesamtfehler: Die Einzelfehler aller sieben Einflussfaktoren werden nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzungsformel (Kapitel 13.1.2) zum Gesamtfehler zusammengezählt. So erhalten wir den maximalen Gesamtfehler (Extremfall), und den Fehler, der bei 95% Vertrauensniveau die signifikante Unterschiedlichkeit zweier Airlines im Ranking bestimmt (Vertrauensgrenze).

13.2. Einzelfehler

Im Folgenden diskutieren wir die Einzelfehler, bevor diese in Abschnitt 13.3 zum Gesamtfehler verrechnet werden

13.2.1. Datenlücken

Der AAI deckt mit seinen Quellen ca. 95% aller Flüge der 130 größten Airlines der Welt ab. Während die Flüge dieser Airlines zu 100% über OAG erfasst werden, kommt es im weiteren Verfahren dazu, dass die OAG-Daten nicht mit den Daten für Auslastungsfaktoren etc. der anderen Datenbanken zugeordnet und angereichert werden können. Diese Flüge entfallen im AAI vollständig. Ein durch Lücken entstehender Fehler tritt in den folgenden Fällen auf:

1. Auslassung von ca. 7% aller Flüge, wegen fehlender Auslastungsfaktoren (PLF und CLF).
2. Ausscheiden von Flügen mit Triebwerken, die nicht in der ICAO-Datenbank erfasst sind (ca. 3% aller Flüge).

Es entsteht hierdurch nur ein vernachlässigbarer Fehler für den AAI. Dies ergibt sich wie folgt: Wir betrachten die Flüge einer Airline, die ohne Datenlücken vorliegen, als eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller Flüge dieser Airline, von denen einige dem AAI nicht bekannt sind (Datenlücke). Gesucht ist der Mittelwert der Effizienzpunkte über alle Flüge der Airline. Da wir nicht wissen können, welche Flüge fehlen, ist die Stichprobe der dem AAI bekannten Flüge zufällig gezogen. Dann ergibt sich der Standardfehler des Mittelwertes der Stichprobe S über eine Auswahl von N Flügen (Stichprobengröße) zu:

$$\Delta S = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Dabei ist σ die Standardabweichung des Mittelwertes der Effizienzpunkte. Da bei den großen Airlines des AAI regelmäßig eine Stichprobengröße von $N > 1000$ vorliegt, wird in der Folge der Standardfehler der Stichprobe der gesuchten mittleren Effizienzpunkte um mehr als eine Größenordnung kleiner als die Standardabweichung der Effizienzpunkte und damit vernachlässigbar.

13.2.2. Fehler in den Quellen für Betriebsdaten

Die Datenquellen des AAI für Betriebsdaten wie eingesetzter Flugzeugtyp, Bestuhlung, Auslastung etc. können mit Fehlern behaftet sein. Diese können durch Übermittlungsfehler seitens der Airlines verursacht werden, sowie durch Auswertungsfehler beim Einlesen und Aufbereiten der Daten durch die Datendienste.

Alle Betriebsdaten, die in die Berechnung des CO₂ je Nutzlastkilometer einfließen, speisen sich aus mindestens zwei Quellen (Kapitel 9.8). Damit sind Plausibilitäts- und Abweichungstests möglich. Diese führen in der Regel dazu, dass der größte Teil der Daten als fehlerfrei angenommen werden kann, während in kleinerem Umfang Fehler auftreten können, die ggf. im Folgenden bei jedem Einflussfaktor einzeln diskutiert werden.

13.2.3. Treibstoffverbrauch eines Flugzeugtyps

13.2.3.1. Was verursacht den Fehler?

Den Treibstoffverbrauch eines Flugzeugtyps auf einem Einzelflug berechnet der AAI mit piano-x. Ungenauigkeiten innerhalb der Software wirken sich damit direkt auf den AAI aus. Da die Software für jeden Flugzeugtyp gesonderte Datenbanken hinterlegt hat, ist davon auszugehen, dass etwaige Fehler nur bis zu einer definierten Obergrenze auftreten. Jenseits dieser Grenze sind dann keine Fehler mehr zu erwarten. Selbst Ausreißer dürften deswegen nicht auftreten und werden deswegen hier konservativ mit höchstens einem Fall in tausend angenommen.

13.2.3.2. Wie groß ist der Fehler?

Der Hersteller von Piano-x, Lissy Limited, gibt eine Genauigkeit bei der Bestimmung des Treibstoffverbrauchs von besser als einem Prozent an. 1% Fehler beim Treibstoffverbrauch kann maximal dann auftreten, wenn zwei Airlines jeweils nur einen Flugzeugtyp einsetzen, der sich von demjenigen der jeweils anderen Airline unterscheidet. Durch die größere Heterogenität der Flotten der

betrachteten Airlines beträgt der maximale Fehler im Treibstoffverbrauch beim Vergleich dieser Carrier untereinander etwa 0,2%.

Der Fehler, der durch die lineare Interpolation des Verbrauches bzgl. Distanzen und Nutzlast aus den Einzelflügen entsteht (siehe Kapitel 8.1.1) ist ein Näherungsfehler, der dann auftritt, wenn die zugrunde liegende Funktion nicht linear ist und daher die lineare Interpolation diese Funktion nicht richtig abbildet. Anhand einzeln durchgeführter Vergleiche zwischen mit piano-x interpolierten und mit piano-x genau berechneten Werten zeigt sich, dass der Interpolationsfehler mit 0,05% um eine Größenordnung kleiner als der Fehler von piano-x ist. Er wird deswegen im Weiteren vernachlässigt.

13.2.3.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Da bei der Software piano-x allenfalls von vereinzelten Ausreißern ausgegangen werden kann, kann den oben genannten Fehlern beim Treibstoffverbrauch ein Vertrauensniveau von 3σ bzw. 99,7% zugeordnet werden. Der Fehler im Treibstoffverbrauch von 0,2% übersetzt sich im AAI zu 0,2 Effizienzpunkten. Hierbei wurde die Fehlerverteilung approximiert durch mehrfache Berechnung der Effizienzpunkte unter Berücksichtigung des Fehlers im Treibstoffverbrauch und die Vertrauensgrenze zu einem Niveau von 95% ermittelt.

13.2.4. Unschärfe des Flugzeugtyps

13.2.4.1. Was verursacht den Fehler?

Die Angabe, welcher Flugzeugtyp auf einem Flug im AAI eingesetzt wurde, liefert OAG. In einigen Datensätzen ist die Bezeichnung des Flugzeugs unscharf, d.h. der AAI kann hier nicht ohne weitere Schritte direkt den Flugzeugtyp identifizieren. Die Datensätze aus OAG beinhalten für den Flugzeugtyp drei Genauigkeitsstufen:

	Genauigkeitsstufe I	Genauigkeitsstufe II	Genauigkeitsstufe III
Beschreibung	Flugzeugtyp eindeutig genannt	Nur Flugzeugfamilie genannt	Mehrere Flugzeugfamilien genannt
Beispiel Datensatz aus OAG	<ul style="list-style-type: none"> • Boeing 747-400 • Boeing 737-300 	<ul style="list-style-type: none"> • Airbus A330 • Boeing 737 Passenger • Boeing 747 (Passenger) 	<ul style="list-style-type: none"> • Airbus A318 /319 /320 /321 • ATR42 /ATR72
Anteil im AAI	83%	15%	2 %

Tabelle 42: Genauigkeitsstufen der Flugzeugbezeichnungen

Die Unschärfe betrifft die Genauigkeitsstufen II und III. Somit sind insgesamt ca. 17% aller Flüge im AAI hiervon betroffen.

13.2.4.2. Wie groß ist der Fehler?

Diese Frage wird auf den unterschiedlichen Genauigkeitsstufen beantwortet.

