



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Projekt 2

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nahbereich von Flughäfen

Verfasser: Oliver Wischhusen

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME
Tutor: Dipl.-Ing. Kolja Seeckt

Abgabedatum: 25.12.2007

Kurzreferat

Diese Projektarbeit gibt dem Leser einen Überblick über die Umweltaspekte des Luftverkehrs im Nahbereich von Flughäfen. Verschiedene Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit z. B. anhand von Lärm- und Emissionsdaten werden dabei erläutert. Die Luftverkehrsbranche wächst seit Jahren kontinuierlich, so dass die Anforderungen in Bezug auf die Umweltfreundlichkeit immer strenger werden, bzw. werden müssen, um den Beitrag des Luftverkehrs zum Klimawandel und zu den viel diskutierten Lärmbelastungen zu reduzieren, bzw. nicht weiter anwachsen zu lassen. Neben der Entwicklung der Branche wird kurz der Umwelteinfluss des Luftverkehrs im Fernbereich, Reiseflug, erläutert. Des Weiteren werden die Umwelteinflüsse des Luftverkehrs auf den Nahbereich detailliert aufgelistet und beschrieben. Gesetzliche Regularien spielen hierbei eine große Rolle, da sie direkt den Flugzeugentwurf beeinflussen können. In dieser Arbeit ist daher die Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes mit aufgenommen. Die letzten Kapitel beschäftigen sich mit verschiedenen technischen, wie auch organisatorischen Möglichkeiten den Flugbetrieb, so wie auch das Flugzeug selbst, umweltfreundlicher zu gestalten. Es werden verschiedene Forschungsergebnisse genannt. Darunter befinden sich unter anderen Ergebnisse des Intergovernmental Panel on Climate Change, der Society of British Aerospace Companies und des Projektes "Leiser Flugverkehr" des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Diese Projektarbeit dient dazu dem Leser einen Überblick über dieses sehr weitgefächerte Thema und Hilfestellung zur weiteren Beschäftigung mit der weiterführenden Literatur zu diesem wichtigen Thema zu geben.





DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU

Umweltaspekte des Luftverkehrs – Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nahbereich von Flughäfen

Aufgabenstellung zum *Projekt 2* 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	6
Verzeichnis der Tabellen	8
Liste der Abkürzungen	9
1 Einleitung	11
1.1 Motivation	11
1.2 Begriffsdefinitionen.....	12
1.3 Ziel der Arbeit	13
1.4 Aufbau der Arbeit.....	14
1.5 Literaturübersicht	16
2 Entwicklung des Luftverkehrs.....	17
2.1 Flugverkehrsentwicklung weltweit	17
2.1.1 Entwicklung von Passagierflügen und Frachtflügen	18
2.2 Flugverkehrsentwicklung Deutschland	19
2.3 Nachhaltiger Luftverkehr	20
2.3.1 Vorteile für ein Unternehmen.....	21
2.3.2 Nachhaltigkeitsberichte	21
3 Einflüsse des Luftverkehrs auf die Umwelt im Reiseflug.....	22
4 Umwelteinflüsse des Flugverkehrslärms in Flughafennähe.....	26
4.1 Lärmquellen.....	27
4.2 Auswirkungen der Lärmbelastung.....	30
4.3 Maßnahmen zu Reduzierung der Lärmbelastung.....	30
4.3.1 Lärminderung am Triebwerk.....	31
4.3.2 Minderung von Umströmungslärm	36
4.3.3 Lärmoptimierte Flugverfahren	39
4.3.4 Lärmoptimierter Flugbetrieb	39
4.3.5 Ökonomische Ansätze	40
4.4 Fluglärmschutzgesetz	41
4.5 Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes	42
4.6 Ziele der Novellierung.....	42
5 Umwelteinfluss von Schadstoffemissionen im Nahbereich von Flughäfen....	44
5.1 Emissionsquellen.....	45
5.2 Auswirkungen der Emissionen.....	47
5.3 Maßnahmen zur Reduzierung der Belastung	48
5.3.1 Flugzeugschlepp	50
5.3.2 Brennstoffzelle als APU Ersatz.....	53
6 Messverfahren zur Quantifizierung der Umweltbelastungen.....	54
6.1 Lärmmessung	54
6.2 Schadstoffmessung.....	55

7	Umweltverträglicher Flugzeugbetrieb.....	58
7.1	Energieverbrauch an Flughäfen.....	58
7.2	Abfälle und Abfallarten an Flughäfen.....	59
7.3	Flugzeug Life Cycle.....	59
7.3.1	Optimale Flugroutenplanung.....	61
8	Umweltoptimierter Flugzeugentwurf.....	63
8.1	Grundlegende Parameter.....	65
8.1.1	Entwurfsreichweite.....	65
8.1.2	Entwurfsflughöhe.....	67
8.1.3	Druckverhältnis im Triebwerk.....	67
8.2	Fortschrittliche Technologien.....	68
8.2.1	Composite Werkstoffe und zukünftige Rumpfkonzpte.....	68
8.2.2	Fortschrittliche Aerodynamik.....	69
8.2.3	Fortschrittliche Systeme.....	71
8.3	Alternative Antriebe und Kraftstoffe zu herkömmlichen Antriebsmitteln.....	73
8.3.1	Unducted Fan.....	74
8.3.2	Wasserstoffantrieb.....	76
9	Mögliche Auswirkungen von neuen Flugzeug-entwürfen auf den Klimawandel anhand von beispielhaften, fiktiven Konfigurationen.....	77
9.1	Analyse der einzelnen Konfigurationen.....	78
10	Zusammenfassung.....	82
11	Schlussbemerkung.....	83
	Literaturverzeichnis.....	84
	Anhang A Vergleich von Einzelschallquellen.....	90
	Anhang B Lärmpegel gemäß Lärmzertifizierung.....	91
	Anhang C Footprints unterschiedlicher Flugzeugtypen.....	92
	Anhang D Berechnungsbeispiel: NO₂-Emissionsbelastung in Zürich (2000).....	95
	Anhang E Emissionen aus Turbofantriebwerken in Prozent.....	96
	Anhang F Potential der Materialtechnologie / verbundwerkstoffgerechte Konstruktion.....	97
	Anhang G Ansätze und Konfigurationen der Zukunft.....	99
	Anhang H Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics of 2002.....	101

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Verkehrentwicklung auf deutschen Verkehrsflughäfen seit 1991.....	19
Bild 2.2	Prognose: Verkehrsaufkommen der deutschen Flughäfen 1997-2015.....	20
Bild 2.3	Fluggastprognose der deutschen Flughäfen mit Linienverkehr.....	20
Bild 3.1	Kraftstoffverbrauchsreduzierung durch Entwicklung	24
Bild 3.2	Emissionsanteile 2005 in Deutschland – nach Verursachern.....	25
Bild 4.1	Belästigung durch Verkehrslärm in Deutschland (Eigene Darstellung in Anlehnung an Verkehrsclub Deutschland).....	26
Bild 4.2	Die wichtigsten Schallquellen an einem Flugzeugtriebwerk	28
Bild 4.3	Wesentliche Quellen des Umströmungslärms.....	29
Bild 4.4	Technische Entwicklung von Turbo-Jet-Triebwerken	32
Bild 4.5	75 dB(A)-Lärmkonturen zweier Flugzeugmuster vergleichbarer Kapazität mit dem Unterschied von rund 25 Jahren technologischen Fortschritts.....	33
Bild 4.6	Darstellung der Chevron-Düsen an einem Modell der 747-8.....	33
Bild 4.7	Foto des Versuchsaufbaus die aktive Lärminderung.....	35
Bild 4.8	Versuchsaufbau zur Demonstration des modalen Regelverfahrens	35
Bild 4.9	Lärmeinfluss des Vorflügelspaltes	37
Bild 4.10	Droop Nose Konzept realisiert beim inneren Slat der A380.....	38
Bild 5.1	Luftmesscontainer SOMMI 1 am Frankfurter Flughafen.....	45
Bild 5.2	ICAO Referenz-LTO-Zyklus mit Schub und Dauer Angabe	46
Bild 5.3	Eigene Darstellung der Emissionen während des LTO Zyklus auf dem Flug- hafen Frankfurt/Main.....	47
Bild 5.4	Verteilung der Emissionen über eine Flugmission (4000km).....	50
Bild 5.5	Anlage des Flughafens München mit kurzen Rollwegen zur Startbahn	52
Bild 6.1	Darstellung der Lärmmesspunkte.....	55
Bild 6.2	Grünkohlkultur als Bioindikator	56
Bild 6.3	Bienenvölker und Honig als Bioindikator.....	57
Bild 7.1	Vergleich Luftraum USA – Europa.....	61
Bild 7.2	optimierte Flugroute nach Hongkong der Lufthansa.....	62
Bild 8.1	Darstellung des aktuellen Entwurfprozess	63
Bild 8.2	Entwurfprozess unter Beachtung von Umweltaspekten.....	64
Bild 8.3	Beispiele für optimierte Entwürfe	65
Bild 8.4	Darstellung eines Triebwerkes mit dem ICR Zyklus	68
Bild 8.5	Verzahnung zwischen optimaler Bauweise und optimalem Material	69
Bild 8.6	Kraftstoffeinsparpotenzial von Winglets anhand eines Beispiels	69
Bild 8.7	Darstellung der Installation eines HLFC Systems im Heck einer A320	70
Bild 8.8	HLFC Systems am Seitenleitwerk einer A320.....	71
Bild 8.9	Darstellung der herkömmlichen Energieversorgung.....	72
Bild 8.10	Darstellung einer möglichen zukünftigen Energieversorgung	72

