

## Emissionen des Flugverkehrs

Mit dem starken Wachstum des Flugverkehrs geht auch eine Zunahme der Emissionen einher. Da der Flugverkehr der am stärksten wachsende Verkehrsträger ist, geht damit auch eine Zunahme der Emissionen einher.

### Welche Stoffe werden während des Fluges emittiert?

Der fast ausschließlich im Flugverkehr verwendete Treibstoff ist das Kerosin. Es handelt sich hierbei um ein Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe. Hauptprodukte der Verbrennung sind Kohlendioxid und Wasser. Daneben entstehen verschiedene Schadstoffe, die sich gemäß der Gliederung in [Tabelle 1](#) unterteilen lassen.

**Tabelle 1: Systematisierung der Reaktionsprodukte (Quelle: UBA-Forschungsbericht 296 41 838)**

Produkte vollständiger Verbrennung	Produkte unvollständiger Verbrennung	Nebenprodukte vollständiger Verbrennung	Produkte aus Kraftstoffverunreinigungen
CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	Kohlenwasserstoffe (HC)		SO <sub>3</sub>
	PM (Ruß und Partikel)		

Aus Messungen können den einzelnen Substanzen sog. Emissionsindices zugeordnet werden, d.h. eine Angabe über die Höhe der Emission pro Einheit Kraftstoff, i.d.R. 1 kg. Die Emissionsindices für die Emissionen sind der Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: mengenmäßige Darstellung der Reaktionsprodukte bei der Verbrennung (Oxidation) von Kerosin (Quelle: UBA-Forschungsbericht 296 41 838)**

Name und Bezeichnung des Reaktionsproduktes	Entstehungsmenge (verbrauchsspezifischer Emissionsindex)
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	3150 g/kg
Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	1240 g/kg
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	6 – 16 g/kg
Kohlenmonoxid (CO)	0,7 – 2,5 g/kg
Kohlenwasserstoffe (HC)	0,1 – 0,7 g/kg
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	0,418 g/kg
Partikel	0,038 g/kg

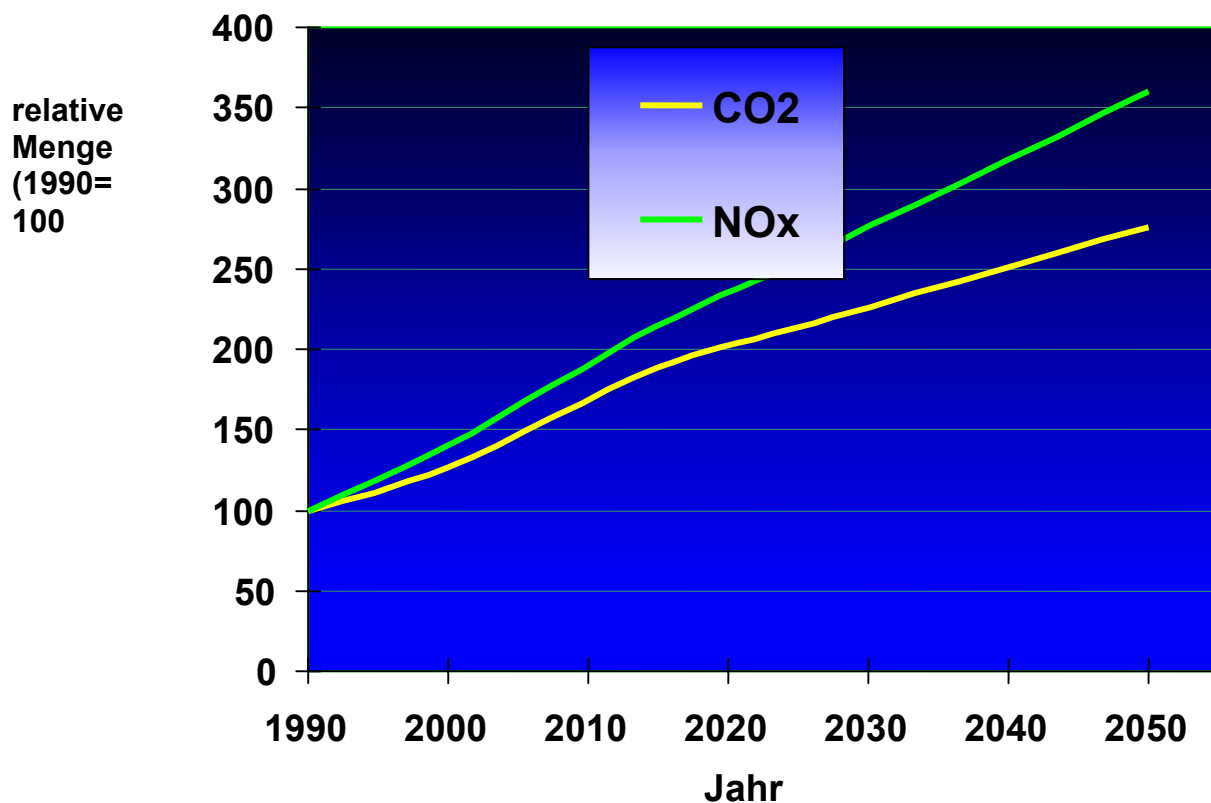
Kohlendioxid- und Wasserdampfemissionen sind dem Treibstoffverbrauch proportional, die Schwefeloxide entsprechen dem Schwefelgehalt des Treibstoffs, die Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid variieren dagegen mit den Verbrennungsbedingungen im Triebwerk und es spielen meteorologische Bedingungen eine Rolle (Luftdruck u.a.). Der Flugverkehr ist in Reiseflughöhe zwischen 8 und 13 km die einzige künstliche Emissionsquelle. Neben der Entstehung von Stickoxiden durch Gewitterentladungen stellt der Flugverkehr die bedeutsamste Quelle für Stickoxide in diesen Höhenbereichen dar.

