



Projekt

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Reise- flug

Verfasser: Frédéric Mainzer

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

Tutor: Dipl.-Ing. Kolja Seeckt

Abgabedatum: 19.12.2007

Kurzreferat

Durch eine wachsende Weltwirtschaft, zunehmende globale Mobilität und der Globalisierung im Allgemeinen wird der Luftverkehr in den kommenden Jahren stetig steigen. Hierdurch steigt auch der Anteil an der Umweltbelastung. Um die Umwelt zu entlasten, wird daher ein Luftverkehr angestrebt, der sich weitestgehend klima- und lärmneutral verhält und ohne übermäßig belastende Schadstoffe auskommt. Außerdem wird es zukünftig immer strengere Regeln bezüglich des Umweltschutzes und des Klimawandels geben. Deswegen ist es wichtig zu wissen, welche Flugzeugemissionen einen Einfluss auf unsere Umwelt haben. Dabei spielt der Faktor Entstehungsort der Emissionen eine bedeutende Rolle. Wasserdampf zum Beispiel hat nur geringfügige Auswirkungen, wenn er in Bodennähe entsteht. Entsteht er jedoch in einer Höhe von 12 km, treten gravierende Auswirkungen auf unser Klimasystem ein. Aus obenstehenden Gründen (Umwelt und Gesetzgebung) ist es deshalb relevant, nachhaltige Flugzeuge beziehungsweise Konzepte zu entwickeln. Dieses Projekt befasst sich mit den klimatischen Auswirkungen eines Flugzeuges im Reiseflug. Die verschiedenen Einflüsse des Flugverkehrs auf die Umwelt werden in diesem Bericht umschrieben und durch Tabellen beziehungsweise Abbildungen erläutert. Das Ziel ist es zu verstehen, auf welchem Gebiet noch Handlungsbedarf besteht und welche Abgase man mindern sollte. Die durch den Flugzeugverkehr verursachte Lärmbelastung wird ebenfalls besprochen.





DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU

Umweltaspekte des Luftverkehrs - Reiseflug

Aufgabenstellung zum *Projekt* gemäß Prüfungsordnung

Hintergrund

Eine stetig wachsende Weltwirtschaft und zunehmende globale Mobilität führten zu einem rasanten Wachstum des Luftverkehrs, der in seiner heutigen Form starken Einfluss hat auf die Umwelt im Nah- und Fernbereich von Flughäfen. Angestrebt wird daher ein nachhaltiger Luftverkehr basierend auf regenerativen Energiequellen, klimaneutral und ohne übermäßig belastende Schadstoffe und Lärm. Diese Projektarbeit wird im Rahmen des Forschungsprojekts "Grüner Frachter" (<http://GF.ProfScholz.de>) vergeben.

Aufgabe

Aufgabe ist eine

- umfangreiche Recherche unter Einbeziehung von Bibliotheken und Internet,
- systematische Darstellung aller Umweltaspekte des Luftverkehrs,
- einleitende Darstellung der Methoden zur Quantifizierung der Umweltbelastungen.

Stichworte zum Thema sind dabei u. a.: Globalisierung, Kommunikation, Reisen, Fracht, Energie, Emissionen (am Flughafen und in der Atmosphäre), Klimawandel, Treibhauseffekt, Kondensstreifen, Ozonschicht, Lärmbelastung (Definitionen, Entstehung, Darstellung, Auswirkungen, Reduktion), Flächenverbrauch durch Flughäfen, Flugzeug Life Cycle / Recycling, Ver- und Entsorgung (in Flugzeugbau, Flugzeugwartung, Flugbetrieb), umweltgerechte Flugführung, Anreizsysteme für nachhaltigen Luftverkehr.

Die Ergebnisse sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Es sind die DIN-Normen zur Erstellung technisch-wissenschaftlicher Berichte zu beachten.

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder.....	5
Verzeichnis der Tabellen.....	6
Liste der Abkürzungen.....	7
1 Einleitung	8
1.1 Motivation	8
1.2 Verzeichnis der Begriffe	8
1.3 Ziel der Arbeit	10
1.4 Aufbau der Arbeit.....	10
2 Grundlagen zum Klimasystem	11
2.1 Aufbau der Atmosphäre	11
2.1.1 Troposphäre.....	12
2.1.2 Tropopause	12
2.1.3 Stratosphäre	13
2.1.4 Ozonschicht.....	13
2.2 Der Treibhauseffekt.....	14
2.3 Kondensstreifen.....	16
3 Emissionen des Luftverkehrs	19
3.1 Entstehungsorte der Emissionen im Luftverkehr	19
3.1.1 Die Emission in den verschiedenen Flugphasen	19
3.1.2 Emissionen während der Luftfahrzeugabfertigung	21
3.1.3 Emissionen aus stationären Quellen.....	22
3.1.4 Emissionen durch den landseitigen Verkehr	22
3.2 Wirkungen der Luftverkehrsemissionen im Einzelnen	23
3.2.1 Kohlendioxid	23
3.2.2 Wasserdampf	24
3.2.3 Stickoxide	25
3.2.4 Übrige Schadstoffe	28
3.3 Auswirkungen der Schadstoffe auf die einzelnen Atmosphärenschichten	29
3.3.1 Auswirkungen auf die Troposphäre	29
3.3.2 Auswirkungen auf die Stratosphäre	29

4	Optionen zur Minderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs	31
4.1	Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten.....	31
4.2	Bessere Auslastung	32
4.3	Optimierung des Triebwerkes unter Klimagesichtspunkten	32
4.4	Verbesserung der Aerodynamik.....	33
4.4.1	Winglets.....	33
4.4.2	Riblets.....	34
4.5	Frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen	34
5	Luftverkehr und Lärmbelastung	35
5.1	Allgemein	35
5.2	Lärmquellen.....	35
5.3	Maßnahmen	37
5.3.1	Flugbeschränkungen.....	37
5.3.2	An- und Abflugkonzepte	38
5.4	Lärmabhängige Gebühren	39
5.5	Bauliche Maßnahmen an Gebäuden.....	39
5.6	Folgen von Fluglärm	39
5.6.1	Störungen.....	40
5.6.2	Schlaf.....	41
5.6.3	Stress und Herz- Kreislaufkrankheiten	42
5.6.4	Gedächtnis	43
6	Zusammenfassung	44
	Literaturverzeichnis	45

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Aufbau der Atmosphäre	11
Bild 2.2	Ambossform einer Wolke	12
Bild 2.3	Die vertikale Verteilung des Ozons in der Stratosphäre und der Troposphäre.....	14
Bild 2.4	Der Treibhauseffekt.....	15
Bild 2.5	Globale Verteilung von Kondensstreifen in der Atmosphäre im Jahr 1992	16
Bild 2.6	Himmel am Morgen ohne Zirruswolken	17
Bild 2.7	Himmel mit Zirruswolkenbedeckung.....	17
Bild 2.8	Streuung des Sonnenlichts durch Zirruswolken.....	18
Bild 3.1	Abgase im Luftverkehr.....	19
Bild 3.2	Schematische Darstellung der einzelnen Flugphasen	20
Bild 3.3	Emissionsmassenstrom in Abhängigkeit von der Flugphase	21
Bild 3.4	Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit durch die Wasserdampfemission von Flugzeugen in Abhängigkeit von der Flughöhe	24
Bild 3.5	Zusammenhang zwischen dem Lastzustand der Triebwerke und dem Emissionsfaktor	27
Bild 4.1	Winglets.....	33
Bild 5.1	Lärmquellen am Triebwerk	36
Bild 5.2	Lärmentstehung durch den Luftwiderstand.....	36
Bild 5.3	Störung in der Wohnung durch Flugverkehr in Abhängigkeit von der betreffenden Lärmbelastung.....	41
Bild 5.4	Wirkungsebenen von Lärm auf die Herz- Kreislauffähigkeit	42

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1	Vergleich der verschiedenen internationalen Verkehrsflughäfen.....	23
Tabelle 3.2	NOx-Entstehung pro100 kg Treibstoff	26

Liste der Abkürzungen

°C	Grad Celsius
APU	Auxiliary Power Unit
Ca	Circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
dB	Dezibel
Ft	Feet
GWh	Gigawattstunde
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoff
ICAO	International Civil Aviation Organization
Kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kWh	Kilowattstunde
LTO-Zyklus	Landing and Take Off-Zyklus
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
O ₃	Ozon
PAX	Persons Approximately
SO ₂	Schwefeldioxid
URL	Universal Resource Locator
UV-Strahlen	Ultraviolettstrahlen
WWW	World Wide Web

1 Einleitung

1.1 Motivation

Dieses Projekt ist ein Teil des Forschungsprojektes "Grüner Frachter". Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, neue Frachtflugzeugkonfigurationen zu erforschen, wobei nachhaltige Flugzeuge mit umweltfreundlichem Flugbetrieb im Vordergrund stehen. Wichtige technische Aspekte sind hierbei u.a. ein geringer Kraftstoffverbrauch, geringer Fluglärm, neue Kraftstoffarten, geringe Betriebskosten, auch durch reduzierte Besatzung, und geringe Emissionen.

In diesem Projekt werden hauptsächlich die Entstehungsorte und Auswirkungen der Emissionen, die während dem Reiseflug generiert werden, diskutiert und besprochen. In folgenden Schritten des Forschungsprojektes kann man dann nach Lösungen bezüglich der Emissionen forschen.

1.2 Verzeichnis der Begriffe

APU

Die Auxiliary Power Unit ist eine kleine, vorwiegend in feuerdichten Abteilen im Rumpheck von Verkehrsflugzeugen installierte Gasturbine, die während der Bodenzeit und bei Notfällen während des Fluges die elektrische, hydraulische und pneumatische Versorgung des Flugzeugs übernehmen kann.

Flugzeugkategorie D

Flugzeuge werden anhand deren minimaler Landungsgeschwindigkeit in verschiedene Kategorien aufgeteilt. Ein Flugzeug der Kategorie D hat eine Annäherungsgeschwindigkeit, die zwischen 258 und 295 km/h liegt.

Kohlenmonoxid

Ergebnis unvollständiger Verbrennung von fossilen Energieträgern, wobei sich wegen einer unzureichenden Sauerstoffzufuhr ein Kohlenstoffatom jeweils mit nur einem Sauerstoffatom verbinden kann.

Kohlendioxid

Farb- und geruchloses Gas, das bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern sowie bei der Atmung von Menschen und Tieren entsteht. Pflanzen nehmen CO₂ auf und wandeln dieses in Kohlenhydrate und Sauerstoff um.

Kondensstreifen

Durch hochfliegende Flugzeuge verursachte künstliche Wolken. Wasserdampf, der bei der Verbrennung in den Triebwerken entsteht, bildet feine Tröpfchen, die wiederum sofort zu Eiskristallen gefrieren. Kondensstreifen stehen in Verdacht, die Wärmerückstrahlung in den Weltraum zu beeinflussen und zur Erwärmung der Erde beizutragen.

LTO-Zyklus

Auf internationaler Ebene werden die Emissionen des Luftverkehrs grundsätzlich in die Kategorien "Reiseflug" und "LTO-Zyklus" eingeteilt. Der LTO-Zyklus ist ein standardisierter Zyklus, der durch die ICAO ins Leben gerufen wurde und besteht aus vier Betriebsphasen: Take-off, Climb out, Approach und Idle. Mit diesem Flugzyklus werden die Emissionen bis in 915 m Höhe abgedeckt.

Spurengase

Gase wie Kohlendioxid, Ozon, Methan, Lachgas und Wasserdampf, die in der Atmosphäre zwar nur in sehr geringen Konzentrationen vorkommen, in Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt aber von erheblicher Bedeutung für das Klima und die Atmosphärenchemie sind.

Stickoxide

Hauptsächlich Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxidverbindungen, die durch die Oxidation von Stickstoff in der Luft bei hohen Temperaturen entstehen. Stickoxide tragen zu einer bodennahen Ozonbildung bei und sind mitverantwortlich für den sauren Regen.

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Gemisch von Kohlenwasserstoffen, das bei einer unvollständigen Verbrennung übrig bleibt. UHC tragen in Bodennähe zur Entstehung von Sommersmog bei und gelten teilweise als krebserregend.

Verweildauer von Schadstoffen

Die Zeitspanne, die vergeht, bis emittierte Schadstoffe in der Atmosphäre durch chemische Prozesse in andere Stoffe umgewandelt oder abgebaut werden.

Winglets

Konstruktion an den Flügelspitzen zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften. Winglets verringern den kraftstoffzehrenden Widerstand durch Luftwirbel, die an der Flügelspitze zwischen Tragflächenober- und Unterseite entstehen.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Forschungsprojekt "Grüner Frachter" hat als Ziel, neue Frachtflugzeugkonfigurationen zu erforschen, um sowohl Flugzeuge als auch den gesamten Flugbetrieb umweltfreundlicher zu gestalten. Hierzu ist es zuerst notwendig, die Grundlagen unseres Klimasystems zu umschreiben und eine Übersicht von den Flugzeugemissionen zu geben, die dieses Klimasystem beeinflussen. Diese beiden Punkte finden sich in Abschnitt 2 und 3 wieder. Abschnitt 4 gibt eine Übersicht von den bereits existierenden Techniken und Möglichkeiten, die schädlichen Emissionen zu reduzieren. Zum Abschluss wird in Abschnitt 5 auch noch die Lärmbelastung dargestellt, die der Flugverkehr verursacht. Diese Arbeit kann dann als Grundlage für weitere Forschungsprojekte im Rahmen des Gesamtprojekts "Grüner Frachter" verwendet werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Um diese Projektarbeit so strukturiert wie möglich darzustellen, wurde der Aufbau in folgende Abschnitte unterteilt:

- Abschnitt 1** Beinhaltet die Einleitung.

- Abschnitt 2** Befasst sich mit den Grundlagen von unserem Klimasystem. Es werden die verschiedenen Atmosphärenschichten, der Treibhauseffekt und die Kondensstreifen erläutert.

- Abschnitt 3** Setzt sich mit den Emissionen des Luftverkehrs auseinander. Beschreibt die Entstehungsorte der Schadstoffe sowie die Wirkung der Emissionen auf die Umwelt.