Bild 8.11	Ein UDF Triebwerk an einer McDonnell Douglas.....	74
Bild 8.12	Gegenüberstellung (Tradeoffs) verschiedener Antriebsgenerationen	75
Bild 8.13	Schadstoffausstoß von Kerosin und Wasserstoff in verschiedenen Höhen.....	76
Bild 9.1	BWB Konfiguration (Flugzeug E)	79
Bild 9.2	Handley Page projected 300-seat laminar flow airliner (1961).....	80
Bild 9.3	Kraftstoffsparpotential neuer Maßnahmen und Technologien.....	81
Bild A.1	Geräusche und ihre Einzelschallquellen.....	90
Bild B.1	Lärmpegel gemäß Lärmzertifizierung nach ICAO-Anhang 16.....	91
Bild C.1	85 dB Lärmkontur einer A310-300 gegenüber einer A330-300	92
Bild C.2	85 dB Lärmkontur einer 747-200 gegenüber einer A340-600	93
Bild C.3	85 dB Lärmkontur einer 747-400 gegenüber einer A380-800	94
Bild D.1	Gesamtbelastung Region, d.h. inkl. aller Emissionsquellen	95
Bild D.2	Zusatzbelastung durch Flughafen.....	95
Bild E.1	Emissionen aus Turbofantriebwerken in Prozent.....	96
Bild F.1	Potential der Metalltechnologie.....	97
Bild F.2	Beispiele für die verbundwerkstoffgerechte Konstruktion.....	98
Bild G.1	Mind Map mit Lösungsansätzen und Fragestellungen	99
Bild G.2	Mögliche zukünftige Flugzeugkonfiguration	100

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1	Zusammenfassung der ICAO Flugverkehrsvorhersage im Jahr 2025.....	18
Tabelle 4.1	Tabelle der aktuellen Lärmgrenzwerte.....	43
Tabelle 8.1	Transport einer Payload über 15.000 km in einem oder drei Steps	66
Tabelle 8.2	Vergleich eines UDF Antriebs mit einem konventionellen Turbofan	75
Tabelle H.1	Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics (2002) ...	101
Tabelle H.2	Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics (2002) ...	102

Liste der Abkürzungen

ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
APU	Auxiliary Power Unit
ATRA	Advanced Technologies Research Aircraft (A320)
ATTAS	Advanced Technologies Transport Aircraft System (VFW 614)
BVWP	BundesVerkehrsWegePlan
BWB	Blended Wing Body
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
dB(A)	Lautstärke in Dezibel
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DFLD	Deutscher FlugLärmDienst
ft	Fuß (1 ft = 0,3048 m)
GWh	Gigawattstunden (1 GWh = 10 ⁹ Wh)
HC	Kohlenwasserstoffe
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control
kHz	Kilohertz (1000/s)
kWh/Pax	Kilowattstunden pro Passagier
kPa	Kilopascal (1 kPa = 1000 Pa = 1000 N/m ²)
L/D	Lift over Drag
LASAT	Lagrange Simulation Aérosol Transport = Programmpaket zur Messung von Schadstoffen in der Atmosphäre
LASPORT	Lagrange Simulation Aérosol Transport for Airports
LH ₂	Flüssigwasserstoff
LPG	Liquid Propane Gas
LTO	Landing and Take Off
Mio/a	Anzahl in Millionen pro Jahr
MTOW	Maximum Take Off Weight
MONA	Modern Noise Abatement Departure Procedure
NNC	Non-Noise Certificated
NO _x	Stickoxyde
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICR	Inter-Cooled Recuperative
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PAMELA	Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft
p.a.	pro Jahr

Pax	Passagier(e)
SFC	Specific Fuel Consumption
SO ₂	Schwefeldioxid
SOMMI	Self Operated Measuring and Monitoring Installation
UDF	UnDucted Fan (unumantelter Propfan)
UGA	UmweltGutachterAusschuss
VCD	VerkehrsClub Deutschland
VOC	Volatile Organic Compounds
WWW	World Wide Web

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wir Menschen leben heute in einer globalen Welt. In dieser globalen Welt besteht die Notwendigkeit für viele Menschen mit dem Verkehrsmittel „Flugzeug“ zu Reisen, um im harten wirtschaftlichen Wettbewerb bestehen zu können.

Aus den aktuellen Wachstumsraten des internationalen Passagiertransports und Luftfrachttransports lässt sich ableiten, dass diese Art des Transports kontinuierlich mit der globalen Wirtschaft wächst. Dieses anhaltende Wachstum rückte in den letzten Jahren die Frage, inwieweit der Luftverkehr zur Schadstoffbelastung der Luft beiträgt, immer mehr in den Mittelpunkt. Wie jede Beförderung von Person und Gütern ist auch der Luftverkehr mit Umweltauswirkungen verbunden. Verkehr beansprucht Flächen, verbraucht Rohstoffe und verursacht Lärm und Abgase. Doch wird das Thema Flugverkehr und die damit verbundenen Emissionen häufig überschätzt oder ist der Einfluss des Flugverkehrs auf die Atmosphäre wirklich bedeutend hoch?

„Einerseits belastet der Flugverkehr die Umwelt und das Klima und andererseits ist er von großer wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung“ (Schumann 1999).

Die Tatsache, dass durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe Schadstoffe entstehen, die zur Klimaerwärmung beitragen, überträgt der Politik und den Technikern einen erheblichen Handlungsbedarf. Gerade die Luftfahrt sollte als eine technologieführende, internationale Branche in die Verantwortung genommen werden, bzw. selbst ihre Verantwortung erkennen.

Die Globalisierung und besonders die wirtschaftliche Entwicklung im asiatischen Raum wird in Zukunft nach weiteren Transportkapazitäten verlangen. Bei den technischen Möglichkeiten zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der schädlichen Emissionen ist für die heutigen kerosinbetriebenen Hochbypass-Triebwerke und konventionellen Flugzeugkonfigurationen bereits eine hohe Sättigung erreicht. Somit besteht die Notwendigkeit ein Luftfahrzeug für die Zukunft zu entwickeln, das es den Airlines erlaubt, Passagiere und Fracht noch effizienter und unter stetig strenger werdenden Umweltgesichtspunkten zu befördern. Genau an diesem Punkt setzt diese Projektarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes „**Grüner Frachter** - Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration“ an.

1.2 Begriffsdefinitionen

EMAS

Der Begriff der EMAS, Eco-Management and Audit Scheme, wird nach dem Umweltgutachterausschuss folgendermaßen definiert (**UGA 2007**):

Das Gemeinschaftssystem für das freiwillige Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (Eco-Management and Audit Scheme, EMAS) ist ein von den Europäischen Gemeinschaften 1993 entwickeltes Instrument für Unternehmen, die ihre Umweltleistung verbessern wollen. Rechtsgrundlage ist die Verordnung (EG) Nr. 761/2001. Der Aufbau eines UMS und die Abläufe entsprechen seit 2001 auch bei EMAS der ISO 1400.

ISO 14001

Die internationale Umweltmanagementnorm ISO 14001 legt weltweit anerkannte Anforderungen an ein Umweltmanagementsystem fest und ist Teil einer Normenfamilie. Diese Normenfamilie beinhaltet zahlreiche weitere Normen zu verschiedenen Bereichen des Umweltmanagements, u. a. zu Ökobilanzen, zu Umweltkennzahlen bzw. zur Umweltleistungsbewertung. Sie kann sowohl auf produzierende als auch auf dienstleistende Unternehmen angewendet werden.

Die ISO 14001 legt einen Schwerpunkt auf einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess als Mittel zur Erreichung der jeweils definierten Zielsetzung in Bezug auf die Umweltleistung einer Organisation (Unternehmen, Dienstleister, Behörde, etc.). Der kontinuierliche Verbesserungsprozess beruht auf der Methode Planen-Ausführen-Kontrollieren-Optimieren:

- **Planen:** Festlegung der Zielsetzungen und Prozesse, um die Umsetzung der Umweltpolitik der Organisation zu erreichen
- **Ausführen:** die Umsetzung der Prozesse
- **Kontrollieren:** Überwachung der Prozesse hinsichtlich rechtlichen und anderen Anforderungen sowie Zielen der Umweltpolitik der Organisation. Gegebenenfalls Veröffentlichung der Umweltleistung
- **Optimieren:** Falls notwendig müssen die Prozesse korrigiert werden. Hierzu soll ein Unternehmen eine betriebliche Umweltpolitik, Umweltziele und ein Umweltprogramm festlegen sowie ein entsprechendes Managementsystem aufbauen, das bei der Zielerreichung hilft.

VISION 2020

Luftfahrtbeteiligte Ministerien, die Europäische Kommission, Flugzeug- und Triebwerkshersteller und Ausrüster, sowie natürlich Forschungseinrichtungen haben sich 2001 zu einer europäischen Initiative „Vision 2020“ zusammengeschlossen. Diese Initiative hat eine Vision für den europäischen Luftverkehr im Jahr 2020 entworfen und die zu erwartenden Anforderungen konkret formuliert. Um aus diesen Anforderungen wiederum direkt Forschungspro-

gramme abzuleiten, wurde auf europäischer Ebene das „Advisory Council for Aeronautic Research in Europe“ (ACARE) eingesetzt. Die Hauptziele der „Vision 2020“ lauten:

- Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen um 50%
- Reduktion der Stickoxid-Emissionen um 80%
- Reduktion des wahrgenommenen Lärms um 50 %
- Reduktion der Emissionen während der Produktion und Wartung
- Ermittlung von Entsorgungs- und Recyclingverfahren
- Reduzierung der Kosten des Luftverkehrs um 30%
- Reduktion der Unfallrate um 80%

1.3 Ziel der Arbeit

Diese Projektarbeit soll dem Leser eine gute Übersicht über den sehr großen Bereich der Umweltaspekte in der Luftfahrt geben. Die aktuellen Klimadiskussionen belegen, dass das Thema Umweltschutz und die Verringerung des weltweiten CO₂ Ausstoßes in der Zukunft immer wichtiger wird. Der Leser soll in dieser Arbeit über die Geschichte der Luftfahrt und dem daraus resultieren Wachstum an die Umweltprobleme der Luftfahrt herangeführt werden. Ziel dieser Projektarbeit ist es, die Entwicklung der Luftfahrt darzustellen, die Emissionen zu benennen, Zusammenhänge zu erläutern und Ergebnisse und Ziele aus internationalen Programmen zusammenzutragen, um das Forschungsprojekt „Grüner Frachter“ zu unterstützen.