Die emittierten Partikel bestehen aus sehr kleinen Rußteilchen (10 nm bis einige µm), wobei ein Großteil der Klasse der sog. PM10 (Partikeldurchmesser < 10 µm) entspricht. Bei niedrigen Lastzuständen entstehen hohe Ausstöße an CO und HC, während bei hoher Last (Start und Steigflug) verstärkt Stickoxide emittiert werden.

Das [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#) hat einen Bericht mit dem Titel "Aviation and the Global Atmosphere" erstellt, in dem auch die derzeitigen und (nach unterschiedlichen Szenarien) zu erwartenden Emissionen des Flugverkehrs dargestellt wurden. Eine Zusammenfassung des Berichtes in englischer Sprache kann unter von der IPCC-Internetseite heruntergeladen werden.

Die Entwicklung der beiden wichtigsten Stoffe – CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> – sind gemäß dem Referenzszenario (sehr wahrscheinliche Entwicklung) in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

**Abbildung 1: Entwicklung der flugbedingten Emissionen von Kohlendioxid und Stickoxiden weltweit (Quelle [IPCC-Bericht, 1999](#)).**



### Stand und Entwicklung der Emissionen im [deutschen](#) Flugverkehr

In einer vom Umweltbundesamt beauftragten Studie wurden vom TÜV, dem [DIW](#) sowie dem [Wuppertal-Institut](#) die Emissionen in Deutschland basierend auf der Auswertung sämtlicher Flugereignisse des Jahres 1995 prognostiziert.

Für die Auswertung oder den Vergleich des Emissionen des Flugverkehrs ist es wichtig, auf welches Prinzip, welche Abgrenzungsdefinition man sich bezieht.

Folgende zwei Prinzipien werden häufig herangezogen:

- **Territorialprinzip (oder Inlandsprinzip):** Berücksichtigt werden die Verkehrsleistungen

über dem Territorium eines Landes, auch bei grenzüberschreitenden Flügen nur bis zur Landesgrenze. Flüge, die Deutschland ohne Landung überqueren, sind hierin ebenso wenig

enthalten wie Flugstrecken über internationale Gebiete.

• **Standortprinzip:** Es werden die Verkehrsleistungen der auf inländischen Flughäfen einsteigenden Fluggäste bis zum ersten Aussteigeflughafen des jeweiligen Fluges gezählt (Flugstrecken).

Auf der Basis der vorliegenden Flugzeugbewegungsstatistiken konnte in Verbindung mit den Emissionsberechnungen der [DLR](#) (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) für die beschriebenen Abgrenzungen (Territorialprinzip und Standortprinzip) die Energieverbrauchs- und Emissionsberechnungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in ausgewählter Strukturierung in den folgenden Tabellen und Abbildungen zusammengestellt.