- Abschnitt 4** Beschäftigt sich mit den Möglichkeiten, die zur Reduzierung der Schadstoffe beitragen.

- Abschnitt 5** Beschäftigt sich mit der Lärmbelastung, die der Flugverkehr verursacht.

2 Grundlagen zum Klimasystem

2.1 Aufbau der Atmosphäre

Die Atmosphäre stellt im Vergleich zu den Dimensionen des festen Erdkörpers nur eine sehr dünne Gasschicht dar. Mehr als 90% ihrer Masse befindet sich in den unteren 8 bis 15 km. In dieser Schicht, der sogenannten Troposphäre, spielt sich außerdem das gesamte Wettergeschehen ab. Darüber hinaus kann die Atmosphäre in zahlreiche weitere Bereiche eingeteilt werden. Die einzelnen Schichten bezeichnet man als Sphären, während die Grenzen dazwischen Pausen genannt werden (**Bild 2.1**). In mittleren Breiten in einer Höhe von ca. 11 km befindet sich die Tropopause, also die Schicht der Atmosphäre, die das gesamte Wettergeschehen von der Stratosphäre trennt.

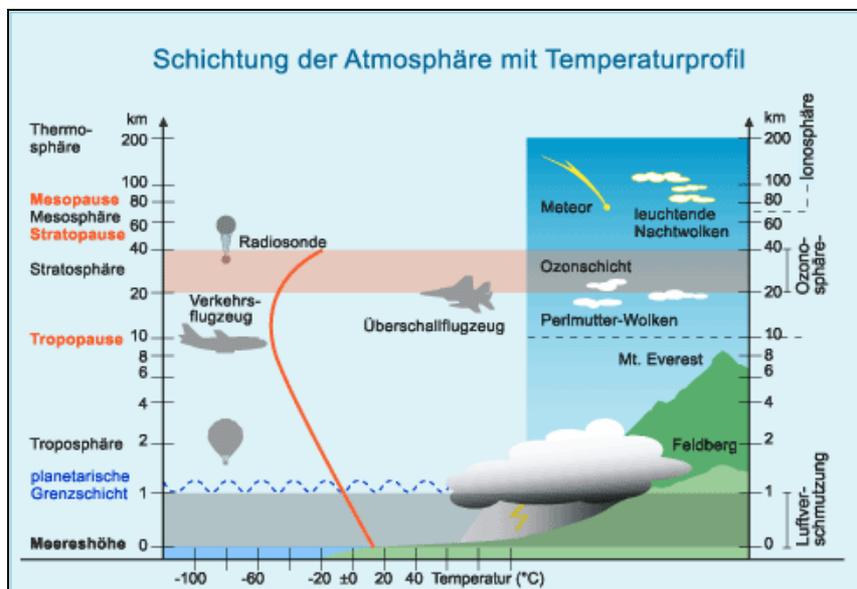


Bild 2.1 Aufbau der Atmosphäre (Bauer 2007)

2.1.1 Die Troposphäre

Weltumspannende Windsysteme mit Hoch- und Tiefdruckgebieten, Kalt- und Warmfronten sowie tropische Wirbelstürme charakterisieren das Wettergeschehen in der Troposphäre. Diese Wetterkomponenten bewirken im Zusammenspiel mit dem Wasserkreislauf (Verdunstung → Wolkenbildung → Niederschlag) zahlreiche Austauschprozesse innerhalb der Troposphäre. Warme Luftmassen vom Äquator gelangen dadurch immer wieder in gemäßigte Breiten und werden bis in die Polargebiete transportiert. Ohne diesen Austausch wäre es am Äquator noch heißer und an den Polen noch kälter (Armbruster 1996).

Der Austauschprozess in der Troposphäre stellt den wichtigsten Reinigungsprozess innerhalb der gesamten Erdatmosphäre dar. Insbesondere kleinere Partikel und wasserlösliche Gase kann der Niederschlag in kurzer Zeit auswaschen. Die Verweildauer dieser Stoffe in der Troposphäre beträgt daher nur wenige Tage bis Wochen. Es gibt jedoch Substanzen, die allein durch Niederschläge nicht ausgewaschen werden, sondern erst durch chemische Umwandlungsprozesse aus der Troposphäre entfernt werden können und sich demnach sehr lange dort aufhalten. Während die Winde dafür sorgen, dass die atmosphärischen Bestandteile gleichmäßig über die gesamte Hemisphäre verteilt werden, sind die Vorgänge, die Substanzen umwandeln oder binden, in Bezug auf Raum und Zeit sehr variabel. Je nach Art des Stoffes kann die globale Verteilung daher von einer Gleichverteilung abweichen und bis zu zwei Jahren dauern. Konkret bedeutet dies, dass langlebige Schadstoffe homogen über die ganze Troposphäre verteilt sind, bevor sie abgebaut werden können. Die Temperatur nimmt in der Troposphäre bis auf eine Höhe von ca. 11000 m je 1000 Höhenmeter linear um 6-7°C ab. Geht man von einer durchschnittlichen Temperatur von +15°C am Boden aus, fällt die Temperatur in 11.000 m Höhe auf -56°C. (Armbruster 1996)

2.1.2 Tropopause

In der Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre liegt die Temperatur am Äquator bei etwa -80°C und steigt zu den Polen hin auf durchschnittlich -50°C an. Da die Tropopause wie eine Sperrschicht auf das Wettergeschehen wirkt, wird sie gelegentlich im Sommer sichtbar, wenn hochaufragende Gewitterwolken an diese Schicht stoßen, dadurch nicht weiter wachsen können und die charakteristische Ambossform (**Bild 2.2**) bilden.



Bild 2.2 Ambossform einer Wolke (Beyer 2007)

2.1.3 Stratosphäre

Im unteren Bereich der Stratosphäre, in einer Höhe bis zu 20 km, bleibt die Temperatur mit -50 bis -60°C relativ konstant. Danach nimmt die Temperatur wieder zu und erreicht mit 0°C in rund 50 km Höhe ein Maximum. Ursache dafür ist das Ozon, das durch seine filterwirkungsschädigende Eigenschaft ultraviolette Strahlung absorbiert, dadurch Energie aufnimmt und so die Stratosphäre erwärmt. Weitere Schichten der Atmosphäre, die sich in 50 km Höhe anschließen, haben auf das Klima nicht mehr den geringsten Einfluss. Normalerweise gelangen Schadstoffe nicht in die Stratosphäre, doch die Tropen stellen einen Sonderfall dar, da hier effektive Aufwärtsströmungen vorhanden sind. Nach (**Armbruster 1996**) dauert der Transport dieser Stoffe in die Höhen bis zu 30 km etwa vier Jahre. Je nach geographischer Breite sind erneut drei bis vier Jahre erforderlich, bis die Stoffe an anderer Stelle wieder abgesunken und aus der Atmosphäre entfernt sind. Für Schadstoffe, die sich im untersten Bereich der Stratosphäre, also direkt über der Tropopause befinden, wird mit einer Verweildauer von einem Jahr gerechnet, bevor die Stoffe in die Troposphäre absinken und ausgewaschen werden. Da fast der gesamte Flugverkehr (Reiseflug) in der Tropopause oder im unteren Bereich der Stratosphäre bei einem Temperaturminimum von -56°C abgewickelt wird, bedeutet es demzufolge, dass die freigesetzten Schadstoffe durchschnittlich rund ein Jahr in der Atmosphäre bleiben.

2.1.4 Ozonschicht

Die Ozonschicht schirmt die Erdoberfläche von schädlichen UV-Strahlen ab. Sie ist allerdings auch ein starkes Treibhausgas, dessen Konzentration sehr variabel ist. Die Ozonkonzentration wird durch die Dynamik der atmosphärischen Chemie bestimmt, die wiederum vom Breiten- und Längengrad, der Höhenlage sowie der Hintergrundkonzentration an Ozon beeinflusst wird. Luftverkehrsbedingte Stickoxide beschleunigen die lokale Bildung von Ozon in der Troposphäre und der unteren Stratosphäre.

Die Verteilung:

Das Spurengas Ozon besitzt für das Klima und das Leben auf der Erde sehr unterschiedliche Eigenschaften, die stark höhenabhängig sind. Ebenso hängt die Verteilung des Ozons stark von der Höhe ab. Etwa 90% der gesamten Ozonmenge entfallen auf die Stratosphäre (12-50 km Höhe) und nur 10% befinden sich in der Troposphäre (**Bild 2.3**). Das stratosphärische Ozon dient als Schutzschild gegen die lebensgefährliche UVB- und UVC-Strahlung. (**Berthoud 2005**)

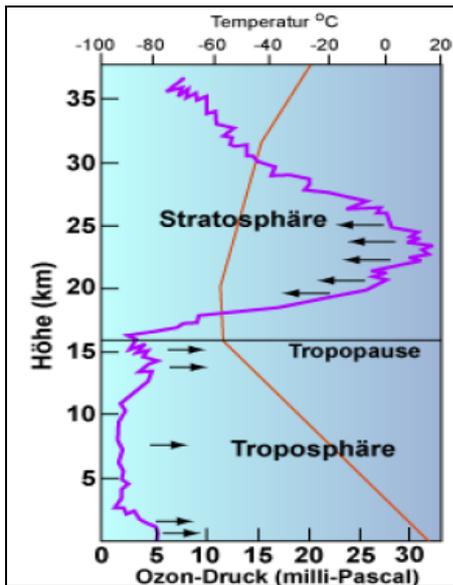


Bild 2.3 Die vertikale Verteilung des Ozons in der Stratosphäre und der Troposphäre (Berthoud 2005)

Die schwarzen Pfeile bezeichnen Veränderungstendenzen durch den Einfluss des Menschen: Abnahme der Ozonmenge in der unteren Stratosphäre, Zunahme in der Troposphäre.

2.2 Der Treibhauseffekt

Nach (Rahmstorf 2006) liegt der Grund für den befürchteten Temperaturanstieg als Folge des steigenden CO_2 -Gehalts der Atmosphäre im sogenannten Treibhauseffekt, der hier kurz erläutert werden soll. Die mittlere Temperatur auf der Erde ergibt sich aus einem einfachen Strahlungsgleichgewicht. Einige Gase in der Atmosphäre greifen in die Strahlungsbilanz ein, indem sie zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung. Dadurch kann Wärme von der Oberfläche nicht so leicht ins All abgestrahlt werden; es kommt zu einer Art "Wärmestau" in der Nähe der Erdoberfläche. Anders formuliert: Die Oberfläche strahlt, wie jeder physikalische Körper, Wärme ab - je höher die Temperatur, desto mehr. Diese Wärmestrahlung entweicht aber nicht einfach ins Weltall, sondern wird unterwegs in der Atmosphäre absorbiert, und zwar von den Treibhausgasen. Die wichtigsten dieser Gase sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan. Diese Gase strahlen die absorbierte Wärme wiederum in alle Richtungen gleichmäßig ab, einen Teil also auch zurück zur Erdoberfläche. Dadurch kommt an der Oberfläche mehr Strahlung an als es ohne die Treibhausgase der Fall ist: nämlich nicht nur die Sonnenstrahlung, sondern zusätzlich die von den Treibhausgasen abgestrahlte Wärmestrahlung. Ein Gleichgewicht kann sich erst wieder einstellen, wenn die Oberfläche zum Ausgleich auch mehr abstrahlt, also wenn sie wärmer ist. Dies ist der Treibhauseffekt (Bild 2.4).

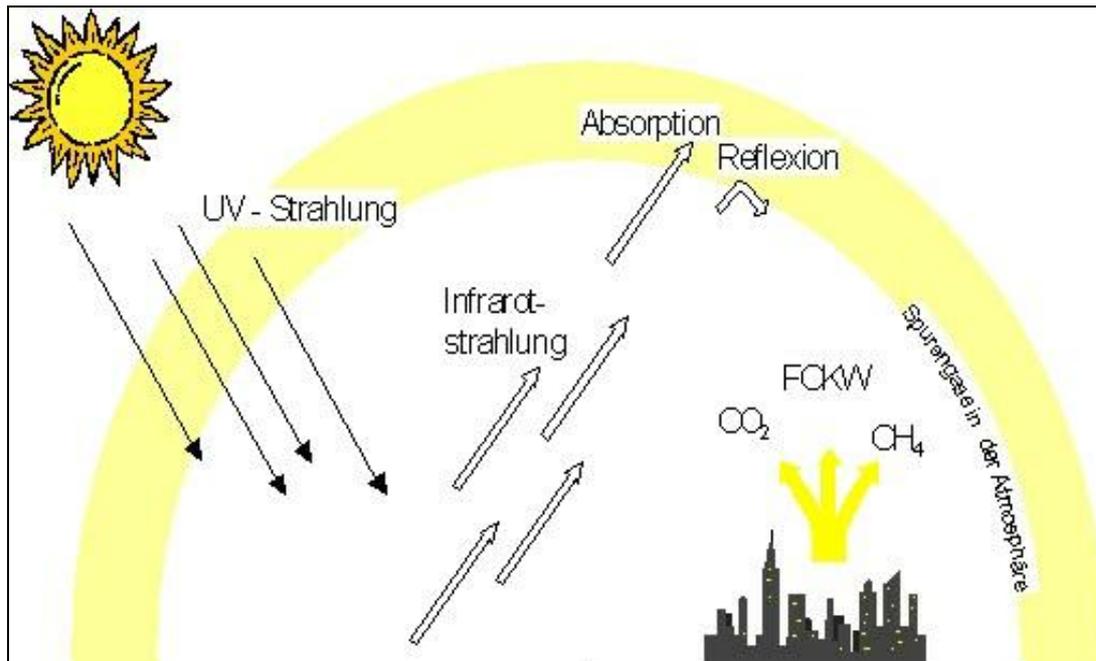


Bild 2.4 Der Treibhauseffekt nach (Makishi 2007)

Der Treibhauseffekt ist ein ganz natürlicher Vorgang: Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan kommen von Natur aus seit jeher in der Atmosphäre vor. Der Treibhauseffekt ist sogar lebensnotwendig, ohne ihn wäre unser Planet völlig gefroren. Eine einfache Rechnung zeigt die Wirkung. Die ankommende Sonnenstrahlung pro Quadratmeter Erdoberfläche beträgt 342 Watt. (Rahmstorf 2006). Etwa 30% davon werden reflektiert, es verbleiben 242 Watt, die teils in der Atmosphäre, teils von Wasser- und Landflächen absorbiert werden. Ein Körper, der diese Strahlungsmenge abstrahlt, hat nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Physik eine Temperatur von -18°C . Wenn die Erdoberfläche im Durchschnitt diese Temperatur hätte, würde sie also gerade so viel abstrahlen, wie an Sonnenstrahlung ankommt. Tatsächlich beträgt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche aber $+15^{\circ}\text{C}$. Die Differenz von 33 Grad wird vom Treibhauseffekt verursacht, der daher erst das lebensfreundliche Klima auf der Erde möglich macht (Rahmstorf 2006).