Flugzeugtyp Stufe I

Die Flugzeugbezeichnungen der Stufe I identifizieren einen genauen Flugzeugtypen, d.h. der AAI kann hier das jeweilige Flugprofil des Einzelfluges für die Treibstoffberechnung zuordnen. Somit entsteht hier kein Fehler im Sinne des AAI. Lediglich die physische Ungenauigkeit aus 13.2.3 kommt zum Tragen.

Flugzeugtyp Stufe II

Die Flugzeugbezeichnung auf dieser Stufe gibt nicht den eingesetzten Flugzeugtyp, sondern die Flugzeugfamilie an, der das eingesetzte Flugzeug angehört. Der AAI kann hier verschiedene Flugzeugtypen zuordnen, wie in der Tabelle dargestellt:

Flugzeugbezeichnung Stufe II	Mögliche Flugzeugtypen der Stufe I
Airbus A330	A330-200, A330-300
Airbus A340	A340-200, A340-300, A340-500, A340-600
ATR 72	ATR 72-200, ATR72-500
Boeing 737 Passenger	737-200, 737-300, 737-400, 737-500, 737-600, 737-700, 737-800, 737-900

Tabelle 43: Beispiele für mögliche Flugzeugbezeichnungen der Stufe I hinter denen der Stufe II

Die ungenaue Flugzeugbezeichnung erlaubt keine eindeutige Zuordnung zu einem Einzelflugprofil, da hier, je nach Beispiel, bis zu 8 Flugzeugtypen möglich sind. Da jeder einzelne dieser Flugzeugtypen eine andere Sitzplatzkapazität, Frachtkapazität, Winglets sowie Triebwerk besitzt, entstehen – zusätzlich zum Flugzeugtyp – weitere Fehler, die in den nächsten Abschnitten gesondert behandelt werden. Alle Angaben in diesem Unterkapitel sind so zu verstehen, dass hier der isolierte Fehler betrachtet wird, der nur auf den Flugzeugtyp zurückgeht. Dies bedeutet, dass für die anderen Faktoren angenommen wurde, dass diese konstant bleiben. Dies ist in der Realität nicht möglich, da z.B. mit der Änderung des Flugzeugtyps in der Regel auch eine Änderung der Flugzeuggröße und damit der Bestuhlung einhergeht. Aus diesem Grund wurden für die Rechnung die jeweiligen Sitz- und Frachtkapazität mit der Flugzeuggröße skaliert und Winglets und Triebwerke mit Korrekturfaktoren angepasst, so dass der Einfluss dieser Faktoren auf die Änderung des Flugzeugtyps wieder hinausgerechnet wurde. So konnte die gewünschte Änderung im Treibstoffverbrauch durch unschärfebedingte Änderung des Flugzeugtyps ceteris paribus berechnet werden.

Fehlerminimierung durch Flottennäherung

Betroffen sind von dieser Unschärfe 15% aller Flüge im AAI. Der Fehler würde abhängig vom jeweiligen Flugzeugtyp im Extremfall bis zu 20% Unterschied im Treibstoffverbrauch betragen, im Regelfall aber ca. 3-5% wenn der Fehler nicht reduziert würde. Der AAI hat aber auf Stufe II Daten zur Verfügung, die eine Reduktion des Fehlers erlauben. Für diese Flüge verwendet der AAI eine

Zuordnungstabelle, in der den Flugzeugbezeichnungen aus Stufe II alle möglichen Flugzeugtypen der Stufe I zugeordnet sind (Tabelle 43). Für den Fall, dass einer der Flüge im AAI einen unscharfen Flugzeugtypen der Stufe II enthält, wird die Berechnung der spezifischen CO₂ - Emissionen (Kapitel 8.1) des Fluges im AAI für alle Flugzeugtypen der Stufe I, die sich hinter der Bezeichnung der Stufe II verbergen können, parallel mit den Parametern des Fluges (Sitzkapazität, Frachtkapazität, Auslastung Passagiere und Fracht) durchgeführt. Für das Beispiel A330 wären als Ergebnis dieses Schrittes zwei Werte für CO₂ je Nutzlastkilometer, einer für den A330-200 und einer für den A330-300. Anschließend mittelt der AAI die spezifischen CO₂ - Emissionen dieser Modelle gewichtet nach ihrem Vorkommen in der Flotte der betrachteten Airline. Für das oben genannte Beispiel bedeutet das folgendes: existieren in der Flotte einer Airline 20 Airbus A330-200 und 5 Airbus A330-300, rechnet der AAI mit der Flugzeugtypangabe aus OAG „A330“ einen CO₂-Wert aus, der zu einem Fünftel mit dem CO₂ Wert des A330-300 und zu vier Fünftel mit dem CO₂-Wert des A330-200 besteht. Existiert dagegen kein Airbus A330-300, besteht der CO₂ Wert nur aus dem des A330-200, wodurch der Fehler entfällt.

Dieses Verfahren reduziert den maximalen Fehler des Treibstoffverbrauchs auf 0,5%. Dies ist bei 13% aller Flüge möglich. Die große Fehlerreduktion ist auch deswegen möglich, weil in vielen Fällen die Flotte der jeweiligen Airline nur aus einem Flugzeugtyp besteht, der zu der in OAG benannten Familie passt. Der verbleibende Fehler bei mehreren Flugzeugtypen innerhalb einer Familie und Airline ist jetzt statistischer Natur und würde sich in der Praxis dann vollständig aufheben, wenn bei großer Fluganzahl alle Flugzeuge der Flotte gleichviel fliegen, da sich dann die Fehler der Flottennäherung bei einem einzelnen Flug mit denen der anderen Flüge verrechnen. Da aber die Anzahl der Flüge mit einzelnen Flugzeuge auf der Stufe II nicht bekannt sind und Stichprobenstatistik hier nicht weiter eingehen soll, rechnet der AAI konservativ und gibt die Vertrauensgrenze bei zweifacher Standardabweichung in diesem Fall mit 0,4% des Treibstoffverbrauchs an.

Flugzeugbezeichnung Stufe III

Die Flugzeugbezeichnung auf dieser Stufe gibt nicht den eingesetzten Flugzeugtyp oder die Familie (wie bei Stufe II), sondern mehrere Flugzeugfamilien an. Auch hier kann der AAI verschiedene Flugzeugtypen zuordnen (siehe Tabelle 44).

Zusätzlich weisen die betroffenen Datensätze eine zusätzliche Unschärfe hinsichtlich der Sitzplatzkapazität, der Frachtkapazität, der Winglets sowie den Triebwerken auf, die über die aus Stufe II noch einmal hinausgeht. Die Flugzeugtypen, die sich hinter der Bezeichnung der Stufe III verbergen können, lassen eine größere Spanne an Werten an oben genannten Faktoren als auf Stufe II. Der jeweilige Datensatz enthält also eine durchschnittliche Bestuhlung, Frachtkapazität usw. (z.B. 150 Sitze Airbus A318 /319 /320 /321).

Betroffen sind hiervon 2% der Flüge des AAI. Der dabei entstehende Fehler würde, abhängig vom jeweiligen Flugzeugtyp, im Extremfall etwa 25% Unterschied im absoluten Treibstoffverbrauch betragen, wenn der Fehler nicht reduziert würde.

Auch hier reduziert der AAI den Fehler mittels paralleler Berechnung aller Flugzeugtypen der Stufe I, die sich hinter der Bezeichnung aus Stufe III verbergen können, und mittelt das CO₂ je Nutzlastkilometer gewichtet nach Vorkommen der einzelnen Flugzeugs in der jeweiligen Flotte. Daraus ergibt sich folgender maximaler Fehler Δ im Treibstoffverbrauch:

Flugzeugbezeichnung Stufe III	Mögliche Flugzeugtypen der Stufe I	Δ Treibstoffverbrauch maximal
Airbus A318 /319 /320 /321	Airbus A318, Airbus A319, Airbus A320-200, Airbus A321-100	5%
Avro RJ70 /RJ85 /RJ100	Avro RJ70, Avro RJ85, Avro RJ100	13%
Embraer RJ 135 /140 /145	Embraer RJ135, Embraer RJ140, Embraer RJ145	16%

Tabelle 44: Abweichungen im Treibstoffverbrauch auf Stufe III nach Korrektur

Dieses Verfahren reduziert den maximalen Fehler des Treibstoffverbrauchs auf 16%. Bei der Hälfte der Fälle (ca. 1% aller Flüge im AAI) reduziert sich der Fehler im Treibstoffverbrauch damit auf 4%. Die Vertrauensgrenze bei zweifacher Standardabweichung liegt in diesem Fall bei 3% des Treibstoffverbrauchs.