Das Projekt „Grüner Frachter“ hat das Ziel, konventionelle and unkonventionelle Frachtflugzeugkonfigurationen zu erforschen. Die Untersuchungen basieren auf einem angenommenen Jahr der Indienststellung um 2025. Im Mittelpunkt stehen umweltfreundliche Flugzeuge mit ökonomischem Flugbetrieb. Das schließt folgende technische Aspekte ein (Scholz 2007):

- geringer Kraftstoffverbrauch
- zukünftige Kraftstoffarten (LH₂, LPG, synthetische Kraftstoffe, ...)
- geringer Fluglärm (Nachtflug)
- geringe Emissionen (CO₂, NO_x, ...)
- geringe Betriebskosten auch durch reduzierte Besatzung (pilotenloser Flug)

1.4 Aufbau der Arbeit

Durch den Verlauf der Projektarbeit sollen zunächst die nötigen Grundkenntnisse und Hintergründe, wie zum Beispiel die Entwicklung des Luftverkehrs, vermittelt werden, bevor die Umweltaspekte der Luftfahrt und die verschiedenen Methoden zur Quantifizierung erläutert werden.

- Die Einbeziehung von einigen Umweltvorschriften, Gesetzen und internationalen Zielen soll helfen, die Anforderungen an zukünftige Flugzeugkonfigurationen abzuleiten. Im Laufe der Arbeit wird eine Verknüpfung zwischen den Gesetzen, technischen Möglichkeiten und der Umsetzung vollzogen.
- Die Literaturübersicht stellt die wichtigsten Quellen zum Projektthema dar, welche weitere Detail- und Hintergrundinformationen liefern können.
- Der Hauptteil dieser Schrift enthält **die Ausführungen** zum Thema:

Abschnitt 2 beschreibt die Entwicklung des Luftverkehrs und geht dabei detailliert auf die Entwicklung der Fracht und Passagierflüge weltweit und in Deutschland ein.

Abschnitt 3 behandelt die Einflüsse des Luftverkehrs auf die Umwelt im Reiseflug.

Abschnitt 4 widmet sich den Umwelteinflüssen der Lärmemissionen des Luftverkehrs im Flughafennahbereich, wobei die Lärmquellen, die Auswirkungen, Maßnahmen zu Minderung des Lärms und das novellierte Lärmgesetz angesprochen werden.

Abschnitt 5 behandelt den Umwelteinfluss der Schadstoffemissionen im Nahbereich von Flughäfen, wobei die Schadstoffquellen, die Auswirkungen und Maßnahmen zu Minderung der Emissionen angesprochen, sowie Möglichkeiten im Detail genannt werden.

Abschnitt 6 beschreibt die angewandten Messverfahren zur Quantifizierung der Umweltbelastungen.

Abschnitt 7 erläutert verschiedene Möglichkeiten und Ansätze, um den Flugbetrieb umweltverträglich zu gestalten.

- Abschnitt 8** ist dem umweltoptimierten Flugzeugentwurf unter Berücksichtigung der wichtigsten Entwurfsparameter bezogen auf Umweltaspekte gewidmet.
- Abschnitt 9** widmet sich den möglichen Auswirkungen von neuen Flugzeugentwürfen auf den Treibhauseffekt anhand von beispielhaften, fiktiven Konfiguration
- Abschnitt 10** gibt eine Zusammenfassung dieser Projektarbeit wieder.
- Abschnitt 11** gibt eine abschließende Bemerkung zum Projektthema
- Anhang A** gibt einen Vergleich von Einzelschallquellen (Flugzeugen, Kraftfahrzeugen, Hochgeschwindigkeitszügen)
- Anhang B** zeigt die Lärmpegel verschiedener Flugzeugtypen gemäß Lärmzertifizierung nach ICAO-Anhang 16
- Anhang C** stellt Footprints unterschiedlicher Flugzeugtypen dar
- Anhang D** zeigt ein Berechnungsbeispiel der NO₂-Emissionsbelastung in Zürich
- Anhang E** veranschaulicht die Verbrennungsprodukte eines Turbofantriebwerkes
- Anhang F** zeigt das Potential der Metalltechnologie im Bezug auf die Gewichtsreduzierung auf und zeigt verbundwerkstoffgerechte Konstruktionen
- Anhang G** zeigt aktuelle Fragestellungen des Flugzeugentwurfes und mögliche zukünftige Flugzeugkonfiguration
- Anhang H** gibt einen Vergleich zwischen den nationalen und internationalen Emissionszielen der verschiedenen Programme

1.5 Literaturübersicht

Viele Informationen, die in dieser Arbeit erfasst sind, sind aus dem Internet entnommen.

Der IPCC Bericht (**IPCC 1999**) "Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III" von 1999 enthält viele Informationen über die Auswirkungen von Emissionen auf die Atmosphäre. Es wird detailliert beschrieben, welche Wirkung von welchen Quellen und Schadstoffen ausgeht. Neben den in diesem Bericht aufgenommenen Informationen enthält der IPCC Bericht weitere Hintergrundinformationen.

Der IPCC Bericht (**IPCC 2007**) „Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4) - Klimaänderung 2007 - Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger“ enthält aktuelle Forschungsergebnisse zum Klimawandel. Diese Zusammenfassung ist sehr gut geeignet um sich in relativ kurzer Zeit einen guten Überblick zu verschaffen. Neben den in diesem Bericht verarbeiteten Informationen, enthält die Zusammenfassung weitere Aspekte.

Eine sehr gute und informative Quelle ist der Abschlussberichtes des DLR Projektes „Leiser Flugverkehr“ (**DLR 2004**). In dem Bericht werden alle Aspekte des Bereiches Fluglärm angesprochen. Die Auswirkungen auf den Organismus werden ebenso beschrieben, wie Lärmquellen und die dazu gehörenden technischen und operativen Lösungsansätze. Des Weiteren sind numerische Simulationsprogramme beschrieben, die dazu dienen, den Flugverkehr der Zukunft zu design, um ihn so leiser zu gestalten. Der Bericht enthält viele weitere Details, die nicht in diese Arbeit mit aufgenommen werden konnten.

Der Bericht "Air Travel – Greener by Design The Technology Challenge" der Society of British Aerospace Companies (**SoBAC 2001**) beschreibt zuerst die Quellen und die daraus resultierenden Effekte des Klimawandel. Des weiteren sind in dem Bericht die möglichen Auswirkungen von zukünftigen Flugzeugkonfigurationen mit neuen Technologien beschrieben. Es sind dreizehn verschiedene Konfigurationen beschrieben, unter denen auch einige sehr zukunftsweisende Konzepte zu finden sind. Im Bericht werden viele allgemeine Zusammenhänge im Bezug auf den umweltfreundlichen Entwurf genannt und erläutert, welche nicht komplett in dieser Arbeit genannt werden.

2 Entwicklung des Luftverkehrs

In den letzten Jahrzehnten hat der Luftverkehr ein kontinuierliches Wachstum erfahren. Immer mehr Menschen nutzen das Transportmittel Flugzeug, um von A nach B zu kommen. Diese Entwicklung ist jedoch erst durch den technologischen Fortschritt in der Luftfahrt möglich geworden. Dieses Kapitel geht auf die historische Entwicklung der Luftfahrt ein und nennt dabei die wichtigsten technologischen Erfolge. Weiterhin wird auf das vergangene und prognostizierte Wachstum der Passagier- und Frachtflüge international, wie auch national eingegangen.

2.1 Flugverkehrsentwicklung weltweit

Zunächst soll auf die historische Entwicklung des Luftverkehrs eingegangen werden, wobei die wichtigsten Meilensteine aufgezeigt werden:

- 1783-1919 Vom Ballonflug zu ersten Nonstop-Atlantiküberquerung
 - 1901 Konstruktion des 1. lenkbaren Luftschiffes – „Graf Zeppelin“
 - 1903 erste Flüge mit Motorflugzeugen
 - 1918 erster Linienverkehr Washington – New York, London – Paris und Berlin – Weimar
 - 1919 erste Nonstop-Atlantiküberquerung von John Alcock und Arthur Whitten Brown

- 1919-1944 Politische Entwicklung: Internationale Standards für Transportregulierung, bilaterale Abkommen zwischen Ländern, Routen-Netzwerke, Gründung der ICAO

- 1945-1973 Entwicklung von Qualität und Kosten: Ansätze der Open Sky Politik werden sichtbar. Neue Preisstrukturen, neue Servicetypen, neue Airlines mit neuen Geschäftsmodellen
 - 1950 erstes Düsenflugzeug „Comet 1“: 40 Passagiere - 800 km/h
 - 1970 Einsatz von Großraumflugzeugen, Boeing 747
 - 1972 Einsatz von Großraumflugzeugen als Fracht-Version, Boeing 747F

- 1974-1990 Netzwerke und Allianzen: Erste Low Cost Fluggesellschaften, Zusammenschlüsse von Airlines zu Allianzen
- 1991-2007 Eine neue Epoche in der Luftfahrt: In dieser Zeit werden die tiefsten Preise erreicht und es entwickelt sich ein neuer Fokus auf Kundenbedürfnisse. Aber auch den Emissionen, besonders die Lärmreduktion, und der Sicherheit wird mehr Aufwendung geschenkt.

Diese Fakten zeigen die rasante Entwicklung der Luftfahrt und der damit verbundenen Technologie auf. Im weiteren Verlauf soll die Entfaltung der Luftfahrtbranche in Zahlen widergespiegelt werden. Hierbei ist eine getrennte Betrachtung von Passagierflügen und Frachtflügen sinnvoll.

2.1.1 Entwicklung von Passagierflügen und Frachtflügen

Im Linienflugverkehr werden heute weltweit pro Jahr über 2,2 Milliarden Passagiere befördert (IATA 2007). Über die weitere Entwicklung der Passagierzahlen gibt es eine Veröffentlichung der ICAO, die eine kontinuierliche Zunahme der beförderten Flugzeugreisenden prognostiziert. Aus den Forschungsergebnissen ergibt sich eine durchschnittliche Steigerung der Passagierzahlen um 4,1% pro Jahr bis zum Jahr 2025. Dies würde bedeuten, dass im Jahr 2025 4,5 Milliarden Passagiere befördert werden wollen (ICAO 2007).