Der Grund zur Sorge über die globale Erwärmung besteht darin, dass der Mensch diesen Treibhauseffekt nun verstärkt. Da der Treibhauseffekt insgesamt für eine Temperaturdifferenz von 33 Grad verantwortlich ist, kann bereits eine prozentual geringe Verstärkung desselben zu einer Erwärmung um mehrere Grad führen.

2.3 Kondensstreifen

Kondensstreifen bilden sich in einer ausreichend kalten Luft durch die warmen und feuchten Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs. Durch die Erhöhung der relativen Feuchte der kälteren Umgebungsluft entstehen Eiskristalle, die als linienförmige Wolken sichtbar werden. In trockener Luft verdunsten Eispartikel schnell, und Kondensstreifen bleiben nur kurz bestehen. Ihr Beitrag zur Klimaerwärmung ist gering. Wenn die Umgebungsluft jedoch eisgesättigt und sehr feucht ist, können Kondensstreifen bestehen bleiben und sich ausbreiten (**Schumann 2000**). Wenn Kondensstreifen ihre charakteristische Linienform verlieren, sind sie nicht mehr von Zirruswolken zu unterscheiden. Dauerhafte Kondensstreifen reduzieren sowohl die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche als auch die Menge der langwelligen Strahlung von der Erde in den Weltraum. Im Durchschnitt erhöhen sie jedoch den Treibhauseffekt, insbesondere während der Nacht und über warmen und hellen Oberflächen. Die Regionen, in denen luftverkehrsbedingte Kondensstreifen in der Vergangenheit überwiegend aufgetreten sind, können relativ gut lokalisiert werden: Vereinigte Staaten von Amerika, Europa und der Nordatlantik (**Bild 2.5**).

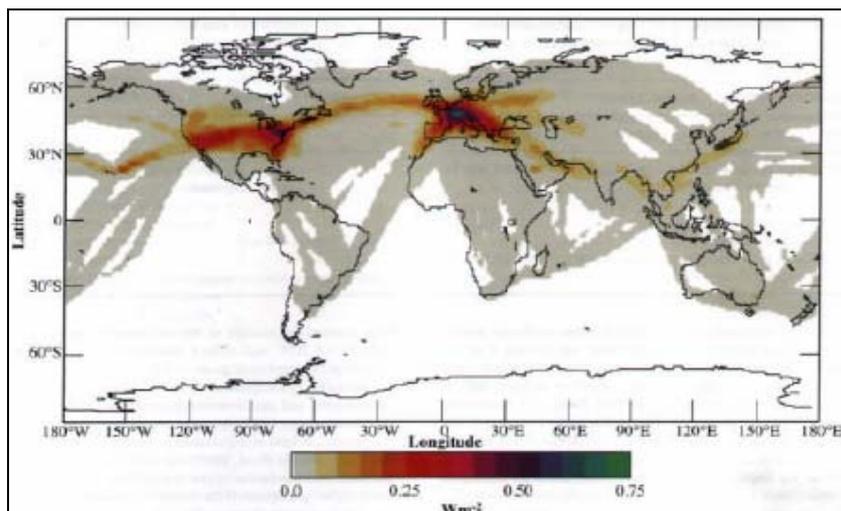


Bild 2.5 Globale Verteilung von Kondensstreifen in der Atmosphäre im Jahr 1992 (**Cames 2004**)

Durch die Emission von Wasserdampf aus den Flugzeugtriebwerken bilden sich im oberen Bereich der Troposphäre sichtbare Kondensstreifen, die in vielen Fällen in Zirruswolken übergehen. Nach einer Untersuchung nahmen die Zirruswolken allein im Jahrzehnt 1982 bis 1991 weltweit über Land um etwa 1%, über den Ozeanen um 3,5% zu. Über dem Nordatlantik lag die Zunahme aufgrund des starken Flugverkehrs bei mehr als 7%, über den USA mit dem stärksten Flugverkehr bei Flugrouten bis zu 16% (**Teufel 2007**). Die dünnen Zirruswolken lassen das meiste Sonnenlicht ungehindert passieren, behindern jedoch die Rückstrahlung der am Boden entstandenen Infrarotstrahlung in den Weltraum. Damit tragen sie nach neuesten Erkenntnissen zur Klimaerwärmung bei. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Beispiele von Kondensstreifen und ihrem Übergang in Zirruswolken an verschiedenen Tagen. Das Phänomen tritt vor allem an den Tagen auf, bei denen der Himmel ohne Flugzeuge strahlend

blau wäre. Die durch Flugzeuge entstehenden Kondensstreifen verbreitern sich und wandeln sich innerhalb von 20 bis 100 Minuten in Zirruswolken um.

Der frühmorgens meist noch blaue Himmel (**Bild 2.6**) geht im Laufe des Tages (**Bild 2.7**) durch die Kondensstreifen in eine weißgraue Zirruswolkenbedeckung über.



Bild 2.6 Himmel am Morgen ohne Zirruswolken



Bild 2.7 Himmel mit Zirruswolkenbedeckung

Ein zusätzlicher Effekt entsteht durch Partikelemissionen in den Abgasen der Flugzeugmotoren. Diese bilden in den ansonsten relativ reinen Luftschichten in 8-10 km Höhe Kondensationskeime, an denen sich Eiskristalle bilden. Dies begünstigt zusätzlich die Bildung von Zirruswolken. Dieser Effekt tritt auch nach der Verdünnung der Flugzeugabgase fernab der Flugrouten auf.

Nach Teufel (**Teufel 2007**) haben Zirruswolken neben dem Treibhauseffekt noch einen anderen Effekt, der bisher unbeachtet blieb: Sie streuen das Sonnenlicht und verändern dadurch die Sichtverhältnisse in der Atmosphäre. Sichtbare Zirruswolken durch den Flugverkehr bilden sich vor allem an klaren Sonnentagen, die früher (ohne Flugverkehr) von strahlend blauem Himmel und klarer, kontrastreicher Sicht in der Atmosphäre geprägt waren. Die Zirruswolken bewirken eine Streuung des Sonnenlichts an den kleinen Eiskristallen der Wolken. Dadurch wird aus parallelem Sonnenlicht diffuses Sonnenlicht (**Bild 2.8**), welches zum einen das tiefe Blau des Himmels in ein Graublau verwandelt. Zum anderen verändert sich die

Sicht, die bei parallelem Sonnenlicht durch einen hohen Kontrast in der Atmosphäre (klare Schattenbildungen) gekennzeichnet ist, in eine kontrastarme.

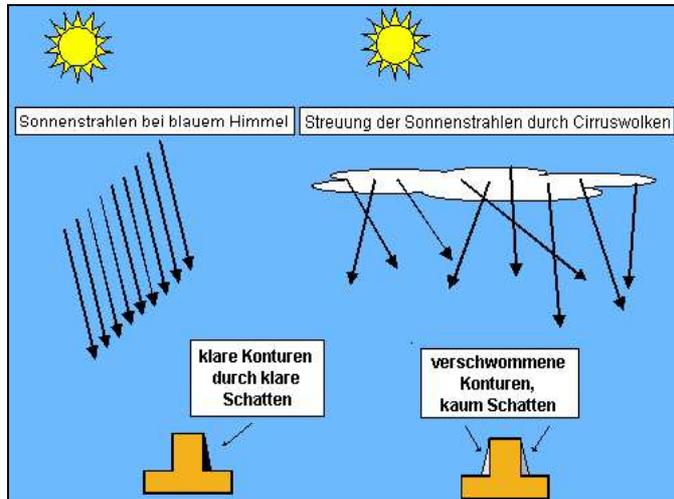


Bild 2.8 Streuung des Sonnenlichts durch Zirruswolken (Teufel 2007)

3 Emissionen des Luftverkehrs

Durch den Luftverkehr werden Emissionen in die globale Atmosphäre ausgestoßen, die zum Klimawandel und zur Zerstörung der Ozonschicht beitragen. Die Emissionen und ausgestoßenen Partikel verändern die Konzentration an Treibhausgasen – Kohlendioxid (CO_2) und Ozon (O_3). Des Weiteren lösen sie die Bildung von Kondensstreifen aus und können das Auftreten von Zirruswolken unterstützen – all dies trägt zum Klimawandel bei.

3.1 Entstehungsorte der Emissionen im Luftverkehr

3.1.1 Die Emission in den verschiedenen Flugphasen

Um die Wirkungsweise der bei der Verbrennung von Treibstoff entstehenden Schadstoffe analysieren zu können, soll zunächst untersucht werden, welche Emissionen generell entstehen und welche Abhängigkeiten sich dabei ergeben. Nach (**Armbruster 1996**) setzt sich das Kerosin, ohne Berücksichtigung der geringen Mengen an Zusatzstoffen, aus ca. 85,5% Kohlenstoff, 14% Wasserstoff und 0,05% Schwefel zusammen, wobei die mittlere Dichte des Treibstoffes 0,79 kg/Liter beträgt. **Bild 3.1** zeigt die Reaktionsprodukte, die durchschnittlich bei der Verbrennung von 1 kg Kerosin mit 3,4 kg Sauerstoff entstehen.

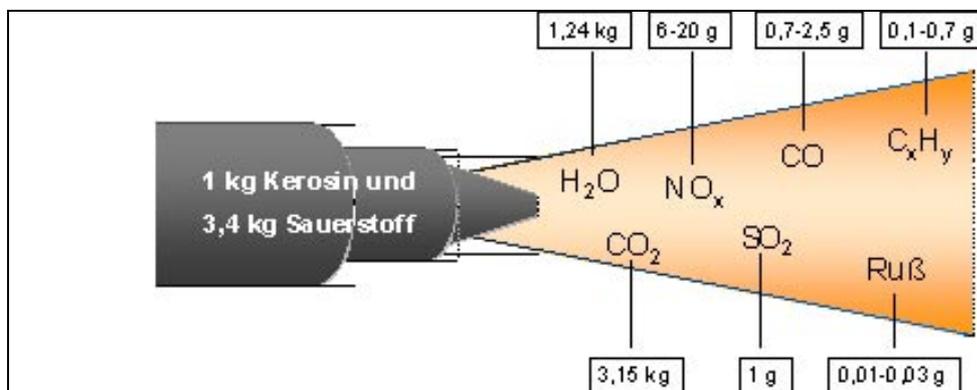


Bild 3.1 Abgase im Luftverkehr nach (**Hannover 2007**)

Die Emission von Stickoxid, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Ruß sind sehr stark von der Verbrennungsführung, der Fluggeschwindigkeit sowie dem Lastzustand der Triebwerke abhängig. Was die Emission am Boden und während der Start- und Landephase betrifft, sind von der internationalen zivilen Luftfahrt-Organisation (ICAO) bereits Grenzwerte für maximale Schadstoffmengen, bezogen auf den jeweiligen Triebwerkschub, festgelegt worden. Da es für das Entstehen und die Wirkungsweise von Schadstoffen entscheidend ist, in welchem Betriebszustand sich das jeweilige Flugzeug befindet, hat man die einzelnen Phasen genau definiert. (**Armbruster 1996**).

- Taxi-out: Rollen vom Flughafenterminal bis zur Startbahn
 Take-off: Ausgehend von der Standposition am Anfang der Startbahn bis zum Abheben in eine Höhe von 35 Fuß
 Climb-out: Steigflug im Anschluss an den Start
 Cruise: Reiseflug
 Descent: Abstieg nach Verlassen der Reiseflughöhe
 Approach: Landeanflug bis zum Verlassen der Landebahn
 Taxi-in: Rollen von der Landebahn bis zum Terminal

Im Luftverkehr wird im Zusammenhang mit dem Treibstoffverbrauch und den Emissionen in der Regel eine Unterteilung nach bodennahem Bereich bzw. dem Landing & Take-off-Zyklus (bis 3.000 ft bzw. 915 m), Steig- und Sinkflug (Climb und Descent) sowie nach Reiseflugbereich (Cruise) vorgenommen. In **Bild 3.2** werden die verschiedenen Flugphasen dargestellt.

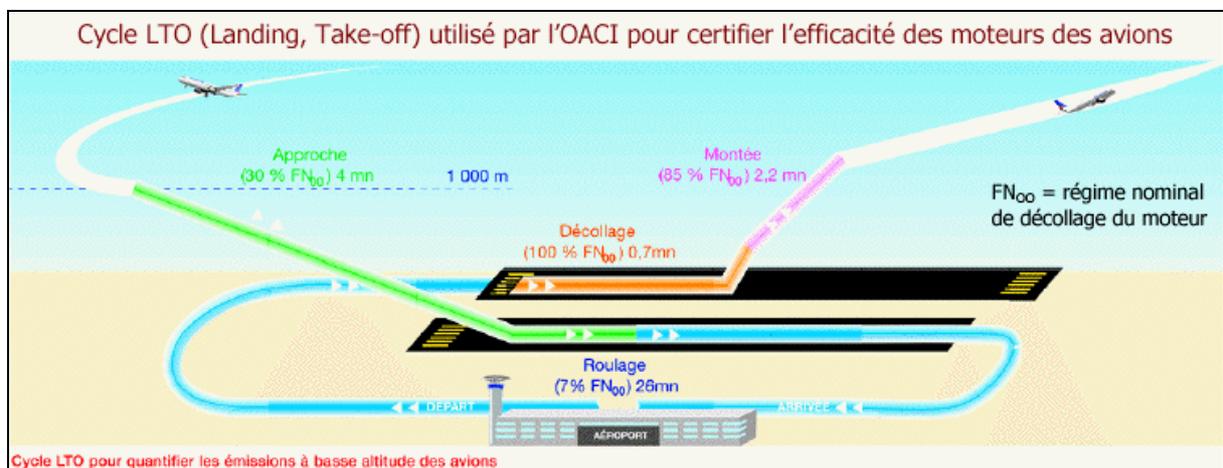


Bild 3.2 Schematische Darstellung der einzelnen Flugphasen (UFNCA 2007)

In **Bild 3.3** sind die Triebwerksemissionen von NO_x, HC und CO für den LTO-Zyklus in Gramm pro Sekunde in Abhängigkeit von der Flugphase für ein Flugzeug der Kategorie D beispielhaft dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass vor allem in der Start- und Steigflugphase die Stickoxidemissionen freigesetzt werden, während beim Taxiing der Ausstoß von CO-Emissionen dominiert.