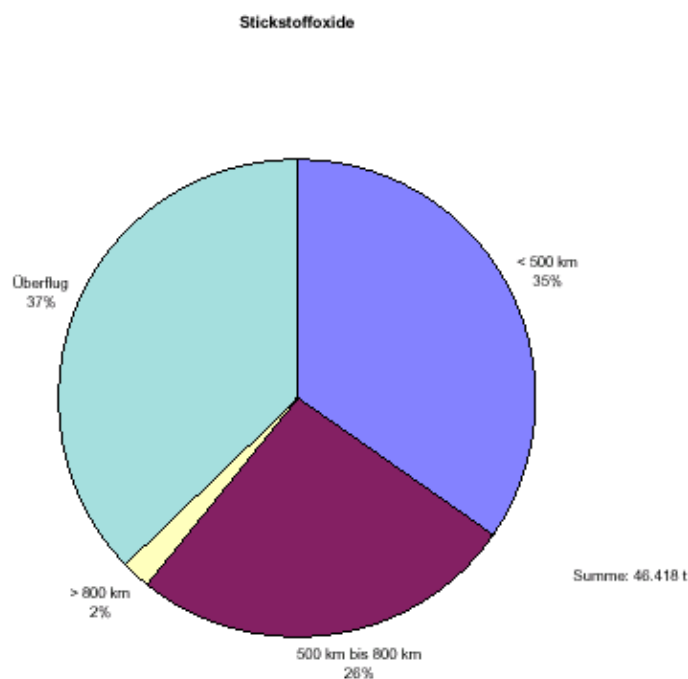
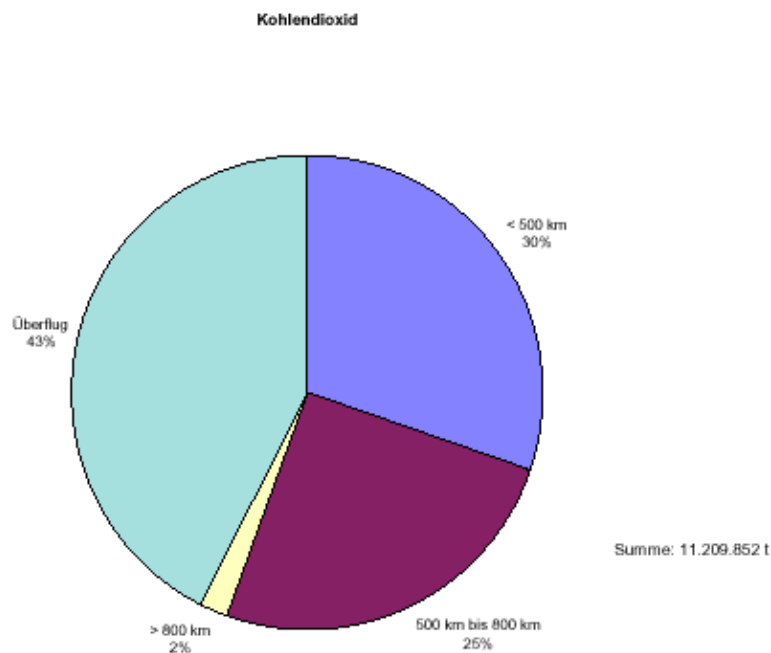
Die Berechnungen für den Überflugverkehr wurden unter Reiseflugbedingungen (CRUISE) durchgeführt. Im innerdeutschen Flugverkehr wurden komplette Flugemissionen berücksichtigt (einschließlich TAXI-Out und TAXI-In: Rollen zur Startbahn beim Start und Rollen zum Terminal nach Landung). Der rausgehende Flugverkehr schließt TAXI-Out mit ein und der reinkommende Verkehr beinhaltet den Flug ab Landes-grenze einschließlich TAXI-In. In der folgenden Tabelle sind die Emissionen des Jahres 1995 für Deutschland dargestellt.

**Tabelle 2:** Kerosinverbrauch, Stickstoffdioxid und Kohlendioxid-Emissionen des zivilen Flugverkehrs 1995, Territorialprinzip

	Kerosin	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
	t / Jahr	t / Jahr	t / Jahr	g/kg Kraftstoff
<b>&lt; 500 km</b>				
Strahlantrieb	971.731	15.165	3.060.953	15,61
Turboprop	111.491	942	351.197	8,45
<b>Summe</b>	<b>1.083.222</b>	<b>16.107</b>	<b>3.412.149</b>	<b>14,87</b>
<b>500 km bis 800 km</b>				
Strahlantrieb	841.819	11.688	2.651.730	13,88
Turboprop	53.634	386	168.947	7,20
<b>Summe</b>	<b>895.453</b>	<b>12.074</b>	<b>2.820.677</b>	<b>13,48</b>
<b>&gt; 800 km</b>				
Strahlantrieb	71.226	1.002	224.362	14,07
Turboprop	1.788	14	5.632	7,83
<b>Summe</b>	<b>73.014</b>	<b>1.016</b>	<b>229.994</b>	<b>13,92</b>
<b>Überflug</b>				
Strahlantrieb	1.473.214	16.979	4.640.624	11,53
Turboprop	39.438	242	124.230	6,14
<b>Summe</b>	<b>1.512.652</b>	<b>17.221</b>	<b>4.764.854</b>	<b>11,38</b>
<b>Gesamt</b>				
Strahlantrieb	3.357.990	44.834	10.577.669	13,35
Turboprop	206.351	1.584	650.006	7,68
<b>Summe</b>	<b>3.564.341</b>	<b>46.418</b>	<b>11.227.674</b>	<b>13,02</b>

Die [Abb. 2](#) zeigt für das Territorium Deutschland die prozentuale Aufteilung der ausgewählten Emissionen auf die festgelegten Distanzklassen. Mit ausgewiesen sind die Anteile des Überflugverkehrs. Es ist erkennbar, dass 35 % der NO<sub>x</sub>- Emissionen bei einer Flugdistanz bis zu 500 km anfallen. Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen hat der Überflugverkehr einen Anteil von 43 %, die Distanzklasse <500 km einen Anteil von 30 % und die Distanzklasse zwischen 500 km und 800 km einen Anteil von 25 %.