Tabelle 2.1 Zusammenfassung der ICAO Flugverkehrsvorhersage im Jahr 2025 (ICAO 2007)

Scheduled services	Actual 1985	Actual 2005	Forecast 2025	Average annual growth rate (per cent)	
				1985–2005	2005–2025
TOTAL					
Passenger-kilometres (billions)	1 366	3 720	9 180	5.1	4.6
Freight tonne-kilometres (millions)	39 813	142 579	510 000	6.6	6.6
Passengers carried (millions)	896	2 022	4 500	4.2	4.1
Freight tonnes carried (thousands)	13 742	37 660	110 000	5.2	5.5
Aircraft-kilometres (millions)	n.a.	30 845	69 040	n.a.	4.1
Aircraft departures (thousands)	n.a.	24 904	50 450	n.a.	3.6
INTERNATIONAL					
Passenger-kilometres (billions)	589	2 197	6 225	6.8	5.3
Freight tonne-kilometres (millions)	29 384	118 482	452 120	7.2	6.9
Passengers carried (millions)	194	704	1 950	6.7	5.2
Freight tonnes carried (thousands)	5 884	22 630	80 000	7.0	6.5

Die Anzahl von Frachtflügen und die Menge der beförderten Güter nehmen momentan sehr stark zu. Die aktuelle Wachstumsrate bei den Frachtflügen ist sogar größer als bei den Passagierflügen. Im Jahr 2006 wurden etwa 39 Millionen Tonnen Güter mit Transportmaschinen

durch den Luftraum befördert (IATA 2007). Über die weitere mögliche Entwicklung des Luftfrachtverkehrs bis zum Jahr 2025 trifft die ICAO die Aussage, dass der Frachtverkehr, gemessen in beförderten Tonnen, mit einer durchschnittlichen Rate von 5,5% bis zum Jahr 2025 steigen wird (ICAO 2007). Sollte diese Vorhersage realistisch sein, so würden im Jahr 2025 110 Millionen Tonnen Fracht auf dem Luftweg transportiert werden. Tabelle 2.1 gibt neben den oben genannten Zahlen weitere Wachstumskennzahlen wieder.

2.2 Flugverkehrsentwicklung Deutschland

Die Flugverkehrsentwicklung in Deutschland ist steigend und folgt somit der globalen Tendenz. In der folgenden Abbildung 2.1 wird dies dargestellt. Dass die Zahl der beförderten Passagiere stärker gestiegen ist als die Zahl der Flugbewegungen, hängt mit der zunehmenden Kapazität der eingesetzten Flugzeuge zusammen.

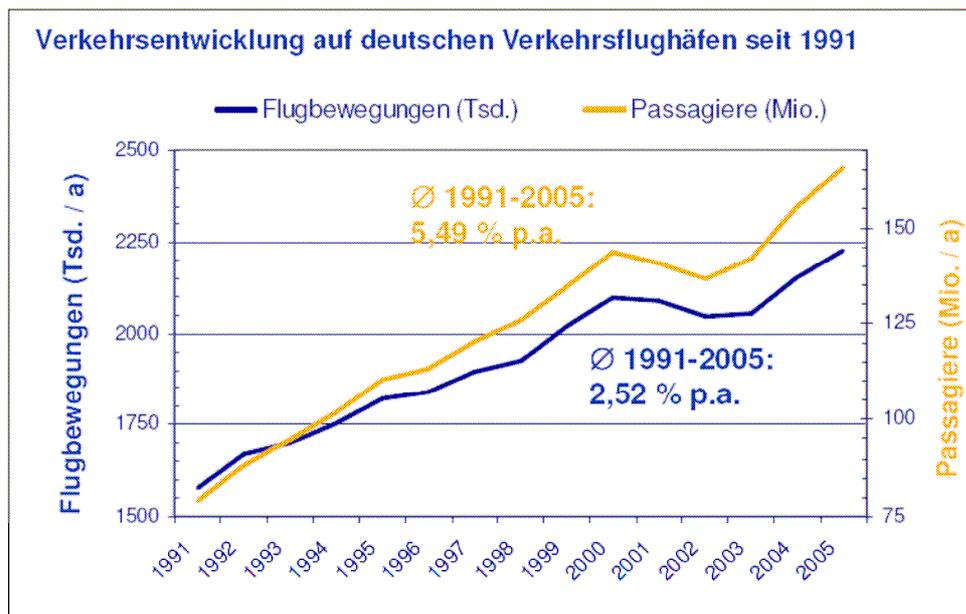


Bild 2.1 Verkehrsentwicklung auf deutschen Verkehrsflughäfen seit 1991 (Wagner 2006)

Der ADV hat eine Prognose zum Flugverkehrsaufkommen der deutschen Flughäfen von 2003 – 2015 aufgestellt (Abbildung 2.2). Danach wird auch in Deutschland aller Wahrscheinlichkeit nach der Flugverkehr kontinuierlich ansteigen.

Anhand der Abbildung 2.3 ist zu erkennen, dass die Fluggastprognosen der Flughäfen Frankfurt, München und Berlin am größten sind. Bei den kleineren Flughäfen ist eine verhältnismäßig geringere Zunahme festzustellen. Insgesamt wird aber deutlich, dass auf jeden Flughafen ein Zuwachs der Passagierzahlen zukommen wird.

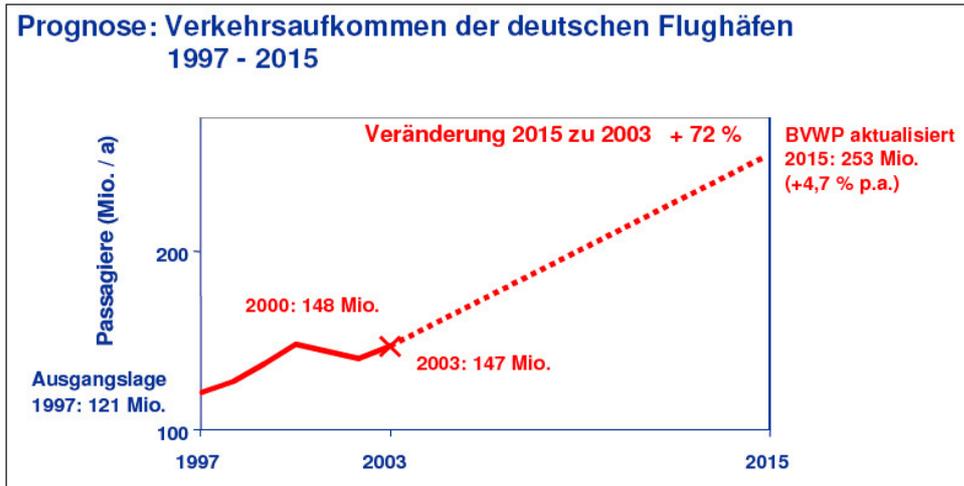


Bild 2.2 Prognose: Verkehrsaufkommen der deutschen Flughäfen 1997-2015 (Wagner 2004)

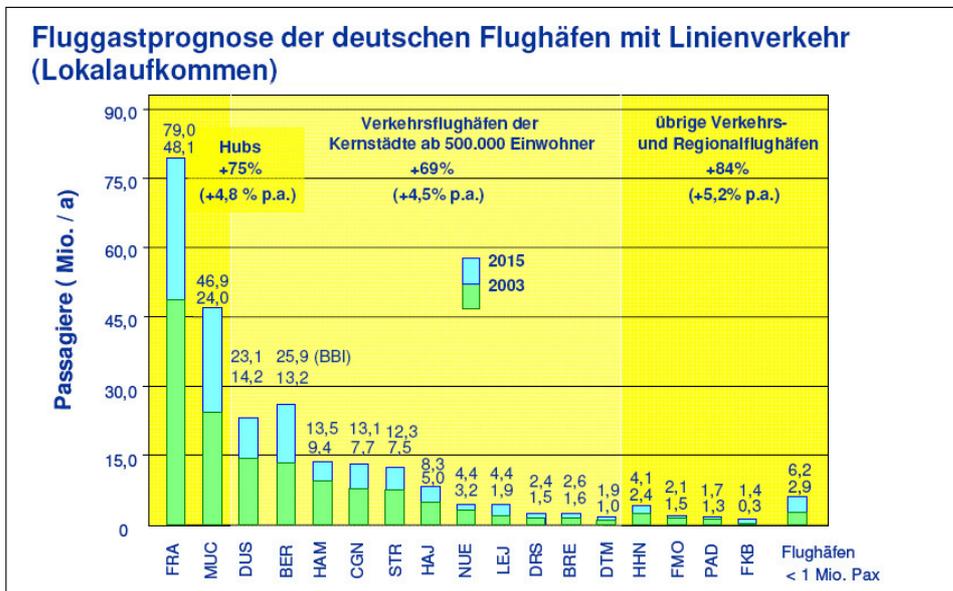


Bild 2.3 Fluggastprognose der deutschen Flughäfen mit Linienverkehr (Wagner 2006)

2.3 Nachhaltiger Luftverkehr

In Deutschland zeigten Unternehmen bereits in den 70er Jahren Interesse am Umweltschutz. In den 90ern Jahren gaben die ersten großen Unternehmen transparente Umweltdaten an die Öffentlichkeit, in dem sie auf freiwilliger Basis ihre Umweltwirkungen in Umweltberichten und Ökobilanzen offenlegten. Mit Einführung von EMAS im Jahr 1996 wurden insbesondere deutsche Unternehmen aktiv und die Nachhaltigkeit als unternehmerisches Leitbild wurde zunehmend zum Trendthema. Im Jahr 2000 griff die Europäische Union die Idee gesellschaftlicher Verantwortung auf und ermutigte alle europäischen Unternehmen, sich über die gesetzlichen Vorgaben hinaus für soziale und ökologische Nachhaltigkeit einzusetzen.