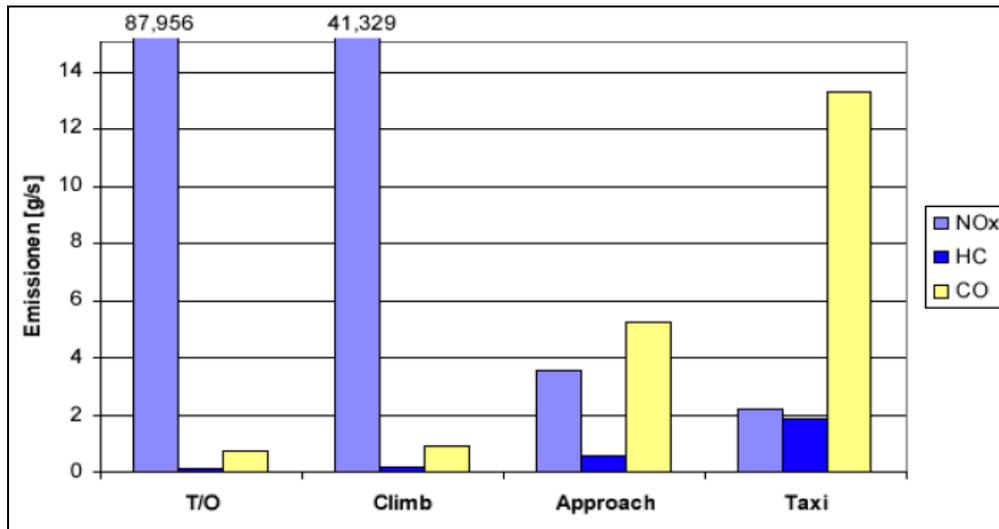


Bild 3.3 Emissionsmassenstrom in Abhängigkeit von der Flugphase (Hüttig 2000)

Während des Reiseflugs sowie am Ende der Climb- und am Anfang der Descent-Phase befindet sich ein Flugzeug des internationalen Flugverkehrs zum überwiegenden Teil in Höhen zwischen 9 und 12 km über dem Meeresspiegel. Lediglich Überschallflugzeuge fliegen in der Höhe von ca. 17 bis 20 km.

Die Emissionen der Unterschallflugzeuge wirken zum überwiegenden Teil auf die obere Troposphäre, die der Überschallflugzeuge auf die untere Stratosphäre ein. Die zwischen den beiden Sphären liegende Tropopause, eine dünne Grenzschicht, ist ebenfalls stark beeinflusst. Ihre Höhe hängt von der geographischen Breite, der Jahreszeit und dem aktuellen Wettergeschehen ab. Sie liegt am Äquator ungefähr in einer Höhe von 16 km und an den Polen in etwa 8 km Höhe. (Cames 2004). Je nach Sphäre unterscheidet sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Emissionen des Luftverkehrs hat, spielt der Entstehungsort der Emission in Bezug auf ihren Treibhauseffekt eine große Rolle. Eine Differenzierung nach Flughöhe und nach geographischer Breite ist für die Wirkungsanalyse von grundlegender Bedeutung.

3.1.2 Emissionen während der Luftfahrzeugabfertigung

Neben dem reinen Flugbetrieb verursacht die Abfertigung der Luftfahrzeuge am Flughafen weitere Schadstoffemissionen. Die Flugzeugabfertigung dient zur Ent- und Beladung, Betankung und Reinigung der Luftfahrzeuge sowie zur Versorgung mit Frischwasser und Verpflegung und zur Vorbereitung für den nächsten Flug. In Bezug auf die Ermittlung von Reduktionspotentialen für den Schadstoffausstoß während der Luftfahrzeugabfertigung sind dabei folgende Emissionsquellen zu berücksichtigen:

- Emissionen durch den Betrieb der APU während der Abfertigung,
- Emissionen aus Kraftfahrzeugen während der Abfertigung der Luftfahrzeuge,
- Emissionen während der Betankung der Flugzeuge,
- Emissionen durch die Enteisung von Flugzeugen.

3.1.3 Emissionen aus stationären Quellen

Mit seiner Vielzahl an Gebäuden, Hallenkomplexen und Serviceeinrichtungen erzeugt ein Flughafen einen hohen Bedarf an Energie in Form von Elektrizität, Wärme und Kälte. So belief sich der gesamte Energieverbrauch des Flughafens Frankfurt 1997 auf rund 867 GWh für Strom, Gas, Fernwärme und Kälte, wovon rund 518 GWh auf die Stromversorgung entfiel. Der Flughafen München verzeichnete im Vergleich einen Gesamtenergieverbrauch von rund 332 GWh im Jahr 1996. Bezogen auf einen abzufertigenden Passagier ergibt sich somit in Anlehnung an diese zwei Beispielflughäfen ein durchschnittlicher Energieverbrauch eines Flughafens von ca. 20-22 kWh/PAX (**Hüttig 2000**).

3.1.4 Emissionen durch den landseitigen Verkehr

Der Betrieb eines Flugplatzes induziert landseitig zusätzlichen Kraftfahrzeugverkehr durch Passagiere und ihre Begleiter, Besucher, Beschäftigte, Lieferanten sowie den Lieferbetrieb für das Fracht- und Postaufkommen. Obwohl dieser Verkehr zum größten Teil außerhalb des Flughafengeländes innerhalb des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes erfolgt, sind die hieraus entstehenden Schadstoffemissionen dem Flughafen zuzurechnen, da sie durch den Flughafen verursacht werden. Aus der nachfolgenden **Tabelle 3.1** wird ersichtlich, dass die Zahl der Passagiere und Beschäftigten, welche die öffentlichen Verkehrsmittel zur An- und Abreise nutzen, an den verschiedenen Flughäfen deutlich schwankt. Gründe hierfür sind unter anderem in der Anbindung der Flughäfen an das öffentliche Verkehrsnetz zu finden. So ist beispielsweise der verkehrsstärkste Flughafen im Berliner Flughafensystem, Berlin-Tegel, nicht an ein Schienennetz angebunden.

Passagiere, die den Flughafen mit öffentlichen Verkehrsmitteln erreichen möchten, sind hier auf Busse angewiesen, die wiederum im Gegensatz zu U- oder S-Bahnen, eine geringere Attraktivität aufweisen, weil Staus auf den Straßen Verzögerungen verursachen können (**Hüttig 2000**).

Tabelle 3.1 Vergleich der verschiedenen internationalen Verkehrsflughäfen (Hüttig 2000)

Flughafen	Berlin-Tegel	Amsterdam	Frankfurt	München
	1995	1996	1997	1998
Passagiere [Mio.]	11,0	27,8	40,3	19,3
ÖPNV	19%	34%	24%	45%
Motorisierter Individualverkehr	81%	66%	76%	55%
Beschäftigte [Tsd.]	k.A.	43,4	57,5	17,3
ÖPNV	k.A.	19%	22%	19%
Motorisierter Individualverkehr	k.A.	81%	78%	81%

3.2 Wirkungen der Luftverkehrsemissionen im Einzelnen

Im Folgenden werden die Wirkungen der einzelnen Emissionen des Luftverkehrs im Reise-
flug dargestellt.

3.2.1 Kohlendioxid

Bei der Verbrennung von Flugzeugtreibstoffen entsteht Kohlendioxid, die bedeutendste einzelne Verursachersubstanz des Treibhauseffekts. Im Gegensatz zu Stickoxiden und Wasserdampf ist die klimatische Wirkung des CO₂ unabhängig von der Emissionshöhe. Die Kohlendioxidemissionen des Luftverkehrs sind somit uneingeschränkt mit denen aus sämtlichen sonstigen CO₂-Quellen vergleichbar (Fichert 1999). Da der CO₂-Ausstoß in einem fixen Verhältnis zum Treibstoffverbrauch steht - bei der Verbrennung einer Einheit Kerosin entstehen 3,15 Einheiten Kohlendioxid - lassen sich die globalen CO₂-Emissionen des Flugverkehrs sehr einfach anhand der Daten über den weltweiten Treibstoffverbrauch ermitteln. Aus dem Kerosinverbrauch des Luftverkehrs (176 Millionen Tonnen im Jahr 1990) folgen CO₂-Emissionen in Höhe von 554,4 Millionen Tonnen. Der Luftverkehr ist damit zu etwa 3% am energieverbrauchsbedingten CO₂-Ausstoß beteiligt. Geringfügig höhere Werte für den Anteil des Flugverkehrs am weltweiten Kohlendioxidausstoß ergeben sich bei Einbeziehung der Emissionen während der Treibstoffherstellung (Primärenergieverbrauch). Die Erhöhung der Oberflächentemperatur, die aus den CO₂-Emissionen des Luftverkehrs resultiert, kann somit derzeit als vernachlässigbar gering eingestuft werden (Fichert 1999).

3.2.2 Wasserdampf

Wasserdampf ist neben Kohlendioxid das stoffliche Hauptprodukt der chemischen Reaktionen bei der Nutzung fossiler Brennstoffe. Aus einem Kilogramm Kerosin entstehen bei der Verbrennung im Flugzeugtriebwerk u.a. 1,25 kg Wasser (Fichert 1999). Die Bedeutung des Luftverkehrs an den weltweiten natürlichen und anthropogenen Wasserdampfemissionen ist ausgesprochen gering. Durch den direkten Eintrag in die oberen Atmosphärenschichten entfaltet der von Flugzeugen emittierte Wasserdampf jedoch besondere Umweltauswirkungen, die sich von den Effekten des bodennah emittierten H₂O deutlich unterscheiden. Die Temperatur erreicht in der Erdatmosphäre ein Minimum in der Tropopause. Der Mittel- und Langstreckenluftverkehr wird somit überwiegend in Luftschichten durchgeführt, deren Temperatur zwischen -40° und -60°C beträgt. Die sehr kalte Luft kann ab einer Höhe von etwa 8000 Metern nur noch wenig Wasserdampf aufnehmen. So bilden sich kleine Wassertröpfchen, die sofort zu Eiskristallen gefrieren und als Kondensstreifen sichtbar werden (siehe 2.3). Die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit durch den vom Flugverkehr freigesetzten Wasserdampf ist aus den genannten Gründen also von der Flughöhe und der jeweiligen Temperatur abhängig. **Bild 3.4** zeigt die Zusammenhänge zwischen der Flughöhe und der dabei verursachten Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit.

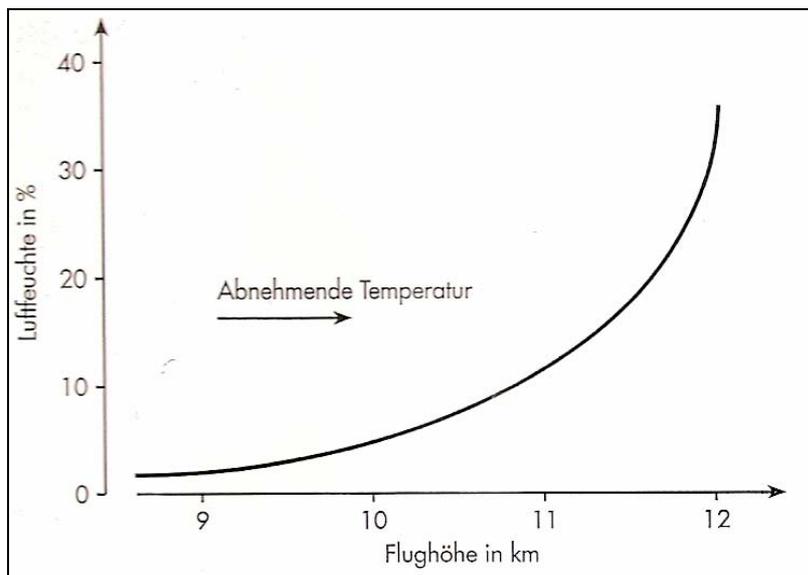


Bild 3.4 Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit durch die Wasserdampfemission von Flugzeugen in Abhängigkeit von der Flughöhe nach (Armbruster 1996)

Eine Luftfeuchtigkeit von 100% bedeutet eine absolute Sättigung der Luft mit Wasserdampf. Je niedriger ein Flugzeug fliegt, umso geringer wird der Einfluss auf eine Änderung der Luftfeuchtigkeit. Berücksichtigt man zusätzlich noch die natürlichen Temperaturschwankungen, so müsste man die Kurve entweder nach links oder nach rechts verschieben. Wie bereits angeführt, sind für das Entstehen von Kondensstreifen hauptsächlich die jeweiligen Umgebungsbedingungen maßgebend.

Unabhängig von der natürlichen Wasserdampfkonzentration können sich Kondensstreifen auch in völlig trockener Luft bilden, wenn die Temperatur weniger als -40°C beträgt. Sie zerfallen aber meist nach wenigen Sekunden wieder. Da in der Nähe der Tropopause und darüber die Temperatur praktisch immer geringer als -40°C ist, verursachen Flugzeuge in diesem Bereich ständig Kondensstreifen. Sie sind besonders langlebig im Bereich der Tropen sowie im Winter in der polnahen Stratosphäre, was auf die dort herrschenden extrem tiefen Temperaturen zurückzuführen ist.

Die Luftdurchmischung und die Anzahl der gebildeten Eiskristalle beeinflussen ebenfalls sehr stark deren Lebensdauer. Je nach Flugzeugtyp und Triebwerkskonfiguration entsteht hinter dem Flugzeug eine andersartige Verwirbelung, wodurch die Eiskristalle mehr oder weniger schnell auseinander driften.