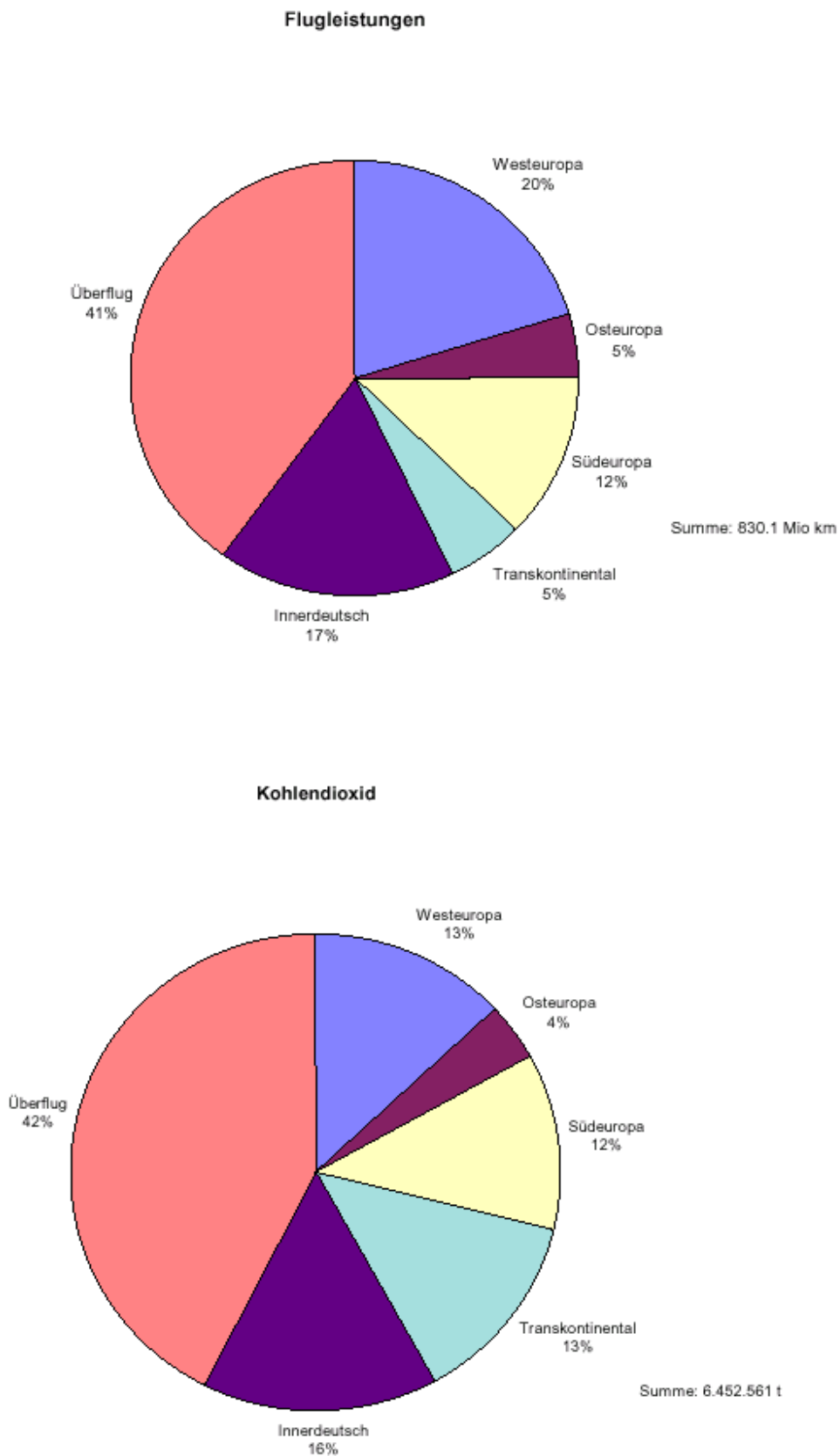
**Abb. 2:** Aufteilung der NO<sub>x</sub>- und Co<sub>2</sub>- Emissionen auf die Distanzklassen des Territorialprinzips, 1995