2.3.1 Vorteile für ein Unternehmen

Durch die transparente Offenlegung von Umweltdaten können für Unternehmen Vorteile entstehen, die sich nicht unerheblich auf den Gewinn eines Unternehmens niederschlagen können. Basis für die Schaffung von Vorteilen ist ein gesundes Unternehmen, das seine Verantwortung erkennt und willens ist, sowie in der Lage, sich für die Umwelt und Gesellschaft einzusetzen. Durch diese soziale und ökologische Ausrichtung kann ein Unternehmen seine wirtschaftliche Leistungsfähigkeit steigern und gegenüber seinen Mitbewerbern hervorstechen. Gleichzeitig aktiviert es mit diesem Einsatz die individuelle Risikovorsorge, verbessert sein Image nicht nur gegenüber Kunden, Kreditgebern, politischen Entscheidungsträgern und Öffentlichkeit, sondern auch gegenüber den eigenen Mitarbeitern. Für diese stellt ein solches Engagement durchaus eine Motivation da. Weiterhin sind die möglichen Qualitäts- und Produktivitätssteigerungen zu nennen, die beispielsweise mit einer EMAS oder ISO14001 Einführung einhergehen. In die modernen Umweltmanagementsysteme lassen sich Aspekte der Arbeitssicherheit oder des Qualitätsmanagement integrieren, sodass Prozesse nicht komplizierter werden, sondern häufig einfacher. Als größter Vorteil eines Umweltmanagementsystems gilt die Sicherstellung der Erfüllung aller gesetzlichen Vorschriften.

2.3.2 Nachhaltigkeitsberichte

Die aus den Umweltmanagementsystemen entstandenen positiven Maßnahmen lassen sich in Form eines Nachhaltigkeitsberichtes oder Umweltberichtes an die Öffentlichkeit kommunizieren. Bis vor wenigen Jahren lag Deutschland mit Nachhaltigkeitsberichten weit vorn, jedoch zeigen Länder wie Italien, Frankreich, Spanien und Japan ein zunehmendes Interesse an Nachhaltigkeitsberichten, was dazu geführt hat, dass sie bei Veröffentlichungen weit vorn liegen. In Deutschland wurden im November 2004 durch das Bilanzrechtsreformgesetz (BilReG) die Regelungen für einen Konzernbericht verändert. Unternehmen werden nun immer mehr verpflichtet über Arbeitnehmerbelange und Umweltschutz zu berichten. Angesichts dieser Entwicklungstendenzen kann es für jedes Unternehmen nur von Vorteil sein, rechtzeitig freiwilliges Engagement zu zeigen, um Glaubwürdigkeit und Vorbildverhalten zu zeigen, und um Umstellungsprobleme bei Gesetzesänderungen vorzubeugen. Mittlerweile veröffentlichen alle großen deutschen Flughäfen und Luftverkehrsunternehmen Nachhaltigkeitsberichte. Aus diesen Berichten sind einige Daten und Fakten in diese Projektarbeit eingeflossen.

3 Einflüsse des Luftverkehrs auf die Umwelt im Reiseflug

Die im internationalen Flugverkehr operierenden Flugzeuge fliegen zum überwiegenden Teil im Reiseflug in Höhen zwischen 9 und 12 km über dem Meeresspiegel. In Höhen von ca. 17 bis 20 km fliegen lediglich Überschallflugzeuge. Die Höhe der Tropopause 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. 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.

Der zivile Flugverkehr stellt in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre die einzige unmittelbare anthropogene Schadstoffquelle dar. In der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion spielen die Wirkungen des Luftverkehrs auf den Treibhauseffekt der Atmosphäre und die Veränderung der Ozonkonzentration eine Rolle. In Bezug auf den globalen Treibhauseffekt ist der Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2), Stickoxiden (NO und NO_2 , zusammengefasst als NO_x), und Wasserdampf (H_2O) von Bedeutung. Jeder dieser Stoffe hat in der Troposphäre und der unteren Stratosphäre eine zwei- bis vierfache stärkere Treibhauswirkung als die gleiche Menge abgegebener Schadstoffe am Boden (**IPCC 1999**). Außerdem können die emittierten Verbindungen einen zusätzlichen Treibhauseffekt bewirken, besonders die der Stickoxide. Die Stickoxidemissionen wirken als Beschleuniger, bzw. als Vorläufersubstanzen für weitere chemische Reaktionen, deren Produkte signifikanten Einfluss auf den Treibhauseffekt ausüben können (**IPCC 1999**). In der Troposphäre und der unteren Stratosphäre tragen Stickoxide des Luftverkehrs zur Bildung von Ozon bei, in darüber liegenden Schichten forcieren sie dagegen die Zerstörung von Ozon (**IPCC 1999**). Darüber hinaus führen die emittierten Stickoxide des Flugverkehrs in der oberen Troposphäre indirekt zu einer Verringerung der Konzentration des Treibhausgases Methan (**IPCC 2007**). Die Verringerung liegt bei einem Wert von 2 bis 3 %. Dadurch wird der durch die Stickoxidabgase des Luftverkehrs bedingte Treibhauseffekt um etwa 50 bis 80 % reduziert (**Schumann 1999**). Insgesamt ist das derzeitige Verständnis der Wirkung von Stickoxiden bzw. seinen Sekundärprodukten als mittelmäßig für Ozon, hoch für Methan und niedrig für durch Methan verursachten stratosphärischen Wasserdampf einzuschätzen (**IPCC 2007**). Weiterhin haben Stickoxide eine sehr viel kürzere Verweilzeit in der Atmosphäre als Kohlendioxid und konzentrieren sich deshalb in der Nähe von Flugrouten und verändern so primär die regionalen klimatischen Bedingungen (**IPCC 2007**). 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**). In die laufenden Forschungen wird die Bildung von Kondensstreifen und die Anregung zusätzlicher Zirrenbildung mit einbezogen. Kondensstreifen vermindern ebenso wie die genannten Treibhausgase die Wärmeabstrahlung der Erde, da sie Energie reflektieren, anstatt sie ins Universum entschwinden zu lassen, und unterstützen somit die Erwärmung der Atmosphäre (**VCD 2006**). Die vom Luftverkehr verursachten Partikel bzw. Aerosole haben eine Wirkung auf den Treibhauseffekt. Hierbei spielen zwei Mechanismen eine Rolle, welche wissenschaftlich bewiesen sind: Zum einen absorbieren und streuen Partikel bzw. Aerosole die Sonnenstrahlung sowie langwellige Strahlung direkt. Zum anderen spielen sie indirekt eine wichtige Rolle in Bezug auf die Kondensstreifen- und Wolkenbildung. Sie können als Kondensationskerne für die Wolkenbildung fungieren und die physikalischen und strahlungsbezogenen Eigenschaften von Wolken verändern (**IPCC 1999**). Während die Rußaerosole bei einer unvollständigen Verbrennung von Treibstoff zu einem Aufheizungseffekt führen, streuen Sulfataerosole überwiegend Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und haben somit einen kühlenden Effekt (**IPCC 2007**).

Der nationale Kurzstreckenverkehr ist im Verhältnis zum Langstreckenverkehr, bezogen auf 100 geflogene Passagierkilometer, mit einem höheren Treibstoffverbrauch und damit höheren Emissionen pro 100 Passagierkilometern verbunden. Zum einen ist zu beachten, dass Kurzstreckenflüge zu einem erheblichen Teil aus Start- und Steigflügen, welche einen besonders hohen CO₂-Ausstoß pro Kilometer aufweisen, bestehen. Weiterhin werden bei Kurzstreckenflügen unter 1000 km vielfach kleinere Fluggeräte eingesetzt, die oft nur teilweise besetzt sind. Somit ist der Kurzstreckenverkehr, auch unter dem Gesichtspunkt, dass Kurzstrecken wesentlich effizienter mit der Bahn oder anderen Verkehrsmittel zurückgelegt werden könnten, besonders klimaschädlich. Zum anderen ist zu beachten, dass auf Langstrecken Kerosin verbrannt wird, um Kerosin zu befördern. Außerdem kommt der Verbrauchsvorteil pro 100 Passagierkilometern für die Langstrecke durch einen besseren Seat-Load-Factor zustande. Zur Berechnung dieses Factors werden die zurückgelegten Passagierkilometer durch die theoretisch verfügbaren Sitzplatzkilometer geteilt. Da zum einen auf Langstreckenflügen, welche üblicherweise mit großen Flugzeugen bedient werden, die maximal verfügbare Sitzplatzanzahl höher ist als auf Kurzstrecken, und somit auch die Anzahl der Sitzplatzkilometer und zum anderen auch die Auslastung bei Langstreckenflügen normalerweise höher ist als bei der Kurzstrecke, ergibt sich für die Langstrecke ein besserer Seat-Load-Factor. Von dieser Aussage sind Flüge von Low Cost Carrier, z.B. EasyJet und Ryanair, auszunehmen.

Der Kraftstoffverbrauch bei den im innerdeutschen Teilnetz der Deutschen Lufthansa AG eingesetzten Flugzeugen beträgt im Durchschnitt ca. 8,85 Liter pro 100 Passagierkilometer (**Lufthansa 2007**). Im Langstreckenverkehr liegt der Kraftstoffverbrauch mit ca. 4,06 Litern pro 100 Passagierkilometer deutlich darunter, was unter anderem mit dem eben beschriebenen besseren Load Factor zusammenhängt (**Lufthansa 2007**). Damit liegt der Energieverbrauch pro 100 Personenkilometern beim Langstreckenverkehr zwar über dem der anderen Massenverkehrsmittel Bus und Bahn, ist im Mittel jedoch wegen des hohen Auslastungsgrades nicht

höher als beim durchschnittlich ausgelasteten Pkw. Durch moderne Flugzeuge konnte der Treibstoffbedarf um 70% im Vergleich zu den 1960er Jahren gesenkt werden. Somit emittieren Flugzeuge heute gegenüber früher deutlich weniger Schadstoffe (ADV 2007). Abbildung 3.1 spiegelt diese Aussage wieder. Umso neuer ein Flugzeug ist, umso besser ist sein SFC. Weiterhin ist das ACARE Ziel in der Grafik dargestellt.