Generell lässt sich sagen, dass mit zunehmender Flughöhe die potentielle Gefahr des emittierten Wasserdampfes sehr stark zunimmt. Schätzungen zufolge sollen die Wasserdampfmoleküle in der Stratosphäre in Bezug auf den Treibhauseffekt bis zu 200 mal wirksamer sein als Kohlendioxid (**Armbruster 1996**).

3.2.3 Stickoxide

Ähnlich wie Kondensstreifen weisen Stickoxide (NO und NO_2 , zusammengefasst als NO_x) eine sehr viel kürzere Verweilzeit in der Atmosphäre als Kohlendioxid auf und konzentrieren sich deshalb in der Nähe der Flugrouten. Es kann zu so genannten "Hot spots", lokale Belastungsspitzen, kommen, die insbesondere in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre auftreten, wo der Flugverkehr am intensivsten ist. Die Stickoxidkonzentration in der oberen Troposphäre ist ungefähr 1.000 mal geringer als in urbanen Regionen. Die Verweilzeit für Stickoxide an der Erdoberfläche ist ca. 10 mal geringer als in der Nähe der Tropopause. Aus diesen Gründen haben die relativ geringen NO_x Emissionen des Flugverkehrs beträchtlichen Einfluss auf die Stickoxidkonzentration in der Nähe der Tropopause (**Schumann 2000**). Bei den Bemühungen, die Emissionen des Luftverkehrs zu verringern, stehen die Stickoxide eindeutig im Vordergrund. Hauptsächlich auf vielbeflogenen Routen ist selbst noch in einer großen Höhe eine deutliche Konzentrationszunahme von Schadstoffen festzustellen.

Nach (**Armbruster 1996**) gelingt es trotz Entwicklung neuer und damit umweltfreundlicherer Triebwerke nur sehr langsam, den Stickoxidausstoß verringern. Faktoren wie geringerer Treibstoffverbrauch der Triebwerke und ein besserer Wirkungsgrad führen zwar generell auch zu einer Minderproduktion von Schadstoffen, für die Stickoxide trifft dies jedoch nicht zu.

Denn gerade moderne, leistungsstarke und verbrauchsgünstige Triebwerke mit höheren Drücken und Temperaturen arbeiten, wodurch die Bildung von NO_x angeregt wird.

Die Entwicklung kürzerer Brennkammern und damit geringere Verweilzeiten der Gase konnte den NO_x -Anstieg bisher nur teilweise auffangen. Neue Triebwerksentwicklungen sollen mittelfristig (bis zu 10 Jahren) zu einem Rückgang der NO_x -Produktion um bis zu 40% führen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass ältere Flugzeuge bei Verfügbarkeit der neuen Technik umgehend ersetzt werden, was aber wegen der zu erwartenden starken Zunahme des Passagieraufkommens und der mangelnden Liquidität vieler Fluggesellschaften nicht immer der Fall sein dürfte. Die damit verbundene zeitliche Verzögerung wird, legt man die durchschnittliche Lebensdauer von Flugzeugen zugrunde, bis zu 20 Jahren dauern. Erst nach dieser zeitlichen Verzögerung ist mit einer mengenmäßigen Reduzierung des NO_x -Ausstoßes zu rechnen. Obwohl die luftfahrtbedingte Emission von Stickoxiden derzeit noch zunimmt, ist bei einigen Fluggesellschaften bereits eine geringere Zunahme gegenüber den Vorjahren zu verzeichnen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass neben dem Luftverkehr nicht nur bodengebundene Stickoxidquellen, wie der Kraftfahrzeugverkehr oder die Energieerzeugung, zu einer Erhöhung der Konzentration in der Atmosphäre beitragen, sondern auch Blitzentladungen. Experten nehmen an, dass die durch Blitze entstandene (natürliche) Menge von Stickoxiden wesentlich größer ist als die von Flugzeugen freigesetzten NO_x -Emissionen. Die Swissair konnte bereits von 1989-1992 den relativen NO_x -Ausstoß ihrer Flugzeuge um 7% senken. Bezieht man die Produktionssteigerung (16%) in diesem Zeitraum mit ein, fielen absolut nur 2% mehr Stickoxide an. (**Armbruster 1996**). Die durchschnittlich anfallenden Emissionen von Stickoxiden pro 100 kg Treibstoff sind in **Tabelle 3.2** zusammengefasst.

Tabelle 3.2 NO_x -Entstehung pro 100 kg Treibstoff (**Armbruster 1996**)

Treibstoffverwendung	kg NO_x
Flugverkehr	ca. 2,0
Motorfahrzeugverkehr (total)	3,3
PKW ohne Katalysator	4,4
PKW mit Katalysator	0,4
Ölfeuerungen	0,1-0,3

Moderne Triebwerke, wie sie zum Beispiel beim Airbus A300-600 zum Einsatz kommen, weisen unter optimalen Reiseflugbedingungen lediglich einen Emissionswert von 1,2 kg NO_x /100 kg Treibstoff auf. Allerdings steigt dieser Wert unter Volllast (beim Start) auf ein Vielfaches an (**Bild 3.5**). Mehr Leistung bedeutet hier wegen der hohen Verbrennungstemperatur eine überproportionale Zunahme der Stickoxidemission (**Armbruster 1996**).

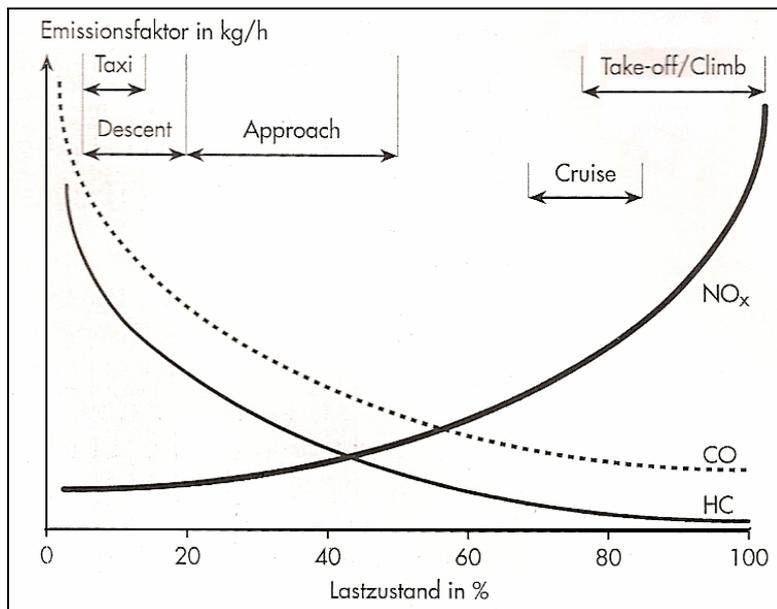


Bild 3.5 Zusammenhang zwischen dem Lastzustand der Triebwerke und dem Emissionsfaktor (Armbruster 1996).

Aufgrund von Untersuchungen hat die NASA festgestellt, dass nördlich einer Breite von 40 Grad (Linie Ankara-Madrid-Philadelphia) etwa 25% aller Stickoxide in einer Höhe zwischen 12.000 und 28.000 Metern vom Flugverkehr stammen. Im Höhenbereich von 10.000 bis 12.000 Meter, in dem sich fast der gesamte Langstreckenverkehr abspielt, beträgt der Anteil rund 60%. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch, dass die Verweildauer von Stickoxid in diesen Höhen etwa 100 mal länger ist als in Bodennähe (Armbruster 1996). Legt man das Flugphasenmodell zugrunde, kann man praktisch für jeden Flug die Verteilung der Schadstoffe in den einzelnen Flugphasen bestimmen (vgl. Bild 3.2). Für einen Flug von Frankfurt nach New York mit einer Boeing 747-400 wurde berechnet, dass rund 84% der emittierten Stickoxide im Reiseflug anfallen. Weitere 15% bilden sich während des Steigfluges, der Anteil beim Rollen und beim Landeanflug ist dagegen verschwindend gering.

Allerdings ist bei dieser Betrachtung zu bedenken, dass sich die Nebenbedingungen, wie z.B. Luftdruck und Temperatur, im Reiseflug verändern. Die Datengrundlagen aus dem quasi standardisierten LTO-Zyklus können daher nur bedingt auf die Situation im Reiseflug übertragen werden. Angesichts dieser Tatsachen stellt sich nun die Frage, wie sich die Stickoxidemission von Flugzeugen auf unsere Umwelt auswirkt. Einerseits tritt direkt eine Schädigung der Pflanzenwelt ein und andererseits entstehen indirekte Schädigungen, indem die NO_x-Teilchen Verbindungen mit anderen Stoffen eingehen.

Direkte Schädigung der Pflanzenwelt: Es wird davon ausgegangen, dass die Stickoxide alleine kaum eine schädigende Wirkung auf die Pflanzenwelt ausüben können, obwohl sie für den Menschen giftig sind. Vielmehr wirkt NO_x in zahlreichen Fällen synergetisch. Das bedeutet, dass schon geringste Mengen von Stickoxiden ausreichen, um die schädigende Wirkung anderer Luftschadstoffe zu verstärken. Versuche haben gezeigt, dass durch Stickoxide vorbelastete Pflanzen generell empfindlicher auf gleichzeitig oder später auftretende Belastungen durch andere Schadstoffe reagieren.

Indirekte Auswirkungen: Unter den indirekten Auswirkungen von Stickoxiden lassen sich alle Folgewirkungen aufführen, die dadurch entstehen, dass NO_x mit anderen Stoffen reagiert. Hierbei kann man wieder die direkten negativen Einflüsse auf den Menschen von der indirekten Schädigung über den Umweg der Pflanzenwelt unterscheiden. Zunächst können die Stickoxide als Ausgangssubstanz für photochemischen Smog in wesentlichem Umfang verantwortlich gemacht werden. Außerdem tragen NO_x -Moleküle zur Entstehung des sogenannten sauren Regens bei.

3.2.4 Übrige Schadstoffe

Der Ausstoß von Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid und unverbranntem Kohlenwasserstoff (HC) ist zwar, im Verhältnis zu den Unmengen an verbrauchtem Treibstoff, sehr gering, doch reichern sie die Atmosphäre zusätzlich mit Schadstoffen an. Kohlenmonoxid entsteht als Produkt bei unvollständiger Verbrennung und beeinflusst hauptsächlich die Atmung von Menschen und Tieren. Eine erhöhte Kohlenmonoxid-Konzentration in der Atemluft verringert bzw. blockiert die Sauerstofftransportkapazität des Blutes und kann so, insbesondere bei kranken und anfälligen Menschen, zu einer Unterversorgung empfindlicher Organe wie dem Herzen oder dem Gehirn führen. Höhere Dosen führen zu Kopfschmerzen sowie Bewusstlosigkeit bis hin zum Tod.

Die Kohlenwasserstoffe (HC) sind gefürchtet, da sie teilweise als krebserregend gelten. Sie sind das Resultat einer unvollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Kohle, Erdöl und Holz und einer Verdunstung von Kraftstoff.

Das Schwefeldioxid (SO_2) ist hauptverantwortlich für den sauren Regen, da es besonders in den unteren Luftschichten in Schwefel und schwefelhaltige Säure umgewandelt und ausgegnet wird. Das farblose, stechend riechende Gas entsteht bei der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger (es ist auch im Kerosin in sehr geringen Mengen enthalten) und kann die Atemwege des Menschen schädigen. Der luftfahrtbedingte Ausstoß an HC und SO_2 konnte mit der Einführung neuer Triebwerke drastisch verringert werden. So erzeugen die Triebwerke einer Boeing 747-400 heute etwa 85% weniger Kohlenwasserstoffe als beim älteren Mo-

dell Boeing 747-200 (**Armbruster 1996**). Absolut betrachtet konnte die Swissair im LTO-Bereich (Landing-Take-Off) der Flughäfen Zürich, Genf und Basel eine Verringerung der HC-Emission um 53% verzeichnen.

3.3 Auswirkungen der Schadstoffe auf die einzelnen Atmosphärenschichten

3.3.1 Auswirkungen auf die Troposphäre

In der unteren Atmosphärenschicht (Troposphäre) tragen Stickoxide ebenso wie Kohlenwasserstoffe unter Einfluss von Sonnenlicht zu einer vermehrten Ozonbildung bei. Ozon ist dabei ebenso giftig wie NO_x . Eine zu hohe Ozonkonzentration in der Luft macht sich zunächst durch Augenbrennen und Reizung der Schleimhäute bemerkbar. Darüber hinaus kann Ozon wegen seiner schlechten Wasserlöslichkeit tief in die Lunge eindringen, wobei die gesundheitsgefährdende Wirkung nicht allein von der Ozonkonzentration in der Luft abhängt, sondern von der eingeatmeten Dosis. Aus diesem Grund sollte man bei einer hohen Ozonkonzentration auf körperlich anstrengende Tätigkeiten verzichten.

Hinzu kommt noch, dass Ozon auch an Pflanzen Schäden hervorrufen kann. Neuerdings wird es für regionale Einbußen bei den Landwirtschaftserträgen und als eine der Hauptursachen für neue Waldschäden verantwortlich gemacht. Ozon ist aber nicht nur ein Reizgas, das Menschen und Pflanzen direkt beeinträchtigt, sondern auch ein hochwirksames Treibhausgas (in der Troposphäre), dessen Einfluss auf den Treibhauseffekt bis zu 2.000 mal intensiver sein kann als Kohlendioxid (**Armbruster 1996**). Die Swissair hat ermittelt, dass der im besonders kritischen LTO-Bereich verursachte NO_x -Ausstoß etwa 4% des gesamten Verkehrs- NO_x des Kantons Zürich beträgt. Durch Emissionen von Schadstoffen, insbesondere von Stickoxiden, wird der in der Troposphäre ablaufende Prozess der Ozonzerstörung nicht nur behindert oder angehalten, sondern ins Gegenteil umgekehrt. Daher wird Ozon in Atmosphärenbereichen gebildet, wo es nicht erwünscht ist. Besonders in Flughafennähe kommt es zu einer überdurchschnittlichen Belastung mit NO_x durch den, wie erläutert, hohen Lastzustand der Triebwerke.