Bezüglich des Überflugverkehrs ist aus der [Abb. 3](#) erkennbar, dass bei einem Flugleistungsanteil von 41 % in etwa gleiche Anteile an den NO<sub>x</sub>-Emissionen (37 %) anfallen. Im

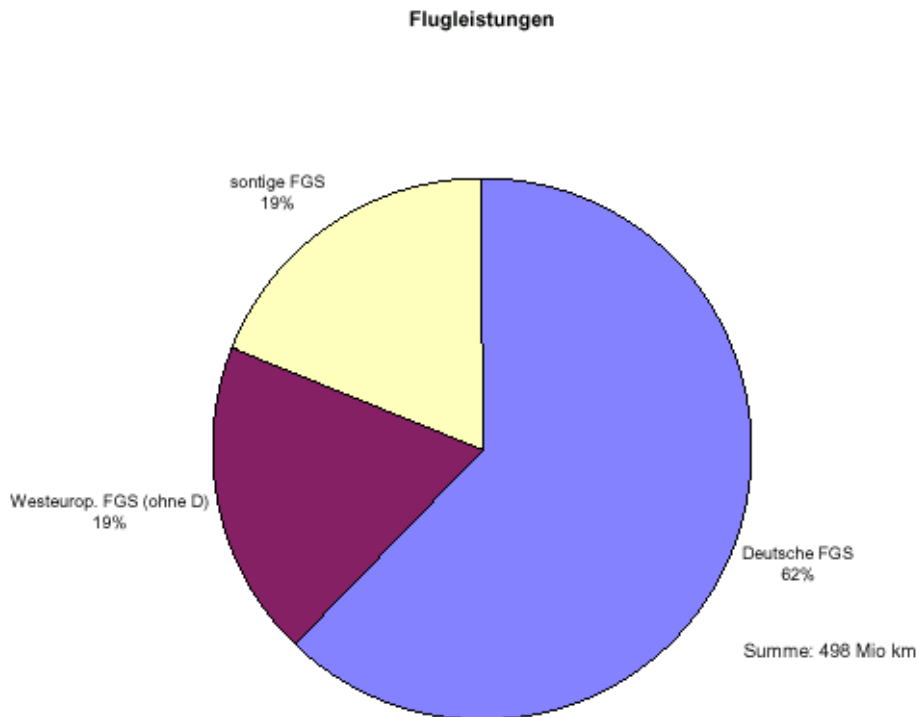
innerdeutschen Verkehr errechnen sich bei einem Anteil von 17 % der Flugleistung etwa 16 % Co<sub>2</sub>-Emissionen und 13 % NO<sub>x</sub>-Emissionen.

**Abb. 3:** Aufteilung der Flugleistungen, der NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>- Emissionen auf ausgewählte Regionen, Territorialprinzip ohne Überflug, 1995



Die Datengrundlage der DFS ermöglicht für das Analysejahr eine Auswertung der Jahresergebnisse, aufgeteilt nach in- und ausländischen Fluggesellschaften.

**Abb. 4:** Verteilung der Flugleistungen, der NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>- Emissionen nach ausgewählten Fluggesellschaftsklassen, Territorialprinzip ohne Überflug, 1995



Deutlich höher fallen die Emissionen natürlich aus, wenn man das Standortprinzip zugrunde legt. Auch die Verteilung der Schadstoffe ist anders gestaltet, da der längere Reiseflugteil zu Buche schlägt.

**Tabelle 3:** Kerosinverbrauch, Stickstoffdioxid (NO<sub>x</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), des zivilen Flugverkehrs in 1995, Standortprinzip

	Kerosin	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
	t / Jahr	t / Jahr	t / Jahr	g/kgKerosin
<b>&lt; 800 km</b>				
Strahltrieb	715.182	8373	2.252.823	11,71
Turboprop	12.1973	986	384.215	8,08
<b>Summe</b>	<b>837.155</b>	<b>9.359</b>	<b>2.637.038</b>	<b>11,18</b>
<b>800 km bis 2500 km</b>				
Strahltrieb	97.7373	1.0738	3.078.725	10,99
Turboprop	48.849	350	153.874	7,16
<b>Summe</b>	<b>1.026.222</b>	<b>1.1088</b>	<b>3.232.599</b>	<b>10,80</b>
<b>&gt; 2500 km</b>				
Strahltrieb	4.027.176	54.600	12.685.604	13,56
Turboprop	1.544	9	4.864	5,83
<b>Summe</b>	<b>4.028.720</b>	<b>54.609</b>	<b>12.690.468</b>	<b>13,60</b>
<b>Gesamt</b>				
Strahltrieb	5.719.731	7.3711	18.017.153	12,89
Turboprop	172.366	1.345	542.953	7,80
<b>Summe</b>	<b>5.892.097</b>	<b>75.057</b>	<b>18.560.106</b>	<b>12,70</b>