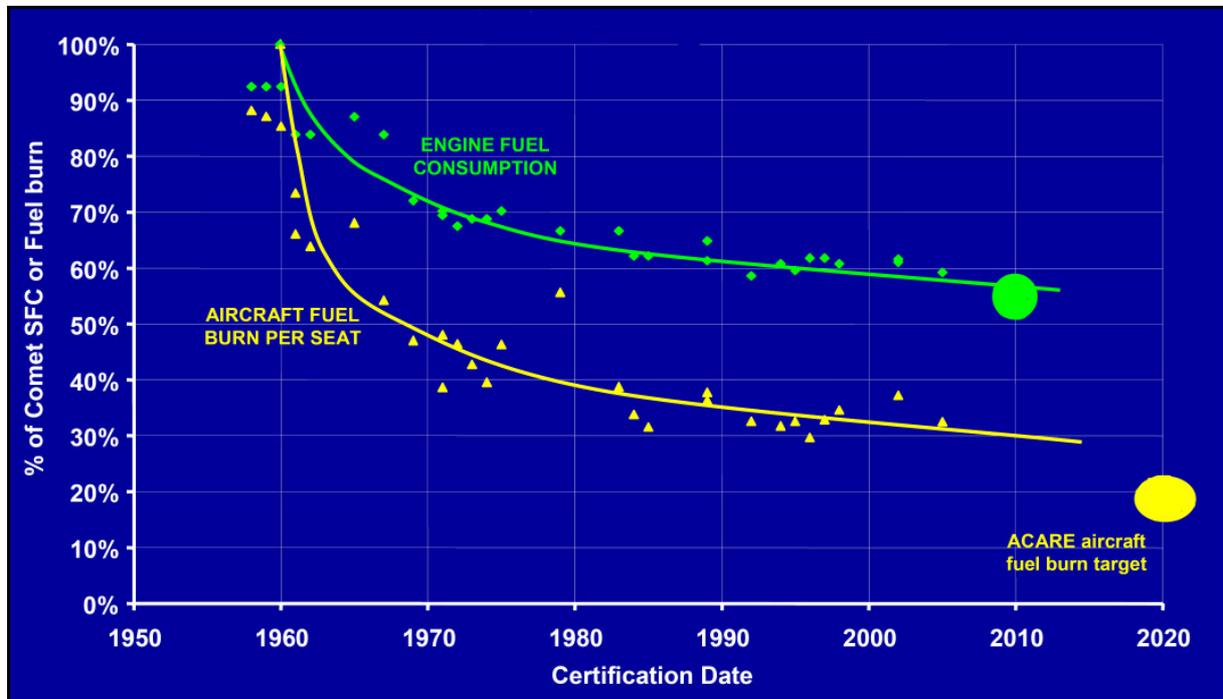


Bild 3.1 Kraftstoffverbrauchsreduzierung durch Entwicklung (Jupp 2007)

Der Anteil des Schadstoffausstoßes in die Atmosphäre, der durch Flugzeuge in, bzw. über Deutschland verursacht wird, ist heute noch klein im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern. Je nach Art des Schadstoffes lag er im Jahr 2005 bei 0,8% bis 6% des jeweiligen Gesamtschadstoffausstoßes aller Verkehrsquellen. Hierbei wurden alle nationalen und von Deutschland abgehenden Luftverkehrsbewegungen berücksichtigt (ADV 2007). Wegen der Globalität des Problems ist eine rein nationale Betrachtung jedoch nicht ausreichend. Weltweit gehen derzeit etwa 2,2% der verkehrlichen CO₂-Emissionen auf den Flugverkehr zurück (Lufthansa 2007). Abbildung 3.2 veranschaulicht nach Art des Schadstoffes die einzelnen Anteile der verschiedenen Verursacher in Deutschland.

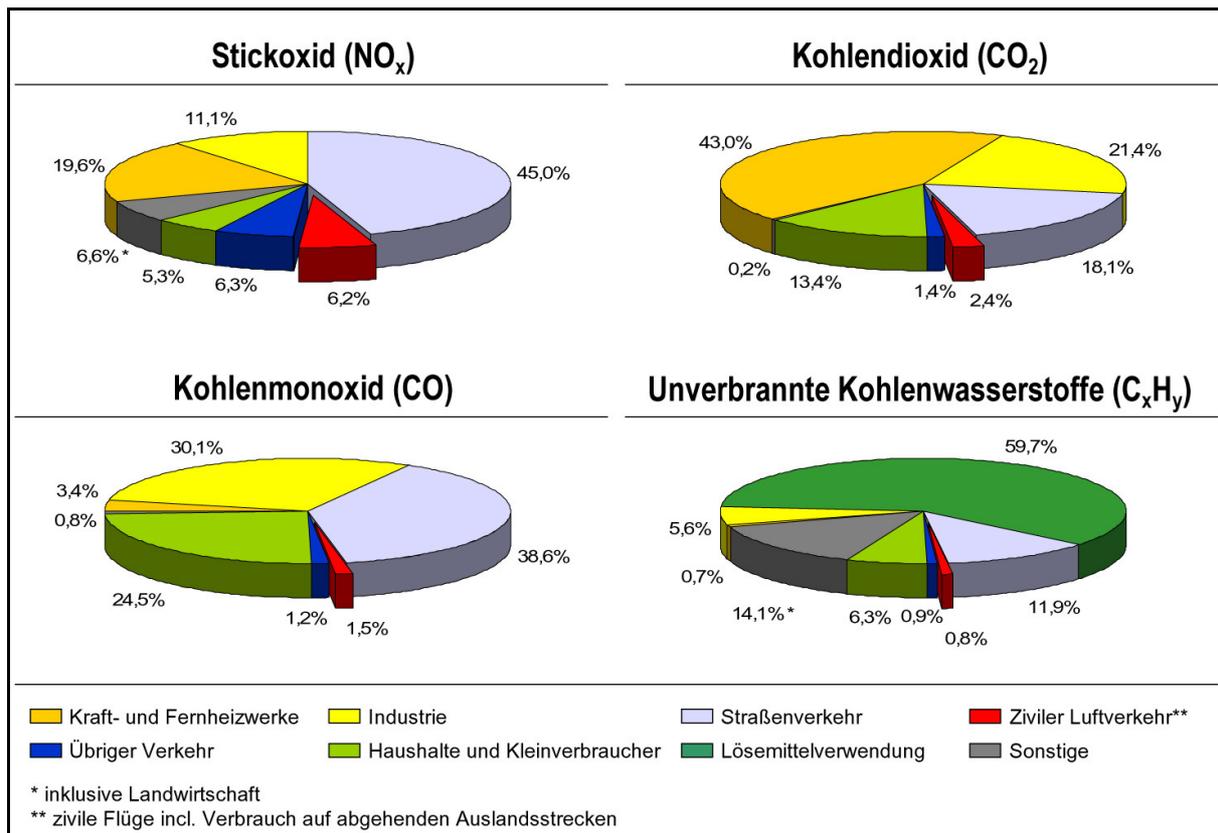


Bild 3.2 Emissionsanteile 2005 in Deutschland – nach Verursachern (ADV 2005)

Ein weiterer Bereich, in dem der Luftverkehr Einfluss auf die Umwelt hat, ist der Nahbereich von Flughäfen. Dieser Aspekt wird ausführlich im Kapitel 4 und 5 behandelt. In Kapitel 4 der Lärm aspekt und in Kapitel 5 die Schadstoffemissionen.

4 Umwelteinflüsse des Flugverkehrslärms in Flughafennähe

Wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, entstehen durch den Luftverkehr viele Emissionen. Das Thema Fluglärm ist derzeit neben dem Ausstoß von CO₂ von besonderer Aktualität in Deutschland und auch weltweit. Dieses Kapitel widmet sich den Einflüssen des Fluglärms auf die Umwelt in Flughafennähe.

Die vom Fluglärm betroffenen Menschen werden heutzutage aufgrund der starken Zunahme von Starts und Landungen, verbunden mit dem Wegfall von Lärmpausen und der Ausweitung des Flugbetriebs auf lärmsensible Zeiten am frühen Morgen, am späten Abend, am Wochenende und in der Nacht, stärker belastet. Fluglärm ist außerdem eine der zahlreichen Emissionen, die von den Betroffenen am intensivsten wahrgenommen wird und somit für Spannungen zwischen Flughafenbetreibern und Bürgern sorgt (DLR 2004). Auch deswegen ist im Februar 2007 die Novelle des Fluglärmschutzgesetzes verabschiedet worden, welche am 06.07.2007 in Kraft getreten ist (DFLD 2007) (Näheres hierzu im Kapitel 4.4 bis 4.6).

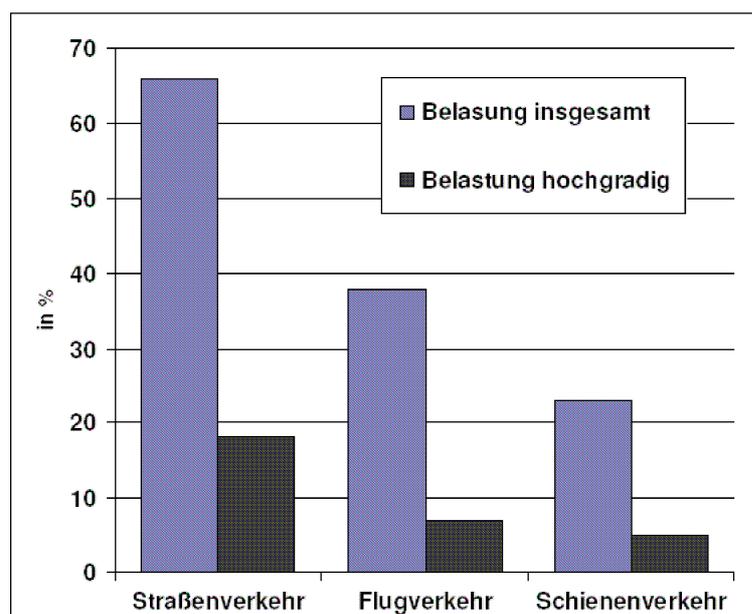


Bild 4.1 Belästigung durch Verkehrslärm in Deutschland (Eigene Darstellung in Anlehnung an Verkehrsclub Deutschland, VCD 2006)

Laut einer Studie des Umweltbundesamtes über den prozentualen Anteil von Belästigten durch Verkehrslärm in Deutschland von 2006 liegt der Luftverkehr an zweiter Stelle hinter dem Straßenverkehr. An dritter Stelle liegt der Schienenverkehr (UBA 2007). 7% der Befragten fühlen sich durch Flugverkehr hochgradig belastet, während es ca. 18% der Befragten beim Straßenverkehr und ca. 5% beim Schienenverkehr sind (VCD 2006). Abbildung 4.1 verdeutlicht diese Zahlen anschaulich.