3.3.2 Auswirkungen auf die Stratosphäre

Im Gegensatz zu den in Bodennähe emittierten Stickoxiden, die innerhalb weniger Tage ausgerechnet oder absorbiert werden, kann die schädigende Wirkung von NO_x , das in 10 km Höhe und höher freigesetzt wurde, bis zu einem Jahr andauern.

Die durch den Luftverkehr in diesen Höhen freigesetzten Stickoxide sind deshalb mitverantwortlich für den Abbau bzw. die Zerstörung der schützenden Ozonschicht. Obwohl die Flugzeuge regelmäßig nicht höher als 13.000 m fliegen, dringen die Stickoxide allmählich weiter in die Höhe vor. Erst ab einer Höhe von ca. 15 km entfalten sie aufgrund der zunehmenden Ozondichte ihre zerstörerische Wirkung. Durch eine vermehrte Belastung der oberen Atmosphärenschichten durch Stickoxidemissionen des Luftverkehrs wird das natürliche Gleichgewicht von Ozonbildung und Ozonzerstörung immer stärker verändert. Zumindest in der Stratosphäre ist der Anteil der Luftfahrt an der Ozonabnahme nach heutigem Wissensstand jedoch relativ gering. Durch den generellen Abbau der Ozonschicht, – Schätzungen gehen von jährlich 0,5 bis 0,8% aus (**Armbruster 1996**) –, und besonders durch über den Polen bereits entstandene Ozonlöcher, kann vermehrt kurzweilige UVB-Strahlung bis zur Erdoberfläche vordringen und dort schwere Schäden anrichten.

Bei Menschen ist daher mit einer dramatischen Steigerung der Hautkrebsrate zu rechnen, während bei Pflanzen eine vermehrte Mutationsbildung befürchtet wird. Im Gegensatz zur Ozonproblematik in der Troposphäre kann hier allerdings nicht nur von regionalen Folgen ausgegangen werden. Deutlich wird dies, wenn man bedenkt, dass der beobachtete Anstieg der Hautkrebsrate in Australien und Neuseeland (Ursache: vermehrte UV-Einstrahlung durch Ozonabbau) nicht allein von der dortigen, relativ geringen Stickoxidemission herrühren kann. Sobald das sensible, natürliche Gleichgewicht von Ozonbildung und dessen Zerstörung, sei es in der Troposphäre oder in der Stratosphäre, gestört wird, kann dies schwerwiegende Folgen für alles Leben auf der Erde haben.

4 Optionen zur Minderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs

Zur Minderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs gibt es nach (Cames 2004) zwei verschiedene Optionen: Vermeidungsoptionen beim Betrieb und Optionen technischer Art. Optionen technischer Art sind beispielsweise die Klimaoptimierung von Triebwerken sowie die Verbesserung der aerodynamischen Effizienz von Flugzeugen. Zu den Vermeidungsoptionen beim Betrieb zählen die verbesserte Instandhaltung und die Optimierung der Flugrouten unter Klimagesichtspunkten.

4.1 Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten

Die Entstehung von Kondensstreifen und Zirruswolken kann in der Regel dadurch vermieden werden, dass Schichten mit entsprechend eisgesättigten und feuchten Luftmassen nicht durchflogen werden. Bei der Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten geht es deshalb darum, solche Schichten zu umgehen, indem die Flughöhe oder die Flugroute verändert oder die Periode des Flugbetriebes an die klimatischen Gegebenheiten angepasst wird. Bisher werden die Flugrouten nach Berücksichtigung von Wetterverhältnissen und Sicherheitsaspekten jedoch in erster Linie unter ökonomischen Gesichtspunkten nach Flugzeit und Treibstoffverbrauch optimiert. Bei geringerer Flughöhe verschlechtert sich aufgrund dichter Luftmassen die Aerodynamik der Flugzeuge, was u.a. zu erhöhtem Treibstoffverbrauch und längeren Flugzeiten führen kann. Denn mit einer geringeren Flughöhe verkürzt sich einerseits die Zeit und damit der Treibstoffverbrauch während des Steig- und Sinkfluges. Andererseits steigt jedoch der Treibstoffverbrauch während des Reiseflugs an, was sowohl durch eine verlängerte Reiseflugphase als auch durch Einbußen der aerodynamischen Effizienz des Flugzeugs geschieht.

Bedingt durch die Verschlechterung der aerodynamischen Effizienz steigen bei einer Reduzierung der Flughöhe die CO₂-, H₂O- und NO_x-Emissionen zunächst an. Während die Klimawirksamkeit durch den erhöhten CO₂- und H₂O-Ausstoß ansteigt, führen die NO_x-Emissionen trotz der erhöhten Emissionsmengen zu einer geringeren Bildung von Ozon, da sie bei geringerer Flughöhe emittiert werden. Folglich weisen sie auch eine geringere Klimawirksamkeit auf. Darüber hinaus kann durch die Verringerung der Flughöhe die Entstehung von Kondensstreifen und unter Umständen auch die Entstehung von Zirruswolken vermieden werden, so dass der Nettoeffekt im Hinblick auf die Klimawirksamkeit deutlich positiv ist.

4.2 Bessere Auslastung

Grundsätzlich gilt, dass die Emission pro Personenkilometer umso geringer ist, je höher die Flugzeuge ausgelastet sind. Insofern könnten die Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs durch eine Erhöhung der Auslastung ebenfalls reduziert werden. Denkbar wäre etwa, dass durch eine Ausgestaltung des Tarifsystems die Nachfrage von gering ausgelasteten Flügen auf solche Flüge gelenkt wird, die zwar bereits gut ausgelastet sind, aber dennoch über hinreichend freie Sitzplatzkapazitäten verfügen. Substanzielle Emissionsminderungen könnten aber erst dann erzielt werden, wenn es dadurch gelänge, gering ausgelastete Flüge vollständig zu streichen. Eine solche Strategie der Luftfahrtgesellschaften wäre allerdings mit Komforteinschränkungen für die Fluggäste verbunden, da diese aufgrund des ausgedünnten Flugplans weniger Flexibilität in der Reisegestaltung hätten und da ein stark ausgelasteter Flug tendenziell weniger komfortabel ist als ein normal ausgelasteter Flug.

4.3 Optimierung des Triebwerkes unter Klimagesichtspunkten

Die Klimaoptimierung von Triebwerken zielt sowohl auf die Minimierung des Treibstoffverbrauchs und damit von CO₂-Emissionen, als auch die Verringerung der Stickoxidemissionen ab. Die Verbesserung der Treibstoffeffizienz wurde in der Vergangenheit durch die Entwicklung und den Einsatz moderner Triebwerke erreicht, die mit höheren Temperaturen und höherem Druck arbeiten. Unter diesen Bedingungen wird jedoch die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Eine Stabilisierung oder Minderung des Stickoxidausstoßes ist daher nur durch alternative, NO_x-senkende Brennkammerkonzepte zu erreichen. Aufgrund der dominierenden Bedeutung des Kraftstoffverbrauchs für die Wirtschaftlichkeit der Triebwerke bestehen bei der derzeitigen Betriebskostenstruktur von Flugzeugen allerdings nur geringe Anreize zur Förderung NO_x-mindernder Technologien.

4.4 Verbesserung der Aerodynamik

Durch eine verbesserte Aerodynamik des Flugzeugs können Treibstoffverbrauch und somit auch CO₂- und NO_x-Emissionen reduziert werden. Derzeit kann die Aerodynamik von Flugzeugen beispielsweise durch den Einsatz so genannter Winglets und/oder Riblets optimiert werden.

4.4.1 Winglets

Das optimale Flügeldesign ist eine der schwierigsten Herausforderungen bei der Entwicklung neuer Flugzeuge. Die aerodynamischen Eigenschaften von Flügeln können einerseits dadurch verbessert werden, dass Flügel mit einer größeren Spannweite eingesetzt werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, so genannte Winglets (**Bild 4.1**) einzusetzen, verlängernde Anbauten an die Flügelenden. Winglets können allerdings in der Regel nur bei älteren Flugzeugen nachgerüstet werden, da bei neueren Flugzeugtypen das Flügeldesign bereits entsprechend optimiert ist.



Bild 4.1 Winglets (Aerospace 2007)

4.4.2 Riblets

Auch durch das Auftragen von so genannten Riblets kann die Aerodynamik von Flugzeugen verbessert werden. Riblets sind Furchen in Strömungsrichtung, die als Film mit einer Dicke von weniger als 1 mm anstelle von Farbe an der Außenwand von Flugzeugen aufgetragen werden. Der verringerte Widerstandsbeiwert des Flugzeugs führt dazu, dass trotz des höheren Gewichts durch das aufgetragene Material deutliche Emissionsreduktionen realisiert werden können. Nachteilig ist jedoch die Gefahr der Verschmutzung von Riblets durch Russ und Staubpartikel. Dies kann zu einer verringerten Wirksamkeit dieser Vermeidungsoption führen.

4.5 Frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen

Neue Flugzeuge sind effizienter als alte Flugzeuge. Sie verbrauchen weniger Treibstoff und emittieren weniger Treibhausgase. Durch den Austausch alter Flugzeuge durch neue, effizientere Modelle könnten der Treibstoffverbrauch und damit auch die Treibhausgasemissionen reduziert werden. Bei der hochkomplexen Entscheidung über die vorgezogene Stilllegung von Flugzeugen fließen eine Vielzahl von Faktoren ein, wie z.B. die erwarteten Treibstoffpreise, die Marktperspektive, die Liquidität der Fluggesellschaft, die erwartete Kapitalverzinsung. Ökologische Kriterien werden dabei aber bisher nicht berücksichtigt.

5 Luftverkehr und Lärmbelastung

5.1 Allgemein

Wie jedes motorisierte Verkehrsmittel erzeugt ein Flugzeug während des Flugbetriebs Lärm. Die Eigenschaften dieses Lärms unterscheiden sich jedoch deutlich von denen des Straßenverkehrslärms. Im Unterschied zu Straßenlärm tritt Fluglärm nicht konstant auf. Die Belastung erfolgt in relativ lauten Spitzen; nach den Überflügen kehrt wieder Ruhe ein. Es sind hingegen größere Gebiete betroffen als beim Straßenlärm, der sich auf Gebäuden entlang der Hauptverkehrsachsen konzentriert. Dagegen können auch ruhige Einfamilienhausquartiere vom Fluglärm belastet werden. Fluglärm ist nicht, wie dies beim Straßenlärm durch Lärmschutzwände möglich ist auf dem Ausbreitungsweg zu bekämpfen.

Viele Flughäfen wurden sehr nah an dichte Siedlungsgebiete gebaut. Dies hat zwei Gründe: erstens, weil ein Standort nah am Stadtzentrum gewählt wurde um ihn attraktiver zu machen und zweitens weil der Flughafen nach der Inbetriebnahme als Anziehungspunkt für Wohn- und Gewerbebauten wirkte.

5.2 Lärmquellen

Fluglärm entsteht, wenn der heiße Abgasstrahl aus den Triebwerken mit hoher Geschwindigkeit auf die das Flugzeug umgebende kalte Luft trifft. Lärm wird außerdem bei der Verbrennung von Treibstoff im Inneren des Triebwerkes sowie durch die rotierenden Luftschaufeln erzeugt. Daher ist der Triebwerkslärm besonders beim Start bemerkbar, da die Triebwerke dann mit voller Leistung arbeiten. Lärm tritt ebenfalls ein, wenn nach der Landung der Gegen Schub einsetzt (**Bräunling 2007**). Dieser ist notwendig um das Flugzeug sicher abbremsen zu können (**Bild 5.1**).

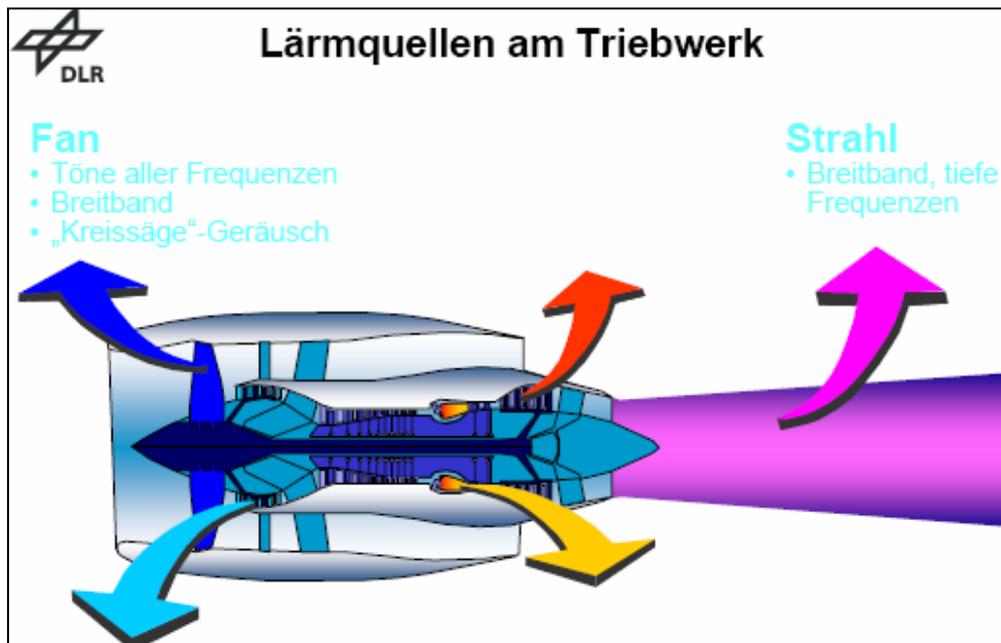


Bild 5.1 Lärmquellen am Triebwerk (Weyer 2002)

Eine weitere Komponente des Fluglärms stellt die aerodynamische Lärmentwicklung dar. Dieses Geräusch entsteht, wenn die Luft über den Flugzeugkörper streicht und an der Reibungsfläche verwirbelt. Die aerodynamische Lärmkomponente ist somit vom Maß der Luftverdrängung (Größe des Flugzeuges) und der Art der Druckverteilung an den Flügeln abhängig (**Bild 5.2**).