Unter Zugrundelegung des Standortprinzips verteilen sich die ausgewählten Emissionen auf die Distanzklassen wie in der [Tab. 3](#) dargestellt. Bei den gewählten Klassenweiten fallen die NOx-Emissionen mit 73 % stark überproportional beim Langstreckenflug an. Auf die Kurzstreckenflüge (<800 km) entfallen 12 % Nox-Emissionen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen zu 69 % bei Langstreckenflügen >2.500 km an. Die restlichen Anteile ergeben sich zu 19 % für die Kurzstreckenflüge und zu 17 % für die Mittelstrecke (800 km bis 2.500 km).

Für die Beurteilung der Emissionsentwicklung müssen plausible Szenarien zugrunde gelegt werden, wie sie im Kapitel „Entwicklung des Flugverkehrs“ für Personen- und Frachtverkehr dargestellt wurden.

In der folgenden Tabelle sind die Prognosen eines Szenarios dargestellt.

**Tabelle 4:** Entwicklung des Aufkommens im Passagierluftverkehr nach Fahrtzwecken bis 2010 und 2020 (Trend-Szenario)

	Geschäfts- und Dienstreisen	Privat- reisen	Insgesamt
		<b>Aufkommen in Mio.1)</b>	
		– Innerdeutsch –	
1995	12,1	1,8	13,9
2010	18,3	2,1	20,4
2020	22,5	2,3	24,9
		– Grenzüberschreitend –	
1995	21,6	52,3	73,9
2010	45,6	84,8	130,4
2020	68,7	106,6	175,4
		– Insgesamt –	
1995	33,7	54,1	87,8
2010	63,9	86,9	150,8
2020	91,3	109,0	200,2
		<b>Durchschn. Wachstumsrate in % pro Jahr<sup>1)</sup></b>	
		– Innerdeutsch –	
1995 - 2010	2,8	1,1	2,6
2010 - 2020	2,1	1,1	2,0
1995 - 2020	2,5	1,1	2,4
		– Grenzüberschreitend –	
1995 - 2010	5,1	3,3	3,9
2010 - 2020	4,2	2,3	3,0
1995 - 2020	4,7	2,9	3,5
		– Insgesamt –	
1995 - 2010	4,4	3,2	3,7
2010 - 2020	3,6	2,3	2,9
1995 - 2020	4,1	2,8	3,4
		<b>Veränderung in %<sup>1)</sup></b>	
		– Innerdeutsch –	
1995 - 2010	51	19	47
2010 - 2020	23	11	22
1995 - 2020	86	32	79
		– Grenzüberschreitend –	
1995 - 2010	111	62	76
2010 - 2020	51	26	35
1995 - 2020	218	104	137
		– Insgesamt –	
1995 - 2010	89	61	72
2010 - 2020	43	25	33
1995 - 2020	171	102	128

<sup>1)</sup> Werte gerundet.

Quellen: DFS/DLR (bis 2010); Airbus; Boeing; ICAO; Berechnungen des DIW.

Im Luftfrachtverkehr werden folgende Entwicklungen gesehen.

## Luftfrachtverkehr

Die Prognose des Luftfrachtverkehrs erfolgt analog dem Vorgehen beim Passagierluftverkehr. Die Entwicklung bis 2010 wird auf Basis der Annahmen von DFS/DLR geschätzt. Beim Luftpostverkehr wird für den gesamten Zeitraum (1995-2020) eine Stagnation unterstellt. Das Luftpostaufkommen ist keine aus einem makroökonomischen Prognoseverfahren abgeleitete Größe, sondern eine Trendfortschreibung, die der Entwicklung der letzten Jahre Rechnung trägt.

**Tabelle 5:** Entwicklung des Luftfracht- und Luftpostverkehrs <sup>1)</sup> bis 2010 und 2020 (Trend-Szenario)

		Luftfracht			Luftpost	Fracht	
	Verkehr inner- halb Deutsch- lands	Verkehr mit dem Ausland	Durchgangs- Verkehr	Insgesamt	Insgesamt	Insgesamt	
			– Verkehrsaufkommen in 1000 t –				
1980	73,3	642,6	38,3	754,2	106,8	861,0	
1990	88,9	1270,1	48,7	1407,7	170,8	1578,5	
1991	.	.	.	.	191,0	.	
1992	83,1	1275,0	38,9	1397,0	202,8	1599,8	
1993	73,5	1355,6	42,2	1471,3	209,2	1680,5	
1994	70,6	1547,0	48,4	1666,0	212,3	1878,3	
1995	82,0	1648,2	43,1	1773,3	219,4	1992,7	
1996	96,6	1719,8	42,3	1858,7	208,8	2067,5	
2010	118,8	3785,6	54,5	3958,9	210,0	4168,9	
2020	139,2	6405,3	59,2	6603,7	210,0	6813,7	
			– Durchschnittliche Wachstumsrate in % pro Jahr –				
1995 - 2010	2,5	5,7	1,6	5,5	x	5,0	
2010 - 2020	1,6	5,4	0,8	5,3	x	5,0	
1995 - 2020	2,1	5,6	1,3	5,4	x	5,0	
			– Veränderung in % –				
1995 - 2010	45	130	26	123	x	109	
2010 - 2020	17	69	9	67	x	63	
1995 - 2020	70	289	37	272	x	242	