Zum Verständnis des Begriffs „Fluglärm“, soll an dieser Stelle eine kurze Definition des Terminus vom Umweltbundesamt gegeben werden.

Lärm von Flugzeugen und Hubschraubern beim Start, bei der Landung oder während des Fluges wird als Fluglärm bezeichnet. Triebwerksprobeläufe, das Rollen im Bereich der Flugsteige und bis zur Start- und Landebahn, Bewegungen von Straßenfahrzeugen (Tankfahrzeuge, Busse, etc.) auf dem Flugplatzgelände werden als Bodenlärm bezeichnet und nicht dem Fluglärm zugeordnet. Auch der Lärm durch den Zubringer- und Lieferverkehr und auf den Parkplätzen wird nicht zum Fluglärm gerechnet. (UBA 2007b)

In diesem Bericht wird zur Vereinfachung auf die Unterscheidung von „Bodenlärm“ und „Fluglärm“ verzichtet. Beide Lärmarten werden in diesem Bericht unter dem Begriff Fluglärm zusammengefasst.

4.1 Lärmquellen

Als Quellen von Lärm im Umkreis von Flughäfen sind hauptsächlich die Triebwerke der Flugzeuge, aber auch der Umströmungslärm, welcher bei der Landung sogar deutlich stärker als der Triebwerkslärm ist (DLR 2004), zu nennen. Hinzukommt außerdem der indirekte Lärm, welcher nicht vom Flugzeug selbst ausgeht.

Während der Startphase laufen die Triebwerke auf Hochtouren und erzeugen somit einen hohen Lärmpegel. Hierbei ist es möglich den Start auf unterschiedliche Arten durchzuführen. Bei einem Steilstart gewinnt das Flugzeug durch volle Startleistung sehr schnell an Flughöhe und verursacht eine Lärmkonzentration auf die Gebiete in unmittelbarer Nähe des Flughafens. Somit sind nur wenige Anwohner vom Lärm betroffen, aber dafür umso stärker belastet. Die zweite Methode ist ein langsamer Steigflug. Die Triebwerksleistung beim Start ist bei diesem Verfahren geringer und somit erzeugen die Flugzeuge weniger Triebwerkslärm. Dabei breitet sich der Fluglärm über ein wesentlich größeres Gebiet aus und belastet dabei deutlich mehr Menschen, jedoch im geringeren Maße (DLR 2004). Die internen Lärmquellen sind der Fan, der Verdichter, die Brennkammer und die Turbine. Der Fan erzeugt Töne aller Frequenzen, dazu gehören die besonders lästigen Kreissägentöne, sowie Breitbandgeräusche. Der Verdichter erzeugt sehr hochfrequente Töne und Breitbandgeräusche. Die Brennkammer emittiert tieffrequente Breitbandgeräusche, mitunter auch ein tonales Brummen. Die Turbine strahlt hohe Töne und Breitbandgeräusche ab (DLR 2004). Aber auch der Triebwerksabgasstrahl erzeugt Schallwellen, die vom menschlichen Ohr als Lärm wahrgenommen werden. Abbildung 4.2 stellt die genannten Lärmquellen und Lärmarten eines Triebwerks anschaulich dar.

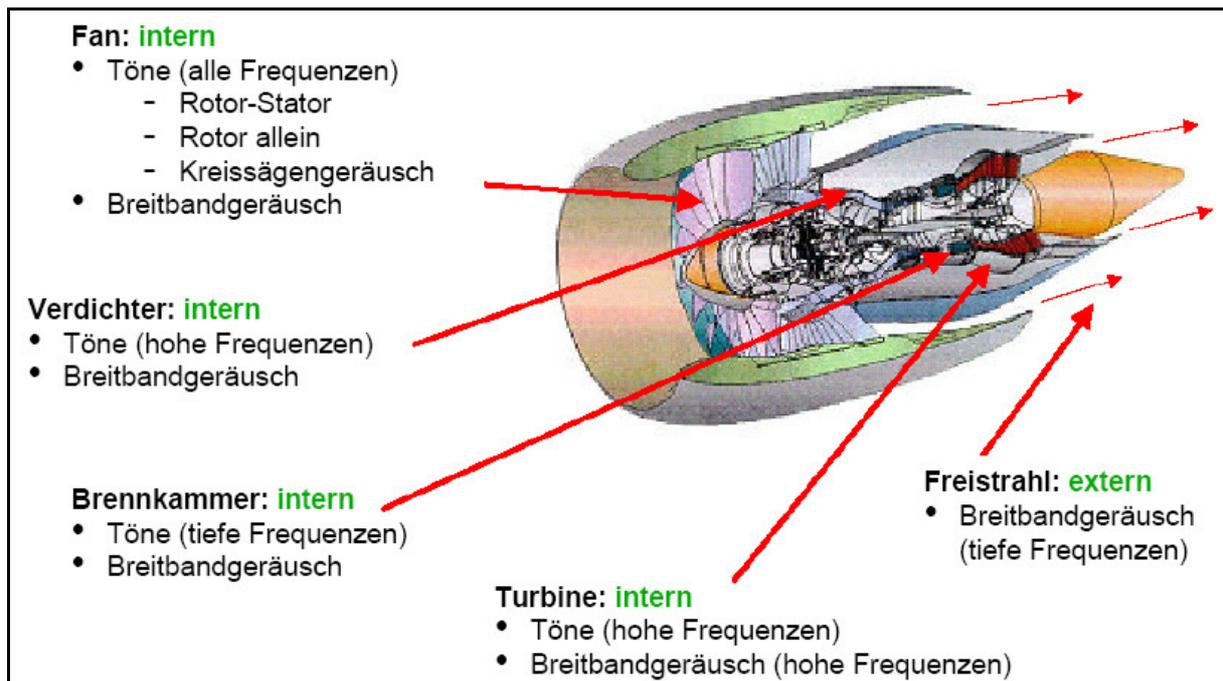


Bild 4.2 Die wichtigsten Schallquellen an einem Flugzeugtriebwerk (DLR 2004)

Die lästigste Geräuschkomponente stellt jedoch das Rotor-Stator-Interaktionsgeräusch heutiger Triebwerke da, welches durch das Auftreffen der Nachläufe vom Rotor auf den Stator entsteht. Die meisten Anteile dieses Geräusch werden in Richtung Triebwerksaustritt weitergegeben (DLR 2004).

Der Landeanflug eines Flugzeugs sorgt ebenfalls für Lärmbelästigung bei der Bevölkerung im Umkreis eines Flughafens. In diesem Fall ist zwar die Triebwerksleistung im Vergleich zum Start deutlich reduziert, aber das Flugzeug führt normalerweise einen langsamen und flachen Sinkflug in Richtung Flughafen durch. Dieser Anflug führt in der Regel über bebauten Gebiete und sorgt dabei für Lärmbelastungen. Diese Lärmbelastung entsteht, wie bereits oben genannt, zum größten Teil durch den Umströmungslärm des Flugzeuges (DLR 2004). Als weitere erhebliche Lärmquelle bei Landungen ist der Umkehrschub zu nennen.

Zur Zeit ist der Umströmungslärm, der erzeugt wird, nur bei niedrigen Triebwerksleistungen im Anflug von Bedeutung. Mit der zukünftigen Entwicklung leiserer Triebwerke wird sich dieses Problem aber verschärfen, insbesondere da das technologisch erreichbare Lärmreduzierungspotenzial beim Umströmungslärm vergleichsweise geringer ist als beim Triebwerk. Zu den wesentlichen Quellen von Umströmungsgeräuschen gehören insbesondere die Fahrwerke, Hochauftriebssysteme und Fahrwerks/Klappen Interaktion, siehe Abbildung 4.3 (DLR 2004).



Bild 4.3 Wesentliche Quellen des Umströmungslärms (DLR 2004a)

Die komplexe Struktur heutiger Flugzeugfahrwerke stellt ein „Cluster“ von Einzelschallquellen dar. Die einzelnen lärm erzeugenden Komponenten dieses „Clusters“ sind, hier angegeben in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit, das Drehgestell, die Bremsen, die Felgenhohlräume und Gelenkverbindungen und die Schacht-Bein Kombinationen des Fahrwerks.

Zum Hochauftriebslärm wurden aeroakustische Untersuchungen an einem Originalflügel des Airbus A320 vom DLR durchgeführt. Diese Untersuchungen haben zusätzliche Erkenntnisse zum Umströmungslärm realer Flugzeugkonstruktionen gebracht. Im Vergleich zu Versuchen an Modellen wurden konstruktionsbedingte Zusatzlärmquellen gefunden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Löcher und Hohlräume in verschiedenen Bauteilen, deren Überströmung sowohl zu tonaler als auch zu einer breitbandigen Geräuschabstrahlung führt. Diese „konstruktionsbedingten“ Zusatzschallquellen sind Flügelausschnitte für Vorflügelhalter, Hohlräume in der Klappenseitenkante, Löcher in der Flügeloberfläche und die Klappenhaltermechanik. Neben den tieffrequenten Strömungsgeräuschen von der Seitenkante der Landeklappen wurde der Vorflügel mit seinen hochfrequenten Geräuschen im Laufe der Untersuchung als die wesentlichste Lärmquelle am Hochauftriebssystem identifiziert (DLR 2004).

Zusätzlicher Strömungslärm kann entstehen, wenn der turbulente Strömungsnachlauf des Fahrwerkbeins auf ausgefahrene Landeklappen trifft. Dieses Phänomen wird Interaktionslärm genannt und entsteht im Nasenbereich der Landeklappen. Neben anderen Lärmquellen am Hochauftriebsflügel liefert der Interaktionslärm durch turbulente Anströmung der Landeklappen einen bedeutenden Beitrag zum Gesamtlärm für Frequenzen bis 0,4 kHz (DLR 2004). Jedoch erzeugt das Flugzeug an sich selbst nicht nur beim Starten, Landen und Fliegen Lärm, sondern auch beim Rollvorgang am Boden zu den Parkpositionen. Außerdem ist es notwendig, dass Flugzeugtriebwerke getestet werden und dabei auch unter Vollast am Boden laufen. Diese Testläufe sind im weiten Umkreis von Flughäfen zu hören. Hinzu kommt, dass in den

meisten Fällen während der Abfertigung die APU zur Stromversorgung und Luftversorgung angeschaltet ist und somit Lärm erzeugt.