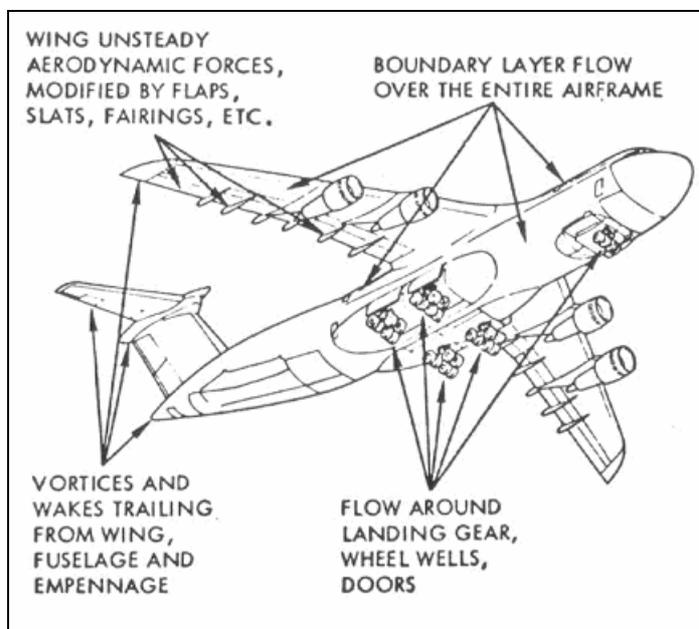


Bild 5.2 Lärmstehung durch den Luftwiderstand (Kroo 2006)

Bei modernen Flugzeugen tragen Winglets an den Flügelenden zu einer Reduzierung des induzierten Luftwiderstandes und aus diesen Grund auch zu einer Verringerung des dadurch bedingten Lärms bei. Generell wirkt sich jegliches Abweichen vom aerodynamischen Optimum nachteilig auf den Lärmwert aus. Während des Landeanflugs verstärkt sich deshalb der aerodynamische Lärm infolge der ausgefahrenen Landeklappen und des Fahrwerks.

5.3 Maßnahmen

5.3.1 Flugbeschränkungen

5.3.1.1 Begrenzung der Bewegungszahl

Eine Beschränkung der Anzahl von Flugbewegungen ist wohl die drastischste Maßnahme gegen Fluglärm. Solche Vorschriften werden sicher auf großen Widerstand seitens der Flughafenbetreiber und der Wirtschaft stoßen. Höchstmengen können auch nur für gewisse Zeitspannen vorgeschrieben werden, z.B. nachts. So gibt es bereits für sehr viele Flughäfen (Brüssel, alle drei Flughäfen in London usw.) Nachtflugbeschränkungen. Diese Beschränkungen beinhalten dann zum Beispiel, dass zwischen 23.00 Uhr abends und 7.00 Uhr morgens nur eine beschränkte Anzahl Flugbewegungen erlaubt sind. Bestimmungen werden zusätzlich durch ein Quotensystem verschärft, das die Flugzeuge nach Lärmklasse gewichtet.

5.3.1.2 Lärmkontingente

Als Alternative bietet sich eine Festsetzung der Höchstmenge an Lärm an, die ein Flughafen verursachen darf. Dies würde der effektiven Lärmbelastung eher gerecht werden als eine Begrenzung der Bewegungszahl.

5.3.1.3 Nachtflugbeschränkungen

Da nächtlicher Lärm als besonders störend empfunden wird, existieren auf zahlreichen Flughäfen Nachtflugbeschränkungen oder -verbote. Besonders auf großen, internationalen Airports ist es jedoch kaum möglich, den Flugbetrieb während der Nachtstunden ganz einzustellen. Internationale Abhängigkeiten und Zeitverschiebungen machen eine gewisse Anzahl von Nachtflügen unumgänglich. Als Beispiel kann man den Flughafen in Düsseldorf nehmen.

Hier dürfen in der Zeit von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr keine Starts und von 23.00 Uhr bis 6.00 Uhr keine Landungen erfolgen. Hiermit stellt der Flughafen im europäischen Vergleich aber eher eine Ausnahme dar. Für verspätete Landungen sowie nächtliche Post- und Ambulanzflüge werden jedoch Ausnahmegenehmigungen erteilt. Auch der Flughafen in München kennt ein Nachtflugverbot, allerdings ist dieses auf die Zeit von 24.00 Uhr bis 5.00 Uhr beschränkt.

5.3.2 An- und Abflugkonzepte

Durch eine geschickte Wahl von An- und Abflugsrouten können die Lärmimmissionen zumindest optimiert werden. In einem ersten Schritt geht es darum, die Startwege um dicht besiedelte Gebiete herumzuleiten. Diese Maßnahme ist kaum mit Kosten verbunden, und die Flughäfen setzen sie in der Regel auch um. Bei den Landewegen ist das Umfliegen von Siedlungen nicht möglich, da anfliegende Flugzeuge auf den letzten Kilometern vor der Piste aus Sicherheitsgründen keine Kurven mehr fliegen dürfen.

5.3.2.1 Konzentration / Streuung

Bei Flughäfen mit mehreren Pisten stellt sich zudem die Frage, ob die gesamte Belastung größer ist, wenn die Flugbewegungen auf dieselbe Route konzentriert oder auf die verschiedenen Pisten "gerecht" verteilt werden. Dabei stoßen die Interessen der Anwohner gegenseitig aufeinander, und ist es politisch nahezu unmöglich, eine für alle Seiten befriedigende Lösung zu finden. Aus der Sicht eines gesamtheitlichen Lärmschutzes scheint es langfristig sinnvoller, die Flugbewegungen über wenig dicht besiedelte Gebiete zu konzentrieren. Die Störung durch zusätzliche Überflüge ist auf einer stark frequentierten Route nämlich kleiner als auf einer selten benutzten Route.

5.3.2.2 Rotation

Statt die Bewegungen während der ganzen Betriebszeit auf die verschiedenen Pisten zu verteilen, kann auch eine Rotation der Flugverfahren angewendet werden. So können die betroffenen Gebiete um den Flughafen periodisch entlastet werden - im Idealfall auf null Bewegungen.

Dieses Rotationssystem wurde zum Beispiel in London Heathrow für nächtliche Anflüge eingeführt. Dabei erfolgen die gesamten Landungen während einer Woche jeweils auf nur eine der vier Pisten, falls die Windverhältnisse dies zulassen.

5.4 Lärmabhängige Gebühren

Die meisten Flughäfen haben ihre Landegebühren von den Lärmemissionen der Flugzeuge abhängig gemacht. Auf diese Weise kann auf die Fluggesellschaften finanzieller Druck ausgeübt werden, leise Flugzeugtypen zu verwenden. Die heute üblichen Typen unterscheiden sich – auch bei gleicher Passagierzahl – stark in der Lärmemission. Im Allgemeinen sind neuere Flugzeuge leiser. Die International Civil Aviation Organisation ICAO klassifiziert alle Flugzeugtypen in Lärmklassen. Lärmabhängige Gebühren sind heute üblich. Allerdings sind die heute am meisten verbreiteten Typen in "lärmarme" Klassen eingeteilt. Es bleibt fraglich, ob die Zertifizierung nicht verschärft werden müsste, damit die Entwicklung zu leiseren Flugzeugen wirklich gefördert werden würde.

5.5 Bauliche Maßnahmen an Gebäuden

In den am meisten lärmgeplagten Gebieten bleibt aber in der Realität oft nur noch die Gebäudesanierung, also die Verbesserung der Schalldämmung. Diese kurzfristig realisierbaren Maßnahmen sind relativ unumstritten. Zwar kann so die Lärmbelastung in Gebäuden – jedenfalls bei geschlossenen Fenstern – drastisch reduziert werden, doch müssen bauliche Eingriffe an Gebäuden als Ersatzmaßnahmen betrachtet werden.

Die Nachteile bestehen in den hohen Kosten und in der Tatsache, dass eine Verbesserung der Lärmsituation nur innerhalb der Gebäude erreicht wird. Freiräume wie Balkone oder Sitzplätze sind dem Fluglärm trotz baulicher Maßnahmen ausgesetzt.

Fluglärm gelangt über verschiedene Wege in Wohn- und Betriebsräume, primär natürlich über die Fenster. Doch auch das Dach und die Fassaden sind keineswegs schalldicht, und schalltechnische Schwachstellen wie Fensterrahmen, Dichtungen, Rollladenkästen, Dampfzüge oder Cheminées werden oft vergessen.

5.6 Folgen von Fluglärm

Lärm gehört zu den größten Umweltbelastungen, denen die Menschen ausgesetzt sind. Durch den zunehmenden Flugverkehr sind immer größere Teile der Bevölkerung von Fluglärm belastet mit der Folge dass die Klagen der Flughafenanwohner sich häufen. Die Auswirkungen reichen von momentanen Störungen von Gesprächen bis zu langfristigen gesundheitlichen Risiken. In diesem Kapitel werden die individuellen Folgen behandelt. Klein nennt als Folgen des Lärms Gesundheitsbeeinträchtigungen wie mechanische Gehörschäden, psychosoziale Ef-

fekte, Schlafstörungen und Arbeitsunfähigkeit. Menschen reagieren auf ein gleiches physikalisches Schallereignis unterschiedlich. Und ein und dieselbe Person reagiert nicht immer auf die gleiche Art und Weise. Für die Forschung bedeutet dies, dass mit sehr großen Stichproben gearbeitet werden muss. Nur so kann die Lärmwirkung trotz stark variierender Reaktionen erfasst werden. Mit dem Hinzuziehen sozialwissenschaftlicher Faktoren müssen außerdem persönliche Einflüsse (z.B. die soziale Stellung, das momentane Befinden etc.) von der eigentlichen Wirkung des Lärms getrennt werden.

Ein weiteres Problem der Lärmwirkungsforschung ist der Ausschluss von Faktoren, welche die gleiche Wirkung wie Lärm ausüben. Zahlreiche Kontrollvariablen müssen in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

5.6.1 Störungen

Der unmittelbare Effekt eines tieffliegenden Flugzeuges besteht darin dass er die Betroffenen in ihrer Tätigkeit stört, die sie gerade ausüben. Die Lärmstudie 90 zeigte daher erwartungsgemäß dass sich Fluglärm am häufigsten auf die mündliche Kommunikation, und Tätigkeiten wie Fernsehen und Radio hören als störend auswirkt. Von den Befragten wurde auch die Wahrnehmung von Vibrationen als lästig bezeichnet. Nicht alle Personen fühlen sich von einer bestimmten Lärmquelle im selben Maße gestört. Doch durch verschiedene Studien konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Personen, die sich in ihrem Wohnumfeld stark gestört fühlen, mit dem vorhandenen Schallpegel ansteigt. Auffallend ist, dass der Anteil der Personen, die angeben, sie seien stark gestört, ab einer Lärmbelastung von ca. 65 dB stark ansteigt (**Bild 5.3**). Diesen Pegel kann man folglich als Schwellenwert bezeichnen.

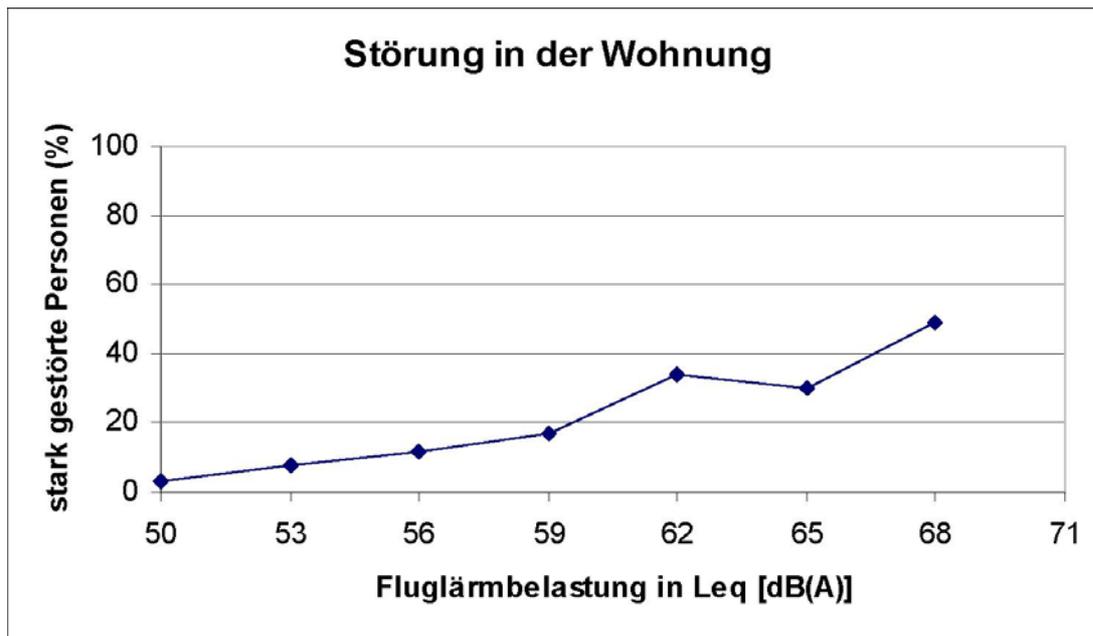


Bild 5.3 Störung in der Wohnung durch Flugverkehr in Abhängigkeit von der betreffenden Lärmbelastung (Stähli 2001)

5.6.2 Schlaf

Fluglärm tritt heute an internationalen Flughäfen auch vermehrt nachts auf und beeinträchtigt die Flughafenanwohner in ihrem Schlaf, besonders in den Randstunden der Nacht. Es steht heute wissenschaftlich außer Zweifel, dass Nachtfluglärm die Qualität und so den Erholungswert des Schlafes verringert. Folgen des Lärms betreffen nicht nur das Unvermögen einzuschlafen oder Aufwachereignisse. Für die Qualität des Schlafes ist es ebenso wichtig, wie viel Zeit eine Person in den einzelnen Schlafstadien verbringt. Um solche Informationen zu gewinnen, überwacht die Schlafforschung die Hirntätigkeit von Versuchspersonen und stellt die Resultate in Schlafprofilen dar. Maschke beschallte Versuchspersonen in einem Schlaflabor mit aufgezeichnetem Fluglärm. Verschiedene Flughäufigkeiten und Abfolgen der Flüge wurden simuliert die Versuche dauerten jeweils acht Stunden. Ziel war es zu klären, in welchem Maß der Schlaf der Flughafenanwohner durch nächtlichen Fluglärm gestört wird. Die Studie konnte aufzeigen, dass sich die Dauer der Schlafstadien der beschallten Versuchspersonen stark von der Dauer der Kontrollgruppe unterschied. Die tiefen Stadien und die REM-Phase (rolling eye movement) waren mit Fluglärm wesentlich kürzer, die Einschlafphase hingegen länger. Bei 64 Überflügen waren die tiefen Stadien z.B. um ca. 35% verkürzt. Eine Trendanalyse bestätigte auch, dass die Schlafqualität von der Anzahl und der Abfolge der Flüge abhängig ist. Besonders ungünstig ist es offenbar, wenn sowohl abends als auch morgens (in der ersten und letzten Phase der Versuche) Überflüge stattfinden. Die Resultate dieser Laborstudie konnten im Wesentlichen von einer nachfolgenden Felduntersuchung bestätigt werden. Dabei wurden in den eigenen Schlafzimmern der Testpersonen Lautsprecher aufgestellt, um ein sicheres Versuchsergebnis zu gewährleisten. Denn Laborsituationen haben

den Nachteil, dass sie für die Untersuchungsteilnehmer ungewohnt sind und so die Resultate verfälschen können.