Bis 1990 Früheres Bundesgebiet, ab 1991 Deutschland.

Quellen: Statistisches Bundesamt; [DFS/DLR](#); Boeing; Berechnungen des [DIW](#).

Aus diesen Entwicklungsprognosen in Kombination mit der zu erwartenden technischen Entwicklung der Technik ist eine Abschätzung der künftigen Entwicklung in Deutschland möglich.

Die realen Umweltauswirkungen der vorab skizzierten technischen Entwicklungspotenziale der Einzelkomponenten sind abhängig von dem Zeitpunkt, an dem diese neuen Technologien die repräsentative Flugzeugflotte „durchdringen“. Dabei spielen zum einen die zu erwartenden

Flottenveränderungen wegen gesetzlicher Vorschriften eine Rolle, zum anderen können über Kaufoptionen der wichtigsten Fluggesellschaften Abschätzungen vorgenommen werden. Für die Trendentwicklung sind stichwortartig folgende Veränderungen berücksichtigt,

- Zugrundelegung des für die EU verbindlichen Zeitplans über das Inkrafttreten der Abgasgesetzgebung gemäß ANNEX 16, Volume II ([verfügbar über Luftrecht-Online](#))
- Flottendurchdringung der in Auftrag gegebenen Flugzeugtypen der häufigsten Fluggesellschaften („in Order“)
- Auswirkung der Bonusliste des Bundesministeriums für Verkehr
- Weltweit einheitliche Technikstandards (keine Unterschiede mehr im Vergleich zu den osteuropäischen Herstellern)
- Potenzialabschätzungen aus veröffentlichten Forschungsvorhaben
- Veränderte Häufigkeitsverteilungen der AzB-Gruppen

Auf der Basis der technischen Randbedingungen und den im Kap.3.2 beschriebenen Verkehrsnachfragedaten wurden die Treibstoffverbräuche, die Co<sub>2</sub>- und die No<sub>x</sub>-Emissionen im Trend bis zum Jahr 2020 berechnet.

**Tabelle 6:** Kraftstoffverbrauch und Emissionen für die Analyse 1995 nach Verkehrsregionen (Standortprinzip)

	Absolut			Spezifisch	
	Kraftst.	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Kraftst.
	t/Jahr	t/Jahr	t/Jahr	g/kg Kraftst.l	l/100 Pkm
Innerdeutsch	555.988	1.751.364	6.164	11,1	12,1
Westeuropa	509.499	1.604.922	5.745	11,3	11,5
Südeuropa	1.013.808	3.193.496	11.831	11,7	4,6
Osteuropa	290.251	914.290	2.571	8,9	11,2
Transkontinental	3.522.550	11.096.033	48.746	13,8	6,3
<b>Gesamt</b>	<b>5.892.097</b>	<b>18.560.106</b>	<b>75.057</b>	<b>12,3</b>	<b>6,6</b>