13.2.4.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Wie in 13.1.4 beschrieben vergleicht der AAI den fehlerfreien Treibstoffverbrauch eines Fluges mit einem, der um den Fehler abweicht und vergleicht die Ergebnisse bei den Effizienzpunkten:

Stufe	Häufigkeit, unkorrigierte Werte	Fehler nach Korrektur [Effizienzpunkte]	Häufigkeit, korrigierte Werte
Stufe I	83%	0	83%
Stufe II	15%	0,4	13%
Stufe III	2%	3	1%
Rest	0%	>3	3%

Tabelle 45: Auswirkung des Fehlers im Flugzeugtyp auf die Effizienzpunkte

Mit den Werten in der Tabelle zeigt sich, dass ein resultierender Fehler im AAI-Ergebnis von $\pm 0,4$ Effizienzpunkten der für die Signifikanz der Ergebnisse notwendigen Vertrauensgrenze zu einem Niveau von 96% entspricht (Summe Stufe I und Stufe II).

Die ungenaue Flugzeugbezeichnung zieht weitere Ungenauigkeiten in Bezug auf Sitzplatzkapazität, Frachtkapazität, eingesetztes Triebwerk sowie Winglets mit sich. Diese entfallen, wenn die

Ungenauigkeit des Flugzeugtyps entfällt. Die Fehler werden in den folgenden Kapiteln einzeln beschrieben.

13.2.5. Sitzplatzkapazität

13.2.5.1. Was verursacht den Fehler?

Auch die Sitzplatzkapazität ermittelt der AAI in einem mehrstufigen Verfahren. Dabei können Fehler auftreten, weil nicht für alle Flüge die Daten in der höchsten Auflösung vorliegen. Der AAI hat für die Kapazitäten mehrere Datenquellen zur Verfügung und führt Konsistenzchecks durch. Bei unscharfem Flugzeugtyp (siehe 13.2.3.1) kann es auf Stufe II zu Fehlern kommen, wenn in dem Aufteilungsverfahren, mit dem die Flotte der Airline nach ihrer Zusammensetzung gewichtet das fragliche Flugzeug des jeweiligen Fluges abbildet (siehe Flottennäherung 13.2.4.2), mit einer in der Quelle scharf bekannten Bestuhlung kombiniert wird.

Auf der Stufe III sind die Bestuhlungen in der Quelle nur noch als Standardwert angegeben, der damit ebenfalls gegenüber der Realität unscharf ist.

13.2.5.2. Wie groß ist der Fehler?

Auf der Stufe I (83% aller Flüge im AAI) ist die Sitzplatzkapazität genau bekannt, und die Daten können als fehlerfrei angenommen werden. Auf der Stufe II (15% aller Flüge im AAI) ist die Sitzplatzkapazität in der Datenquelle scharf angegeben, der Flugzeugtyp dafür aber nur unscharf bekannt. Der Fehler vor der Korrektur beträgt maximal ca. $\pm 4\%$ -Punkte bei der Bestuhlung. Dies zeigte sich beim Vergleich der Datenquellen, in der eine Quelle den scharfen Wert, die andere den unscharfen Wert bei den Flugzeugtypen hatte. Durch die beim Fehler des Faktors Flugzeugtyp beschriebene Flottennäherung kann der Fehler auf der Stufe II auf $\pm 1\%$ -Punkt bei der Bestuhlung reduziert werden. Dies ist anwendbar in 13% aller Flüge des AAI. Bei angenommener Normalverteilung der Fehler liegen 95% aller Flüge innerhalb einer Vertrauensgrenze von $\pm 0,7\%$ -Punkten der Passagierkapazität. Diese $\pm 0,7\%$ -Punkte Fehler bei der Bestuhlung gehen bei der gegebenen Elastizität des Faktors Bestuhlung (siehe Kapitel 12) über in 0,6% Fehler beim Treibstoffverbrauch (95%-Konfidenzintervall).

Auf der Stufe III (2% aller Flüge im AAI) treten Sonderfälle auf bei den Flugzeugfamilien A320, A318-321, Embraer 135/140 und Avro 70 – 100. Der maximale Fehler, der sich hier durch eine Kombination dieser Familien mit unscharfer Standardbestuhlung ergibt, wurde im Rahmen dieser Analyse nicht genauer berechnet. Der resultierende Fehler im Treibstoffverbrauch dürfte aber bei maximal ca. 20% liegen und reduziert sich auf etwa 10% in 1% aller Flüge des AAI. Die Vertrauensgrenze zu zwei σ Standardabweichung dürfte dann bei ca. 6% im Treibstoffverbrauch liegen.

13.2.5.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Auf der Stufe I liegt kein Fehler vor, daher ergibt sich auch keine Auswirkung auf die Effizienzpunkte. In der Stufe II und III übersetzen sich die Fehler im Treibstoffverbrauch direkt in Effizienzpunkte. Dies ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Stufe	Häufigkeit, unkorrigierte Werte	Fehler nach Korrektur [Effizienzpunkte]	Häufigkeit, korrigierte Werte
Stufe I	83%	0	83%
Stufe II	15%	0,6	13%
Stufe III	2%	6	1%
Rest	0%	>6	3%

Tabelle 46: Auswirkung des Fehlers bei der Sitzplatzkapazität auf die Effizienzpunkte

In der Summe der Stufen I und II liegt der Fehler somit bei einem Vertrauensniveau von ca. 96% innerhalb einer Vertrauensgrenze von $\pm 0,6$ Effizienzpunkten.

13.2.6. Frachtkapazität

13.2.6.1. Was verursacht den Fehler?

Analog zu den Sitzplatzkapazitäten können auch die Frachtkapazitäten im AAI mit Fehlern behaftet sein. Da die Datenlage gleich ist, erfolgt das Vorgehen in diesem Kapitel daher weitgehend analog zum Kapitel 13.2.5.

Konsistenzcheck mit Passagierkapazität

Neu hinzu kommt, dass aufgrund der vorhandenen Daten für Fracht- und Passagierkapazität weitere Konsistenzchecks durchgeführt werden konnten: Bei jedem Flug prüft der AAI, ob bei hypothetischer Vollauslastung die angegebene Fracht- und Passagierkapazität die maximale Nutzlast des jeweiligen Flugzeugs auf diesem Flug überschritt. Wenn dies der Fall war, wurde der Datensatz aus dem AAI entfernt. Dies war in ca. 3% aller Flüge der Fall. Der Fehler, der durch das Auslassen dieser Datensätze entsteht, ist vernachlässigbar (siehe Kapitel 13.2.1)

Weiterhin ist es möglich, auf der Stufe III weitere Flüge auszusortieren, da hier in ca. 25% aller Fälle, also bei ca. 0,5% aller Flüge des AAI, die Datenquellen den unplausiblen Wert von Null auswiesen.

13.2.6.2. Wie groß ist der Fehler?

Analog zur Passagierkapazität kann der Fehler auf der Stufe I zu Null angenommen werden. Auf der Stufe II (15% aller Fälle im AAI) beträgt der Fehler vor der Korrektur ca. 5% und reduziert sich nach

der Korrektur auf etwa 2%-Punkte bei der Frachtkapazität. Dies ist bei 12% aller Flüge des AAI möglich. Die Vertrauensgrenze, die zum Vertrauensniveau von 95% gehört, liegt bei ca. 1,6%-Punkten Frachtkapazität. Diese 1,6% Punkte Fehler bei der Frachtkapazität bedeuten ca. 0,1% Fehler im Treibstoffverbrauch. Dieser geringe Fehler im Verbrauch bei dem hohen Eingangsfehler der Frachtkapazität liegt in der geringen Elastizität dieses Einflussfaktors begründet (siehe Kapitel 12). Die Fehler der Stufe III wurden wiederum nur anhand nicht vollständiger Analysen abgeschätzt, dabei ergaben sich Werte von $\pm 10\%$ im Treibstoffverbrauch.