5.6.3 Stress und Herz-Kreislaufkrankheiten

Lärm wurde schon lange als Stressfaktor erkannt, und er hat somit eine Auswirkung auf die Sekretion von Stresshormonen, die wohl die komplexeste Folge von Lärm darstellt. Stress hat längerfristig Auswirkungen auf Risikofaktoren, die ihrerseits zu Herz-Kreislaufkrankheiten führen können. Es bestehen demnach drei Wirkungsebenen (**Bild 5.4**).

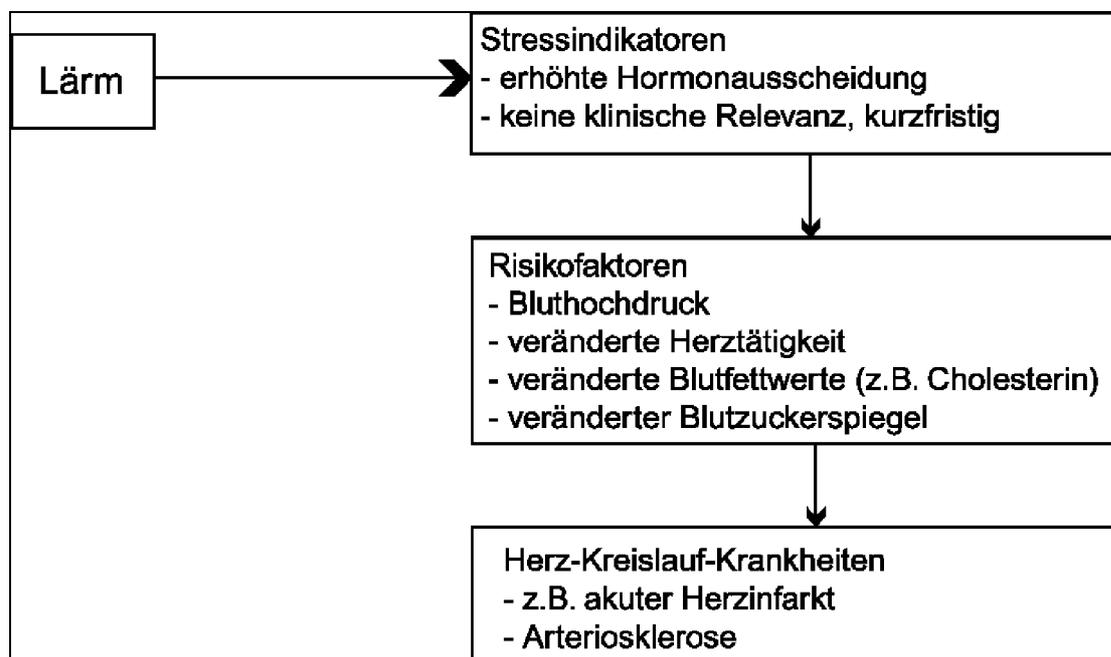


Bild 5.4 Wirkungsebenen von Lärm auf die Herz-Kreislaufaktivität (Stähli 2001)

5.6.3.1 Erhöhte Ausscheidung von Stresshormonen

Stressreaktionen treten schon bei relativ tiefen Schallpegeln auf, wenn Aktivitäten wie Schlaf, Entspannung und Konzentration beeinträchtigt sind. Die Produktion von Stresshormonen (Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol) ist relativ einfach messbar und kann deutlich mit Fluglärm in Zusammenhang gebracht werden. Bereits eine äußerst geringe künstliche nächtliche Beschallung (16 Überflüge mit Maximalpegeln von 55 dB) führte in einer Felduntersuchung am Berliner Flughafen Tegel zu einer signifikant erhöhten Cortisolausschüttung. Bei Versuchspersonen, die in einer ruhigen Umgebung wohnten, waren in den ersten Nächten des Experiments außerdem auch die Adrenalinwerte höher als zuvor.

5.6.3.2 Krankheit

Forscher versuchten ebenfalls, statistische Beziehungen zwischen der Lärmbelastung und der Häufigkeit von Herz-Kreislaufkrankheiten herzuleiten, wie zum Beispiel in einer Studie am Flughafen Los Angeles. Dort konnte anhand solcher Krankheiten bei über 75-Jährigen eine durch Fluglärm erhöhte Sterberate festgestellt werden. Bei Jüngeren zeigte sich dieselbe Tendenz, die aber nicht signifikant war.

Die Resultate der bereits erwähnten Studien waren meistens nicht oder nur bedingt signifikant. Zahlreiche nachfolgende Arbeiten deuten allerdings ebenfalls darauf hin, dass eine langdauernde Lärmbelastung das Risiko für Herz-Kreislaufkrankheiten tatsächlich erhöht. Die Berliner Experten meinen zu dem gesundheitlichen Risiko Folgendes: "Bei vorsichtiger und kritischer Wertung der Befunde wurden die Ergebnisse so interpretiert, dass das relative Risiko für Personen in lauten Wohngebieten mit Mittelungspegeln von tagsüber mehr als 65 dB(A) geringfügig erhöht sein könnte, und zwar in einer Größenordnung zwischen 10 und 30 Prozent."

5.6.4 Gedächtnis

Die Lärmwirkungsforschung konnte zeigen, dass Lärmbelastung auch das menschliche Gedächtnis beeinträchtigt. Die 'Münchener Fluglärmstudie' verglich die Gedächtnisleistung von zehnjährigen Kindern, die im Einflussbereich der Münchener Flughäfen wohnten, mit der von nicht betroffenen Kindern. Der Fluglärm hatte eindeutig einen negativen Einfluss auf die Fähigkeit, Fragen zu komplizierten Texten zu beantworten. Hingegen konnten die lärmbelasteten Kinder einfache Buchstabenreihen ebenso gut memorieren wie ihre Altersgenossen aus ruhigen Wohnlagen. Diese Erkenntnisse decken sich mit früheren Hinweisen, die besagen, dass die 'Akquisitionsstärke' höher und die gesamte Speicherkapazität allerdings dann geringer sei, wenn Versuchspersonen während der Aufnahmephase akutem Lärm ausgesetzt sind. Das heißt, dass lärmbelastete Menschen zwar aufmerksamer sind, aber weniger Information aufnehmen können.

6 Zusammenfassung

Durch eine wachsende Weltwirtschaft, zunehmende globale Mobilität und der Globalisierung im Allgemeinen hat der Luftverkehr während der letzten Jahre stetig zugenommen. Hierdurch hat sich das Flugzeug mittlerweile zu einem sehr wichtigen, wenn nicht sogar zum wichtigsten Verkehrsmittel überhaupt entwickelt. Im Rahmen der aktuellen Klimaschutzdiskussionen gewinnt ein umweltfreundlicher Flugbetrieb zunehmend an Bedeutung. Dieses Projekt ist ein Teil des Forschungsprojektes "Grüner Frachter" und beschreibt hauptsächlich die Entstehungsorte und Auswirkungen der Emissionen, die während des Reiseflugs generiert werden. Im ersten Abschnitt dieser Arbeit wurden die Grundlagen unseres Klimasystems dargestellt. Dabei ist der Aufbau unserer Atmosphäre von zentraler Bedeutung; sie besteht u.a. aus folgenden Schichten: die Troposphäre, die Stratosphäre und die Ozonschicht. Im zweiten Abschnitt wurden die verschiedenen Emissionen aufgeführt, die während eines Fluges entstehen. Die wichtigsten sind hierbei Kohlendioxid, Wasserdampf und Stickoxide. Diese Emissionen, auch Treibhausgase genannt, sorgen für eine Verstärkung des Treibhauseffektes und demnach auch für die Erwärmung der Erdoberfläche. Dies tun sie, indem sie die Wärmestrahlung der Erde, die ansonsten einfach ins Weltall entweichen würde, absorbieren und anschließend wieder in alle Richtungen zurückstrahlen. Stickoxide tragen in der Troposphäre unter Einfluss von Sonnenlicht zu einer vermehrten Ozonbildung bei. Eine zu hohe Ozonbildung in der Troposphäre hat für den Menschen eine gesundheitsgefährdende Wirkung und kann auch bei Pflanzen Schäden verursachen. Außerdem ist Ozon ein hochwirksames Treibgas. Stickoxide, die in Höhen von 10 km oder mehr freigesetzt werden, beeinflussen die Stratosphäre und sind für den Abbau der schützenden Ozonschicht mitverantwortlich. Mensch und Natur sind dadurch weniger vor der direkten Sonneneinstrahlung geschützt. Die UVB-Strahlung kann einfacher bis zur Erdoberfläche vordringen und dort Schäden anrichten. Um die schädlichen Emissionen zu reduzieren, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. So kann man vom logistischen Standpunkt her versuchen, die Flugrouten zu optimieren und die Auslastung der Flugzeuge zu erhöhen. Auf technischem Gebiet kann man beispielsweise die Effizienz der Triebwerke optimieren. Außerdem kann man durch aerodynamische Verbesserungen, wie zum Beispiel Winglets, den Luftwiderstand und somit auch den Treibstoffverbrauch und die daraus resultierenden Emissionen reduzieren. Die frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen ist eine weitere Option, da neuere Flugzeuge generell umweltfreundlicher konzipiert sind.

Flugverkehr verursacht neben den bereits genannten Emissionen zusätzlich eine Lärmbelastung. Als Folgen von Lärm werden für Menschen u.a. Schlafstörungen, Stress und Herz-Kreislaufkrankheiten gehandelt. Lärmgegenmaßnahmen sind Flugbeschränkungen (zum Beispiel Nachtflugverbote), durchdachte An- und Abflugkonzepte, das Einführen von lärmabhängigen Gebühren und bauliche Maßnahmen an Gebäuden.

Literaturverzeichnis

- Armbruster 1996** ARMBRUSTER, Jürgen: *Flugverkehr und Umwelt: wieviel Mobilität tut uns gut?*. Berlin : Springer, 1996
- Aerospace 2007** URL: <http://www.aerospace-technology.com/projects/bbj1/images/boeing-business-jet3.jpg> (2007-06-18)
- Bauer 2007** BAUER, Diego: *Natur- und Umweltschutz*, 2007. – URL: <http://www.kuckuck.ch/Ozon/Bilder/atmosphaere.jpg> (2007-05-18)
- Berthoud 2005** BERTHOUD, Florian: Ozon und Flugverkehr - Sensitivitätsanalyse von Stickstoffoxiden auf die Ozonproduktion in der Tropopausenregion mittels eines Boxmodells. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Umweltnaturwissenschaften, Diplomarbeit, 2005
- Beyer 2007** BEYER, Björn: *Wetter und Klima im Überblick*, 2007. – URL: <http://www.wolkenfotos.de/galerie/gal13/gross/gross18.jpg> (2007-05-18)
- Bräunling 1997** BRÄUNLING, Willy: *Skript zur Vorlesung Flugzeugtriebwerke*. Hamburg, Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Fahrzeugtechnik, Vorlesungsskript, 1997
- Cames 2004** CAMES, Martin; DEUBER, Odette; RATH, Ulrike: *Emissionshandel im internationalen zivilen Luftverkehr*. Berlin : Öko-Institut, 2004
- Hannover 2007** URL: <http://www.hannover-airport.de/1103.html> (2007-05-07)
- Hüttig 2000** HÜTTIG, G.: *Quantifizierung der Reduktionspotentiale von Luftschadstoffen an und im Bereich von Flugplätzen*. Berlin : Avioplan, 2000. Forschungsprojekt in Auftrag von EPA (Environmental Protection Agency)
- Kroo 2006** KROO, Ilja: *Aircraft Design: Synthesis and Analysis*, 2006. – URL: <http://adg.stanford.edu/aa241/noise/airframesources.gif> (2007-05-29)
- Makishi 2007** URL: http://www.ikpgabi.uni-stuttgart.de/deutsch/loesungen_greenhausgas_d.html (2007-04-16)
- UFNCA 2007** URL: <http://ufnca.com/LTO-cycle.gif> (2007-04-15)

- Rahmstorf 2006** RAHMSTORF, Stefan; SCHELLNHUBER, Hans J.: *Der Klimawandel*. München : C.H. Beck oHG, 2006
- Schumann 2000** SCHUMANN, Ulrich: Effects of Aircraft Emissions on Ozone, Cirrus Clouds and Global Climate. In: *Air & Space Europe*, S. 29-33
- Stähli 2001** STÄHLI, Markus: *Fluglärmbekämpfung*, 2001. – URL: <http://www.laerm.zh.ch/fals/3-wissen/publikationen/pdf/fluglaermbekaempfung.pdf> (2007-05-26)
- Weyer 2002** WEYER, Heinrich: *Potenziale der Lärminderung im Flugverkehr*, 2002. – URL: <http://www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl2/akl/downloads/kolloquien/%5Bakl10%5D%20-%20weyer.pdf> (2007-05-12)