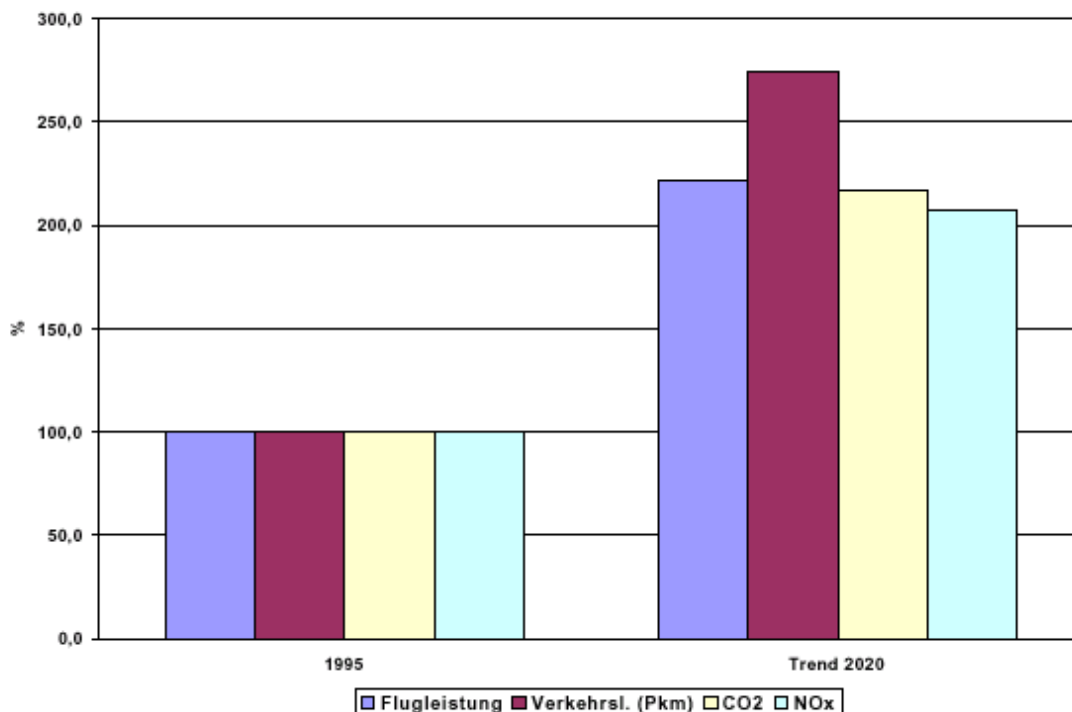
Im Vergleich zu 1995 wird sich die Verkehrsleistung (Pkm) bis 2020 nach dem Standortprinzip um den Faktor 2,7 erhöhen, die Flugleistung (Flug-km) steigt um den Faktor 2,25, die Co<sub>2</sub>-Emissionen und damit auch der Kraftstoffverbrauch um ca. 2,2 und die No<sub>x</sub>-Emissionen um den Faktor von ca. 2,1. Aus den unterschiedlichen Steigerungsraten wird die Veränderung der Auslastungsgrade, des spezifischen Verbrauchs und der spezifischen No<sub>x</sub>-Emissionen zwischen 1995 und 2020 deutlich.

**Tabelle 7:** Kraftstoffverbrauch und Emissionen für den Trend 2020 nach Verkehrsregionen (Standortprinzip)

	Absolut			Spezifisch	
	Kraftst.	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Kraftst.
	t/Jahr	t/Jahr	t/Jahr	g/kg Kraftst.	l/100 Pkm
Innerdeutsch	785.671	2.474.865	9.773	12,4	9,5

Westeuropa	719.913	2.267.727	8.603	12,0	7,4
Südeuropa	1.323.091	4.167.738	15.480	11,7	3,6
Osteuropa	738.275	2.325.565	7.945	10,8	6,6
Nordamerika	2.708.466	8.531.669	38.019	14,0	4,2
Mittelamerika	663.217	2.089.134	7.283	11,0	3,4
Südamerika	376.812	1.186.959	4.937	13,1	3,6
Afrika	656.553	2.068.142	8.044	12,3	4,4
Nahost	324.118	1.020.970	4.277	13,2	6,7
Asien und übrige	4.479.243	14.109.616	51.288	11,5	6,9
<b>Gesamt</b>	<b>12.775.360</b>	<b>40.242.385</b>	<b>155.648</b>	<b>12,2</b>	<b>5,2</b>

**Abb. 5:** Prozentuale Veränderung der Flugleistung, der Verkehrsleistung und der Emissionen zwischen 2020 und 1995 (Standortprinzip)



Nach dem **Territorialprinzip** ist die Flugleistung um den Faktor 2,1 höher, die Verkehrsleistung um ca. 2,3, während sich der Kraftstoffverbrauch (CO<sub>2</sub>) und die NO<sub>x</sub>-Emissionen etwa verdoppeln.

Da beim Territorialprinzip definitionsgemäß nur die Emissionen über Deutschland betrachtet werden, treten sowohl bei den absoluten als auch bei den spezifischen Emissionswerten regional starke Unterschiede auf. Bei fast allen Starts zu Langstrecken-Zielen überwiegt über Deutschland der Flugzustand Climb out mit relativ hohen Emissionen. Außerdem wird bei diesen Flügen großes Fluggerät bei hoher Auslastung eingesetzt. Am deutlichsten wird dies bei den Flügen nach Nord- und Südamerika, deren spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen etwa doppelt so hoch sind wie beim innerdeutschen Flugverkehr.

Gemäß den Verkehrsprognosen wird es beim Wachstum der Verkehrsleistung und damit auch beim Kraftstoffverbrauch regional deutliche Unterschiede geben. Am geringsten wird der innerdeutsche Flugverkehr anwachsen, mit den größten Zuwachsraten für die Zielregionen Mittelamerika, Asien und Osteuropa zu rechnen.

\_\_\_\_\_