13.2.6.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Auf der Stufe I liegt kein Fehler vor, daher gibt es hier auch keine Auswirkung auf die Effizienzpunkte. In der Stufe II und III übersetzen sich die Fehler im Treibstoffverbrauch direkt in Effizienzpunkte. Dies ist in Tabelle 47 dargestellt.

Stufe	Häufigkeit, unkorrigierte Werte	Fehler nach Korrektur [Effizienzpunkte]	Häufigkeit, korrigierte Werte
Stufe I	83%	0	83%
Stufe II	15%	0,1	13%
Stufe III	2%	10	1%
Rest	0%	>10	3%

Tabelle 47: Auswirkung des Fehlers der Frachtkapazität auf die Effizienzpunkte

In der Summe der Stufen I und II liegt der Fehler somit bei einem Vertrauensniveau von ca. 96% innerhalb der Vertrauensgrenzen von $\pm 0,1$ Effizienzpunkten.

13.2.7. Operating Empty Weight (OEW)

13.2.7.1. Was verursacht den Fehler?

Bei der OEW-Korrektur setzt der AAI ein Gewichtsäquivalent von 60 kg je angebotenem Sitzplatz an (4.10.6; nicht zu verwechseln mit dem angenommenen durchschnittlichen Passagiergewicht von 100 kg). Dieser Durchschnittswert ist mit einem Fehler behaftet, da Menge und Qualität der einbezogenen Kabinenausstattung (Sitze, Toiletten, Bordküche etc. sowie Serviceartikel wie Essen, Medien etc.) der individuellen Ausgestaltung der Fluggesellschaften obliegt.

13.2.7.2. Wie groß ist der Fehler?

Der AAI schätzt den Fehler bei der OEW-Korrektur auf ± 30 kg und stützt sich dabei auf eigene Erfahrungswerte und Literatur⁶². Des Weiteren geht der AAI von einem normal verteilten Fehler um 60 kg aus mit einer Standardabweichung Sigma von 15 kg. Damit entspricht der Fehler von ± 30 kg dem hier im Allgemeinen verwendeten Vertrauensniveau von 2 Sigma bzw. 95%. Die zugrunde liegende Gaußsche Fehlerverteilung berücksichtigt somit auch Ausreißer nach oben und unten. So ist es beispielsweise denkbar, dass eine Fluggesellschaft den Kabinenraum, der durch eine Reduzierung der Bestuhlung frei wird, für zusätzliche Innenausstattung und Equipment nutzt, was im Extremfall sogar zu einem höheren Gesamtgewicht führen könnte als die Kabinenkonfiguration mit Standardbestuhlung.

13.2.7.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Das fehlerbehaftete Gewichtsäquivalent eines Sitzplatzes von 60 ± 30 kg übersetzt sich in einen näherungsweise normal verteilten Fehler in den Effizienzpunkten, dessen Verteilung der AAI durch wiederholte Berechnung der Effizienzpunkte unter Variation des Eingangsfehlers approximiert. Die Vertrauensgrenze zu einem Vertrauensniveau von 95% entspricht dabei $\pm 0,2$ Effizienzpunkten und wird bei jedem Flug, für den der AAI das CO₂ pro Nutzlastkilometer berechnet, berücksichtigt.

13.2.8. Triebwerke

13.2.8.1. Was verursacht den Fehler?

Die Datenquelle JP Airline Fleets gibt detailliert Auskunft darüber, mit welchen Triebwerken die Flugzeuge der Flotten der Airlines bestückt sind. Der AAI bestimmt den Triebwerksfaktor jedes Fluges über die Flottennäherung (13.2.4.2), was einen Fehler nach sich ziehen kann, wenn das Triebwerk innerhalb der Flotte einer Airline nicht scharf zugeordnet werden kann. Ein weiterer Fehler tritt auf, wenn das Triebwerk an sich nicht bekannt ist. Dies gilt für einen Teil der Turboproptriebwerke (2,5% aller Flüge im AAI) und Triebwerke von russischen Flugzeugen (0,5% aller Flüge im AAI) (siehe Kapitel 5.3).

Der Triebwerksfaktor deckt zwei Komponenten ab: SFC und NO_x-Emissionen. Er wird bei der Berechnung noch korrigiert um die Faktoren Luftwiderstand und Gewicht des Triebwerks. Da diese als auch die NO_x-Komponente klein sind gegenüber dem SFC-Teil, werden wir im Folgenden diese Fehler vernachlässigen und nur den Fehler bei der Bestimmung des SFC eines Triebwerks diskutieren. Den Triebwerksfaktor für ein Triebwerk (vgl. 8.1.4) bestimmt der AAI auf Basis der ICAO Engine Emission Database. Diese enthält unter anderem für jedes Triebwerk Daten für den Fuel Flow bei verschiedenen Schubeinstellungen. Diese Daten sind industrieseitig seit vielen Jahren dokumentiert und werden immer wieder aktualisiert. Der AAI geht davon aus, dass diese Daten nur geringe Fehler

⁶² Wit, R.N.C. and Dings, J.M.W., 2002

enthalten. Da sich aber diese Fehler für alle Airlines gleich auswirken, die das jeweilige Triebwerk einsetzen, bleibt nur der theoretische Fehler, dass verschiedene Airlines verschiedene Triebwerke mit SFC-Fehlern in verschiedene Richtungen in unterschiedlicher Häufigkeit einsetzen. Da aber die Zahl der Kombinationsmöglichkeiten groß ist und hier kein systematischer Fehler angenommen werden muss, kann der resultierende mögliche Fehler als vernachlässigbar klein angenommen werden.

13.2.8.2. Wie groß ist der Fehler an der Quelle?

Die Boeing Fuel Flow Method 2, die der AAI zur Bestimmung des Triebwerkfaktors heranzieht, bildet den Fuel Flow im Reiseflug eventuell nicht präzise ab, was einen Fehler in den Effizienzpunkten nach sich ziehen kann. Da dieser eventuelle Fehler für alle Triebwerke und daher für alle Airlines gleich ist und den relativen Abstand der Effizienzpunkte der Airlines nicht ändert, wird er im Folgenden nicht berücksichtigt.

Der maximale Fehler im Triebwerksfaktor könnte aber entstehen, wenn das bei der Berechnung angenommene Triebwerk maximal von dem tatsächlichen Triebwerk des Fluges abweicht. Aus den in Kapitel 8.1.4 genannten Triebwerksfaktoren berechnet sich leicht, dass die maximale Abweichung beim Triebwerksfaktor ca. 30% betragen kann. Die Standardabweichung der Triebwerksfaktoren von im AAI detailliert bekannten Flugzeug-Triebwerkskombination liegt bei 3%. Da wir annehmen, dass der Fehler normal verteilt ist, setzen wir diesen auch für die 3% der Flüge mit unbekanntem Triebwerken an. Wir gehen außerdem davon aus, dass diese Abweichung auch für die unscharfen Flugzeug-Triebwerkskombination gilt.

Der AAI kann über die Flottennäherung (13.2.4.1) den Fehler erheblich reduzieren. Jeder Flugzeugtyp wird in der Praxis nur mit einigen wenigen unterschiedlichen Triebwerkstypen bestückt. Die Flottennäherung reduziert den maximalen Fehler des Triebwerkfaktors auf 0,2%. Dies gilt für alle Flüge im AAI, unabhängig von der Erfassungsstufe I, II oder III, inbegriffen des Fehlers, der aus der Unkenntnis für einige russische Triebwerke entsteht. Die große Fehlerreduktion ist deswegen möglich, weil in vielen Fällen die Flotte der jeweiligen Airline nur einen Flugzeugtyp hat, der zu der in OAG benannten Familie passt und zudem dieser Flugzeugtyp laut JP-Airline Fleets nur mit einem Triebwerkstyp bestückt ist, so dass hier das Triebwerk eindeutig bestimmt ist. Der verbleibende Fehler bei mehreren Flugzeug-Triebwerks-Kombinationen innerhalb der Flotte einer Airline ist statistischer Natur und würde sich in der Praxis dann vollständig aufheben, wenn bei großer Fluganzahl alle Flugzeuge der Flotte gleich häufig fliegen, da sich dann die Fehler bei der Triebwerksbestimmung bei einem einzelnen Flug mit denen der anderen Flüge ausgleichen. Da aber der AAI keine Daten zu den Verteilungen der Flüge mit unterschiedlichen Flugzeug-Triebwerkskombination innerhalb der Flotte einer Airline hat, bestimmt der AAI die Vertrauensgrenze, die zum Vertrauensniveau von 95% gehört, konservativ zu 0,15% des Triebwerksfaktors.

13.2.8.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Der oben konservativ bestimmte Fehler des Triebwerksfaktors von 0,15% übersetzt sich zu einer Vertrauensgrenze von $\pm 0,15$ Effizienzpunkten bei einem Vertrauensniveau von 95%.

13.2.9. Winglets

13.2.9.1. Was verursacht den Fehler?

Für die Winglets greift die gleiche Problematik wie bei der Sitzplatz- sowie Frachtkapazität: Ist der Flugzeugtyp unscharf, kann der AAI auch nicht eindeutig bestimmen, ob das Flugzeug auf dem jeweiligen Flug mit Winglets bestückt war oder nicht. Ist der Flugzeugtyp dagegen scharf, kann der AAI Flugzeuge mit Winglets und Flugzeuge ohne Winglets eindeutig unterscheiden.

13.2.9.2. Wie groß ist der Fehler an der Quelle?

Auf Stufe I der Genauigkeit des Flugzeugtyps (13.2.4.1) ist wegen der o.g. eindeutigen Zuordnung der Fehler im Treibstoffverbrauch 0. Auf Stufe II und III beträgt der maximale Fehler im Treibstoffverbrauch, der durch die Winglets entstehen kann, 3%. Mittels der Korrektur durch Flottennäherung (vgl. 13.2.4.2) reduziert sich bei 13% der Flüge der Fehler auf 0,2% maximal im Treibstoffverbrauch. Die Vertrauensgrenze, die hier zum Vertrauensniveau von 95% gehört, liegt bei ca. 0,1%-Punkten und bedeuten somit ca. 0,1% Fehler im Treibstoffverbrauch.

13.2.9.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Auf der Stufe I liegt kein Fehler vor, daher ergibt sich auch keine Auswirkung auf die Effizienzpunkte. In der Stufe II und III übersetzen sich die Fehler im Treibstoffverbrauch direkt in Effizienzpunkte. Dies ist in Tabelle 48 dargestellt.

Stufe	Häufigkeit, unkorrigierte Werte	Fehler im Treibstoffverbrauch nach Korrektur	Fehler nach Korrektur (Effizienzpunkte)	Häufigkeit, korrigierte Werte
Stufe I	83%	0%	0	83%
Stufe II	15%	0,1%	0,1	12%
Stufe III	2%	3%	3	1%
Rest	0%	>3%	>3	4%

Tabelle 48: Auswirkungen des Fehlers Winglets auf die Effizienzpunkte

In der Summe der Stufen I und II liegt der Fehler somit bei einem Vertrauensniveau von ca. 96% innerhalb einer Vertrauensgrenze von $\pm 0,1$ Effizienzpunkten.

13.2.10. Auslastungsfaktoren für Passagiere und Fracht

13.2.10.1. Was verursacht den Fehler?

Die Passagier- und Frachtauslastungen aller Flüge ermittelt der AAI in einem mehrstufigen Verfahren (Kapitel 5.7). Dabei können theoretisch Fehler auftreten, weil nicht für alle Flüge die Daten in der maximalen Auflösung vorliegen, sondern Unschärfen beim Flugzeugtyp oder CityPair auftreten. Die Airline ist hingegen in allen Fällen scharf bestimmt. Der AAI hat für die Auslastungsfaktoren (wie für alle anderen Faktoren auch) mehrere Datenquellen zur Verfügung, so dass Konsistenzchecks durchgeführt werden konnten. Da die Analyse sowohl für die Passagier- als auch Frachtauslastung bei gleicher Datenstruktur gleich ist, werden diese im Folgenden zusammen diskutiert.

Generell zeigt sich, dass es zwischen allen drei Datenquellen bei der Auslastung (Airline Data, ICAO TFS und IATA WATS) Abweichungen gibt. Diese werden wahrscheinlich durch Übermittlungsfehler seitens der Airlines verursacht, sowie durch Auswertungsfehler beim Einlesen und Aufbereiten der Daten durch die Datendienste. Wir betrachten hier nur die Abweichungen für den Durchschnittswert einer Airline während eines vollständigen Berichtsjahres über alle CityPairs. Da die Auslastungen der einzelnen Flüge (zusammen mit den Frachtauslastungsfaktoren) als lineare Faktoren nur in der ersten Potenz in die CityPair Effizienzpunkte eingehen und ohne Gewichtung zu den globalen Effizienzpunkten einer Airline gemittelt werden, entsteht bei der Betrachtung des globalen Jahresmittels anstatt einzelner Flüge kein weiterer Fehler für die globalen Effizienzpunkte einer Airline.

13.2.10.2. Wie groß ist der Fehler an der Quelle?

Wenn man die drei Datenquellen statistisch analysiert, so zeigt sich, dass die zweifache Standardabweichung bei 0,8%-Punkten für die Passagierauslastung und 0,9%-Punkten für die Frachtauslastung liegt.

13.2.10.3. Auswirkungen auf die Effizienzpunkte

Die statistisch bestimmten Abweichungen von 0,8%-Punkten bei der Passagierauslastung übersetzen sich in ca. 0,7%-Punkte Treibstoffverbrauch und nachfolgend 0,7 Effizienzpunkte für eine Airline. Hier kommt zum Tragen, dass eine Erhöhung sowohl der Passagier- als auch der Frachtauslastung zwar in vollem Umfang die Nutzlast erhöht, aber nur in etwas geringerem Maße die CO₂-Emissionen pro Nutzlastkilometer senkt, da mehr Nutzlast auch mehr Treibstoff benötigt. Auf gleiche Weise bestimmt sich der Fehler der Effizienzpunkte durch Fehler in der Frachtauslastung zu ca. 0,8 Effizienzpunkten. Beide Fehler markieren die Vertrauensgrenzen zu einem Vertrauensniveau von 95%, mit dem im vorigen Abschnitt der Fehler der Auslastungen angesetzt wurde.

13.3. Gesamtfehler

Die Einzelfehler aus den obigen Abschnitten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Sie sind in der letzten Zeile nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzungsformel (siehe 13.1.2) zum Gesamtfehler zusammengezählt.

Fehler	Vertrauensgrenze, [Effizienzpunkte]
Treibstoffverbrauch Flugzeugtyp	±0,2
Unschärfe Flugzeugtyp	±0,4
Unschärfe Sitzplatzkapazität	±0,6
Unschärfe Frachtkapazität	±0,1
Unschärfe Winglets	±0,1
Unschärfe OEW	±0,2
Unschärfe Triebwerk	±0,15
Fehler Passagierauslastung	±0,7
Fehler Frachtauslastung	±0,8
Gesamt (Gaußsche Fehlerformel)	±1,3

Tabelle 49: Vertrauensgrenzen beim 95%- Konfidenzintervall

Die Berechnungen des AAI für die Airlines unterliegen nach der obigen Analyse einem mittleren Gesamtfehler von ± 1,3 Effizienzpunkten bei einem Vertrauensniveau von 95%. 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 (siehe Kapitel 4). Dies sind die Faktoren CDA und langsamer Fliegen, Alter und Wartung, sowie OEW. Für diese schätzen wir vorsichtig zusammen etwa 0,2%-Punkte als Fehler bei den Effizienzpunkten ab. Da bei diesen nicht bekannt ist, ob sie zufällig und unabhängig sind, müssen wir sie konservativ mit ihren Absolutbeträgen zum übrigen Fehler hinzu rechnen.

So ergibt sich ein Gesamtfehler des AAI-Rankings von ±1,5 Effizienzpunkten. Da dabei mit einem Vertrauensniveau von 95% gerechnet wurde, kann der AAI Airlines signifikant unterscheiden und damit ranken, deren Effizienzpunkte sich mehr als um 1,5 Effizienzpunkte voneinander unterscheiden.

13.4. Fehlerdarstellung im AAI

Die in den vorigen Abschnitten bestimmten Fehler werden transparent im AAI ausgewiesen. Dabei gilt der Grundsatz, dass alle Fehler, die sich spezifisch einer Airline zuordnen lassen und den normalen Gesamtfehler überschreiten einzeln durch Kennzeichnung ausgewiesen werden.

Dabei verwendet der AAI folgenden Ansatz:

Fehler (Ranking Punkte)	Darstellung in AAI Ergebnisgrafik
≤ ± 1,5	Allgemeiner Verweis für alle Airlines in Grafikttext
> ± 1,5 ≤ ± 3	Gesonderter Hinweis für betroffene Airlines durch einen Asterix („*“)
> ± 3	Gesonderter Hinweis für betroffene Airlines durch zwei Asterix („**“)

Tabelle 50: Darstellung der Fehler auf das AAI Global Ranking

14. Literaturverzeichnis

- AIRBUS (2002) : Getting to grips with aircraft performance. Airbus Flight Operations Support & Line Assistance customer Service, Blagnac 2002.
- BAUGHUM, S.L./ TRITZ, T.G./ HENDERSEN, S.C./ PICKETT, D.C. (1996): Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis. NASA Contractor Report 4700.
- BROCKHAGEN (1995): Der Flugverkehr der Stadt Köln und das Klimabündnis. Wuppertal Papers Nr. 43, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- CAO, Y./ SUN, D./ DELAURENTIS, D. (o. J.): 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 (01.03.11)
- CFM INTERNATIONAL (2007): Keep it simple, dummy. Präsentation von CFM international, New York 2007 www.airfinancejournal.com/docs/Basics-of-a-jet-engine.pdf (01.03.11)
- CIVIL AVIATION EMISSIONS (CAA) (2010). Aircraft Engine Emissions. ICAO Engine Emissions Data base.
- DATA BASE PRODUCTS (2011): Produktbeschreibung von der Data Base homepage, aufgerufen am 23.02.2011 (www.airlinedata.com/CurrentData.htm)
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD AND RURAL AFFAIRS (2009): Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. London, 2009.
- DEUTSCHE BANK (2005): Ausbau von Regionalflughäfen: Fehlallokation von Ressourcen, Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen 337, 3. November 2005
- DEUTSCHE FLUGSICHERUNG (o. J.): Continuous Descent Approach, PowerPoint Präsentation der Deutschen Flugsicherung 2008
- DEUTSCHES ZENTRUM FUER LUFT- UND RAUMFAHRT (2010): Low Cost Monitor 2/2010. Köln, 2010.
- EC 2005: Gemeinschaftliche Leitlinien für die Finanzierung von Flughäfen und die Gewährung staatlicher Anlaufbeihilfen für Luftfahrtunternehmen auf Regionalflughäfen (2005/C 312/01)

ELECTROLUX (2007): Sustainability Report 2007. Stockholm, 2007.

ELFAA (2004), Liberalization of European Air Transport: The Benefits of Low Fares Airlines to Consumers, Airports, Regions and the Environment, European Low Fares Airlines Association, Brüssel 2004.

EYERS, C. J./ NORMAN, P./ MIDDEL, J/ PLOHR, M./ MICHOT, S./ ATKINSON, K./ CHRISTIN, R.A. (2004): AERO2K global aviation emissions inventories for 2002 and 2025. Farnborough (UK): QinetiQ Ltd.

GIERENS, K. / SAUSEN, R. / SCHUMANN, U. (1999): A Diagnostic Study of the Global Distribution of Contrails Part II: Future Air Traffic Scenarios. – In: Theoretical and Applied Climatology, 63, S. 1-9.

GMELIN, T.C./ HÜTTIG, G./ LEHMANN, O. (2008): Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale bei Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Triebwerkstechnik sowie der absehbaren mittelfristigen Entwicklungen (FKZ UM 07 06 602/01). Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

GREENER BY DESIGN (2005): Mitigating the Environmental Impact of Aviation: Opportunities and Priorities. Royal Aeronautical Society, 2005.

IATA (2010): Fact Sheet: Industry Statistics 2010. Download von der IATA webseite www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/industry-facts-december-10.pdf

ICAO (2010): Carbon Emissions Calculator. Version 3, ICAO 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.

KIM, B.Y./ FLEMING, G.G./ LEE, J.J./ WAITZ, I.A./ CLARKE, J.-P./ BALASUBRAMANIAN, S./ MALWITZ, A./ KLIMA, K./ LOCKE, M./ HOLSCLAW, C.A./ MAURICE, L.Q./ GUPTA, M.L. (2007): System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. Transportation Research Part D12. S. 325-346.

KING, D./ WAITZ, I.A. (2005): Assessment of the effects of operational procedures and derated thrust on American Airlines B777 emissions from London's Heathrow and Gatwick airports. The Partnership for Air Transportation Noise and Emission Reduction. <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/drate-rpt.pdf>

LEE, D. S./ FAHEY, D. W/ FORSTER, P. M./ NEWTON, P. J./ WIT, R.C./ LIM, L. L./ OWEN, B./ SAUSEN, R. (2009): Aviation and global climate change of the 21st century. – In: Atmospheric Environment. doi:10.1016/j.atmosenv. 2009.04.024

LE FIGARO (2010): Air France a porté plainte contre Ryanair.
<http://www.lefigaro.fr/societes/2010/03/11/04015-20100311ARTFIG00389-air-france-veut-porter-plainte-contre-ryanair-.php> (10.03.11)

LISSYS LTD: Piano x. <http://www.lissys.demon.co.uk/piano-x-guide.pdf> (02.03.11)

LUFTHANSA 2002: Deutsche Lufthansa AG, Konzern Umweltkommunikation, FRA CI/B
Kapitel: Treibstoff, PowerPoint Präsentation, Frankfurt 2002.

NILSSON, J. H. (2009): Low-cost Aviation. – In: GÖSSLING, S./ UPHAM, P. (Hrsg.): Climate Change and Aviation. Issues, Challenges and Solutions. Sterling. S. 113-129.

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

OFFICIAL AIRLINE GUIDE. PRESS RELEASES.
http://www.oag.com/oagcorporate/press_releases.html (26.02.11)

OFFICIAL AIRLINE GUIDE. PRESS RELEASES. Growth in low cost sector continues to soar.
Download von der OAG Webseite (28.02.11)

PEETERS, P.M./ MIDDEL, J./ HOOLHORST, A. (2005): Fuel efficiency of commercial aircraft. An overview of historical and future trends. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR-CR-2005-669).

PEETERS, P./ WILLIAMS, V. (2009): Calculating Emissions and Radioactive Forcing. – In: GÖSSLING, S./ UPHAM, P. (Hrsg.): Climate Change and Aviation. Issues, Challenges and Solutions. Sterling. S. 69-87.

PEETERS, P./ WILLIAMS, V./ GÖSSLING, S. (2007): Air transport greenhouse gas emissions. – In: Peeters, P. M. (Ed.) Tourism and climate change mitigation. Methods, greenhouse gas reductions and Policies. Breda. NHTV. S. 29-50.

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

POMPL, W. (2007): Luftverkehr. Eine ökonomische und politische Einführung. Berlin, Heidelberg.

- SPINDLER, M. P. (2007): Environmental Design Space Model Assessment. Master Thesis. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
http://phil.zatetic.com/school/Phil_Spindler_thesis.pdf (02.03.11)
- STIFTUNG WARENTEST (2009): Billige Tricks. Ausgabe 3. <http://www.test.de/themen/freizeit-reise/test/Billigflieger-Zehn-Airlines-im-Test-1758245-1756499/> (03.03.11)
- TORENBEEK, E. (1982). Synthesis of subsonic airplane design; An introduction to the preliminary design of subsonic general aviation and transport aircraft, with emphasis on layout, aerodynamic design, propulsion and performance. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- TRX (2009): CO₂ Emissions Model for Air Travel. Public Documentation (v1.4).
http://carbon.trx.com/TRX_CO2_Emissions_Documentation_v1.4.pdf (03.03.11)
- UBM AVIATION. ENGINE YEARBOOKS 2006-2011, online bei
www.ubmaviationnews.com/Publications/The-Engine-Yearbook
- VECTOR AVIATION (2011): Aircraft Types. <http://www.vector-aviation.com/vector-aviation/aircraft-types.htm> (01.03.11)
- VERBRAUCHERZENTRALE NIEDERSACHEN (2010): Online-Flugbuchung: Preistransparenz mangelhaft. Studie der Verbraucherzentrale Niedersachsen, Dezember 2010
- VIRGIN ATLANTIC (2007): Virgin Atlantic Environment Policy 2007. Download von der Virgin Atlantic Webseite (03.03.11)
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELT-VERÄNDERUNGEN (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten, Berlin 2009.
- WIT, R.C.N./ DINGS, J.M.W./ MENDES DE LEON, P./ THWAITES, P./ PEETERS, P./ GREENWOOD, D./ DOGANIS, R. (2002): Economic incentives to mitigate greenhouse gas emissions from air transport in Europe. Delft, CE.

Anhänge

Appendix 1: Piano X

From the piano x website and user guide⁶³:

Piano-X is a new version of Piano, the aircraft analysis tool used by many airframe and engine manufacturers worldwide.

Piano-X provides unprecedented analytical power to anyone involved in the science of aircraft emissions, in airline fleet planning, or in the assessment of both existing and projected aircraft.

With a uniquely simple interface, Piano-X lets you see results within moments of downloading. To get you started, several free aircraft models are provided. You will have instant access to fuel consumption, environmental emissions (NO_x, HC, CO, CO₂), drag and performance characteristics at any range and payload combination. If you find Piano-X useful, you will be able to purchase other individual aircraft models, or the entire Piano database of more than 250 files covering a huge variety of commercial aircraft types.

Piano-X is much more than a database - it is a full-strength performance program incorporating precisely the same analytical routines as Piano. Unlike Piano, you will not be able to define completely new aircraft 'from scratch' with Piano-X: Instead, you purchase predefined models. But you will then be able to adjust these models exactly as you want:

What are the effects of changing Flight Levels in an A380? What happens if the empty weight of the Boeing 787-9 goes up by 1000 pounds? What if the sfc is 0.5% better, or the drag improves, or there is less climb thrust, or the NO_x and hydrocarbon emissions must reflect the latest engine certification results? Piano-X does not expect you to rely solely on current estimates - you can change all of the above for yourself at anytime, to match changing realities, today and tomorrow, or to understand the impact of missed promises and guarantees. And you won't need a PhD in computer science or aeronautics to get the information you need out of Piano-X.

The Piano-X database is precisely the same as supplied with Piano. Aircraft models do not imply the approval or cooperation of any manufacturers or represent guaranteed performance. They do constitute

⁶³ PIANOX, 2008

the best and truly independent estimates of aircraft characteristics available to Lissys and are underpinned by two decades of expertise in analysing commercial aircraft, with global contacts and a customer list that speaks for itself.

You can Google 'piano aircraft emissions' to find several major environmental studies (some at intergovernmental level) that reference Piano. It is mentioned in ICAO's annual environmental report (large pdf).

Lissys is constantly reviewing future projected aircraft and can provide consultancy related to Piano or Piano-X models. If you are an aeronautical engineer and interested in generating your own aircraft models entirely from scratch, take a look at the full Piano, which lets you do precisely that, and is now available on Windows.

Reference List of piano users

- Rolls Royce plc (Derby)
- Airbus Industrie (Toulouse)
- Boeing (Seattle)
- U.S. Environmental Protection Agency (National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory)
- U.S. Department of Transportation (Volpe National Transportation Systems Center)
- Bombardier Aerospace (Montreal)
- Ilyushin Aviation Complex (Moscow)
- ATR Regional Aircraft (Toulouse)
- International Council on Clean Transportation
- JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency
- McDonnell Douglas (Long Beach, pre-Boeing merger)
- UK Department of Trade and Industry
- UK Ministry of Defence
- Allison Engines (now RR USA)
- BMW Rolls-Royce GmbH (now RR Deutschland)
- de Havilland Canada (pre-Bombardier)
- SHORTS (pre-Bombardier)
- SNECMA (SAFRAN group)
- Korean Aerospace Research Institute (KARI)
- MTU - Motoren und Turbinen Union
- Samsung Aerospace

- Daewoo Heavy Industries
- IPTN (PT. Industri Pesawat Terbang Nusantara)
- EUROCONTROL (Bretigny sur Orge)
- Fairchild Dornier
- FFA (now FOI), the Aeronautical Research Institute of Sweden
- Centre for Air Transport and the Environment, Manchester Metropolitan University
- QinetiQ (ex DERA)
- AVIC 1 (Aviation Industries of China)
- First Aircraft Institute of AVIC 1 (Shanghai)
- Pratt & Whitney Canada
- Northrop Grumman Corporation
- University of Cambridge, Institute for Aviation and the Environment – AIM
- MIT Department of Aeronautics and Astronautics - PARTNER

Appendix 2: TRX und DEFRA

DEFRA ist das englische Department for environment food and rural affairs. Es hat eine Methodologie zur CO₂-Berechnung von Flügen entwickelt⁶⁴. TRX ist ein privates Unternehmen aus den USA, das sich auf Datenservice und IT für den Reisemarkt spezialisiert hat⁶⁵. Es hat einen CO₂ Rechner entwickelt, der Airlines vergleichen kann.

Die Tabelle zeigt die Faktoren, die zur Berechnung des CO₂ eines Fluges notwendig sind, in der Detaillierung in den verschiedenen Methoden, die sich bisher mit der CO₂-Bilanzierung im Bereich Flugverkehr befassen.

Faktor	Erfassung von TRX	Erfassung von DEFRA	Erfassung von atmosfair Airline Index
Flugzeugtyp	40 repräsentative Flugzeuge, für Boeing und Airbus meist nur Flugzeugfamilie, nicht Flugzeugtyp (also z.B. A340), Corinair Daten von 2006, neue Flugzeugtypen wie A380 nicht enthalten	-	107, alle Modelle bis hinunter zur Ebene Typ, also z.B. A340-300, Daten von 2009, inkl. Neuentwicklungen.
Anzahl Distanzklassen	8	3 Domestic, short haul und long haul	18
Triebwerke	-	-	308 Triebwerke
Winglets	-	-	Detailliert
Abdeckung Airlines	Nur Linienflüge	n.a.	Linienflüge und Charterflüge
Passagierauslastung	Nur über ICAO-Daten (ca. 30% aller globalen Flüge, siehe Kapitel 9.2)	Standardwert	Aus diversen Quellen, ca. 92% aller globalen Flüge
Beiladefrachtkapazität	Detailldaten nur für Flüge, die die USA berühren, dabei Unterscheidung in zwei Klassen: domestic und international flights	-	Detailldaten für weltweit alle Flüge auf City-Pair Ebene
Genauigkeit*	geschätzt ± 25%	geschätzt ± 40%	± 1,5%

* Die Genauigkeit von DEFRA und TRX wurden anhand der im AAI vorgelegten Faktor- und Fehleranalyse abgeschätzt (Kapitel 12 und 13). Die Genauigkeit des AAI wird in dieser Dokumentation in Kapitel 13 analysiert.

Der Vergleich zeigt, dass keines der bisherigen Systeme alle wesentlichen Faktoren berücksichtigt, die die CO₂-Emissionen beeinflussen. Die erfassten Faktoren erscheinen dabei nicht in der nötigen Genauigkeit, um einen Vergleich von Airlines zu erlauben.

⁶⁴ Vgl. Guidelines to Defra/ DECC's GHG Conversion Factors: Methodology Paper for Emission Factors (2009)

⁶⁵ Vgl. TRX 2009

Appendix 3: ICAO TFS

Excerpts from the Economic Analysis and policy (EAP) Section of ICAO FTS

The Economic Analysis and Policy (EAP) Section is responsible for functions related to Strategic Objectives A (Safety), C (Environment) and D (Efficiency), articulated around three areas of expertise, namely statistics, economic analyses and forecasts.

The Statistics Programme

This programme, initiated in 1947, collects, processes, analyzes and disseminates civil aviation statistics as required by States and the Organization for an efficient, safe and secure development of civil aviation. This web-enabled database covers historical time-series on air carrier traffic, on-flight origin and destination (OFOD), traffic by flight stage (TFS), air carrier fleet and personnel, air carrier finances, airport traffic, airport finances, en-route facility traffic, en-route facility finances and civil aircraft on register.

What is ICAOData?

ICAOData.com is a new website that increases the availability and visibility of the ICAO statistical data on the air transport industry. The website delivers ICAO's air transport statistics in a user-friendly interface allowing for easy access and analysis. The database contains detailed financial, traffic, personnel and fleet information for commercial air carriers. It also holds Traffic by Flight Stage (TFS) information and On-flight Origin/Destination statistics for air carriers. Additionally financial and traffic data for airports are available.

What data will be available?

Through its regular statistics programme, ICAO collects information from its Contracting States, which is then compiled into multiple data series. These cover information on civil aviation subjects relating to commercial air carriers (traffic, on-flight origin and destination, traffic by flight stage, fleet-personnel and financial data), airports (airport traffic and financial data), air navigation service providers (financial and traffic data), as well as data on civil aircraft on register. While these data series have traditionally been offered in the form of hard copy publications they will now be offered only online. The data are updated in real time and change, often daily, depending on the nature of the series. Some of these statistical series contain historical data of 20 years or more.

Commercial Air Carriers - Traffic

Contains, either on a monthly or annual basis, operational, traffic and capacity statistics of both international and domestic scheduled airlines as well as non-scheduled operators. Where applicable, the data are for all services (passenger, freight and mail) with separate figures for domestic and international services, for scheduled and non-scheduled services, and for all-freight services. There are two sample images which give an idea of the data included: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

On-Flight Origin and Destination - OFOD

Shows on an aggregate basis the number of passengers, freight and mail tonnes carried between all international city-pairs on scheduled services. These data are collected on a quarterly basis, but due to confidentiality restrictions can only be shown 12 months after the end of each reporting period, and only where there are at least two air carriers from at least two states. There are two sample images which give an idea of the data included: annual data and quarterly data. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Traffic by Flight Stage - TFS

Contains traffic on-board aircraft on flight stages of international scheduled services. The data are classified by international flight stage for each air carrier and aircraft type used, the number of flights operated, the aircraft capacity offered and the traffic (passengers, freight and mail) carried. There are two sample images which give an idea of the data included: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Commercial Air Carriers – Fleet

Covers the fleet data of international and domestic scheduled airlines as well as non-scheduled operators. The data consist of statistics on the number and types of aircraft operated, their capacity and their utilization. There are two sample images which give an idea of the data included: average aircraft utilisation and total fleet numbers per air carrier. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Commercial Air Carriers – Personnel

Covers the personnel data of international and domestic scheduled airlines as well as non-scheduled operators. The data consist of statistics on the number of airline personnel by job category and the annual expenditures for these personnel. For examples: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Commercial Air Carriers – Financial data

Shows the financial data for international scheduled airlines giving revenues and expenditures for the year (calendar or fiscal), assets and liabilities at the end of the year and retained earnings as well as summary traffic data. There are two sample images which give an idea of the data included: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Airport - Traffic

Covers monthly or annual traffic data for major international airports. The data consists of aircraft movements, number of passengers embarked and disembarked and tons of freight and mail loaded and unloaded. There are two sample images which give an idea of the data included: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Airport - Financial Data

Covers on an annual basis (calendar or fiscal year), income, expenses and investments for major international airports. There are two sample images which give an idea of the data included: overview and detailed results. (Please make sure you enlarge the images to be able to view them properly).

Appendix 4: JP Airline Fleets international

"The Bible of Civil Aviation", 44th edition. The world's most comprehensive yearly fleets reference book provides administrative information for all known commercial aircraft operators, plus technical information on every aircraft over 3,000 lbs (1,361 kgs) (Including current registration, type, serial number, previous identity, date of manufacture, date of delivery, engine type and number, maximum take off weight, configuration, Sel-cal, fleet number, name, remarks, etc.). Covers more than 6,000 operators and over 50,000 aircraft.

Appendix 5: DLR Low Cost Monitor

Die folgenden Passagen zur Einordnung von Fluggesellschaften als Low Cost Airlines in Deutschland sind aus dem DLR Low Cost Monitor 2/2010 entnommen⁶⁶.

- Tuifly: „TUIfly hat sich von seinem LowCost Segment getrennt und die Städteverbindungen an Air Berlin abgegeben, die dadurch ihren Marktanteil deutlich vergrößern konnte.“
- Condor und LTU: „Nicht einbezogen wurden in dieser Untersuchung Flüge von Condor oder der ehemaligen LTU, die zwar auch einige Billigflugangebote veröffentlichen, bei denen jedoch eine eindeutige Zuordnung zum LowCost Sektor sehr schwierig erscheint, da nur ausgewählte Flüge direkt und zu günstigen Preisen gebucht werden können. Dies widerspricht der eigentlichen Idee der LowCost Carrier, nach der alle Flüge oder doch zumindest ein großes Sitzplatzkontingent online zu einem niedrigen Preis buchbar sein sollten, der generell verfügbar ist und sich im Wesentlichen nach dem noch vorhandenen Vorausbuchungszeitraum bzw. dem Reisetag und der Buchungslage richtet.“
- Lufthansa: „Im weitesten Sinne müssten auch Flüge der Lufthansa aus dem „Better-Fly“-Segment berücksichtigt werden, doch auch hier ist eine eindeutige Erfassung nicht möglich.“
- Air Berlin: „Zu einer Grauzone, in der mehrere Geschäftsmodelle Anwendung finden, zählt die Fluggesellschaft Air Berlin. Bei dieser ehemaligen Charterfluggesellschaft, die schon frühzeitig mit dem „Cityshuttle“ in den Low Cost Markt eingegriffen hat, ist durch die Übernahme der DBA, Gexx und LTU sowie durch die Kooperation mit der Luftfahrtgesellschaft Walter (LGW) die Ermittlung der LowCost Strecken schwieriger geworden. So werden nur die bisherigen LowCost Strecken dieser Gesellschaften, sowie Strecken, die diesen entsprechen, berücksichtigt, nicht jedoch Flüge zu typischen Urlaubszielen, z.B. nach Nordafrika. Neu hinzu gekommen sind bei Air Berlin besonders die Städteverbindungen, die von TUIfly abgegeben worden sind.“

⁶⁶ Vgl. DLR Low Cost Monitor 2010