Mit indirekten Lärmquellen sind z.B. Bodenfahrzeuge gemeint, welche zur Versorgung von Flugzeugen und sonstigen operativen Abläufen am Flughafen eingesetzt werden. Dazu zählen Tankwagen, Push-Back-Fahrzeuge, Gepäckwagen, Catering-Fahrzeuge und auch Busse.

4.2 Auswirkungen der Lärmbelastung

Gerade im Bereich von Flughäfen fühlen sich viele Anwohner von Lärm belästigt. Nach neueren Ergebnissen aus der Lärmforschung haben Belastungen durch Lärm Auswirkungen auf den Menschen und dessen Umgebung (**VCD 2006**). Die genauen Auswirkungen von Fluglärm, im besonderen von Nachtfluglärm, werden unter anderem im DLR Abschlussbericht zum Projekt „**Leiser Flugverkehr**“ in Kapitel 3, im Bericht vom VCD „**Reduzierung der Umweltfolgen des Flugverkehrs**“, im Bericht des Umweltbundesamtes „**Beeinträchtigung durch Fluglärm**“ und auf der DLR Webseite unter www.dlr.de/flugphysiologie ausführlich beschrieben. Erwähnenswert ist zusammenfassend, dass der Belastungsbereich in drei Klassen eingeteilt ist (**VCD 2006**):

- Die Grenze zur erheblichen Belästigung ist bei einer Belastung durch Fluglärm von 55 dB(A) am Tag und 45 dB(A) in der Nacht erreicht.
- Ab 60 dB(A) am Tag und 50 dB(A) Fluglärmbelastung in der Nacht ist aus der Sicht der Präventivmedizin mit Gesundheitsbeeinträchtigungen zu rechnen.
- Eine Fluglärmbelastung ab 65 dB(A) am Tag und 55 dB(A) lässt Gesundheitsbeeinträchtigungen in Form von Herz-Kreislauf-Krankheiten erwarten.

Anhang A zeigt Vergleichswerte von anderen Lärmquellen in der Öffentlichkeit.

4.3 Maßnahmen zu Reduzierung der Lärmbelastung

Die Reduzierung von Fluglärm ist mit Maßnahmen aus verschiedenen Kategorien möglich. Man unterscheidet dabei u.a. nach technischen, flugbetrieblichen, ökonomischen, rechtlichen und planerischen Maßnahmen. Die möglichen planerischen und rechtlichen Maßnahmen lassen sich sehr gut verknüpfen und anhand des Fluglärmschutzgesetzes erklären. Dieses ist im Kapitel 4.4 beschrieben.

Die naheliegendste Möglichkeit ist sicherlich, um die Lärmbelastung in der Nachbarschaft von Flughäfen zu mindern, die technische Lärmreduktion am Flugzeug selbst, welche auch als aktive Lärminderung bezeichnet wird. Hier sind in der Vergangenheit beträchtliche Erfolge erzielt worden. Allerdings ist mit einem weiteren gravierenden Technologiesprung durch die Entwicklung neuer Triebwerkstypen mittelfristig nicht zu rechnen. Mittelfristig einsetzbare Maßnahmen sind operationeller oder administrativer Art, sprich z.B. lärmoptimierte Flugverfahren oder Maßnahmen wie lärmabhängigen Landegebühen (**DLR 2004**).

Eine Untersuchung des Einsatzes von Lärminderungsmaßnahmen wie z.B. lärmbezogene Landegebühen hat gezeigt, dass derartige Maßnahmen in Deutschland aufgrund der Lage der Flughäfen in dichtbesiedelten Bereichen bezogen auf den weltweiten Durchschnitt vergleichsweise stark eingesetzt werden. Hier ist allerdings noch weiteres Potential bei optimaler Durchführung vorhanden (**DLR 2004**). In weitergehenden Untersuchungen des DLR wurden zu bevorzugende Maßnahmen identifiziert. Hierbei ist auch der in Zukunft auftretende Aspekt einer optimierten Flächennutzungsplanung verstärkt zu betrachten (**DLR 2004**). Um die Auswirkung von Lärminderungsmaßnahmen auf die Gesamtlärmbelastung besser analysieren zu können, wurde ein Computerprogramm erarbeitet. Mit diesem Programm ist es möglich, modellhaft einzelne lärmbezogene Maßnahmen, wie zum Beispiel Flugzeugtypenumschichtung, bzw. Ausmusterung und die Auswirkung von verschärften Grenzwerten zu simulieren und ihre Wirkung abzuschätzen (**DLR 2004**). Weitergehend ist dieses Programm näher im Abschlussbericht des Projektes „Leiser Flugverkehr“ in Kapitel 7 und 8 erläutert.

4.3.1 Lärminderung am Triebwerk

Bei der Lärminderung am Triebwerk wurden in der Vergangenheit große Fortschritte erzielt. In den 1960er und 70er Jahren gebaute Flugzeuge, wie die Boeing 707, waren mit sogenannten Turbojet Triebwerken ausgestattet, bei denen die gesamte angesaugte Luft verdichtet in die Brennkammer geführt wird. Es entsteht ein Abgasstrahl bestehend aus auf hohe Geschwindigkeit gebrachter heißer Luft. Beim Austritt dieser heißen Luft kommt es beim Zusammentreffen mit der kalten Außenluft zu erheblichem Lärm (**Bräunling 2007**). In der Folgezeit wurde eine neue Art von Triebwerken erfunden. Die so genannten Turbofan Triebwerke (Abbildung 4.4 unten) sind mit einem Mantelstrom ausgestattet. Die angesaugte Luft wird verdichtet und im Anschluss nur teilweise in die Brennkammer geführt. Die restliche Luft strömt am Haupttriebwerk vorbei und umhüllt den Freistrahle der Brennkammer. Auf diese Weise trifft die heiße Luft nicht so intensiv auf die Umgebungsluft und der Lärm wird verringert (**Bräunling 2007**). Derzeit ist ein Mantelstromverhältnis zwischen 5:1 und 8:1 üblich. Das bedeutet, dass zwischen 1/6 und 1/9 der Luft durch die Brennkammer strömen und der Rest um diese herum geführt wird (**ADV 2007**). Gegenüber den Jets der ersten Generation,

den Turbo-Jets, sind moderne Strahlverkehrsflugzeuge vergleichbarer Kapazität um etwa 30dB leiser. Da eine Schallminderung um 10dB etwa mit einer Halbierung der empfundenen Lautstärke gleichzusetzen ist, bedeutet diese Entwicklung eine Lärmreduzierung um nahezu 90%. (ADV 2007).

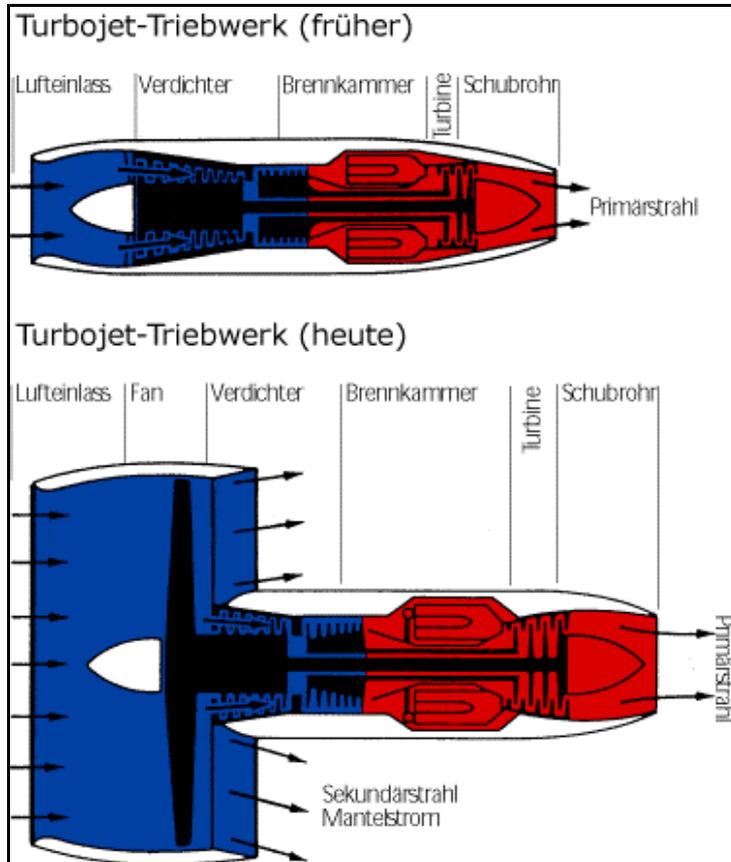


Bild 4.4 Technische Entwicklung von Turbo-Jet-Triebwerken (ADV 2007)

Heutzutage werden die erreichten Verbesserungen mit Hilfe von sogenannten Footprints dargestellt. Abbildung 4.5 zeigt die 75 dB(A)-Lärmkonturen zweier Flugzeugmuster vergleichbarer Kapazität, die in der technologischen Entwicklung rund 25 Jahre auseinander liegen.

Das weitere technische Reduktionspotential für Triebwerkslärm wird von Fachleuten auf etwa 10 dB eingeschätzt (DLR 2004). Eine weitere erhebliche Minderung des Freistrahllärms ist nur über eine weitere Verringerung der Strahlgeschwindigkeit erreichbar. Zukünftige Entwicklungen streben daher ein Mantelstromverhältnis von 10:1 und höher an. Wegen der damit verbundenen großen Triebwerksdurchmesser werden die Flugzeugkonfigurationen erheblich verändert werden müssen (DLR 2004). Zu beachten ist, dass bei einem zunehmenden Mantelstromverhältnis der Spritverbrauch ansteigen kann. Hier sollte ein vernünftiges Verhältnis zwischen Lärmaspekten und dem SCF gefunden werden (SoBAC 2001). Weiterhin sind bereits jetzt bei kleinen Verhältnisveränderungen kaum mehr Lärminderungen spürbar und die Technologie stößt bei einem Mantelstromverhältnis von 12:1 ohnehin an die Grenzen des Machbaren (Bräunling 2007).

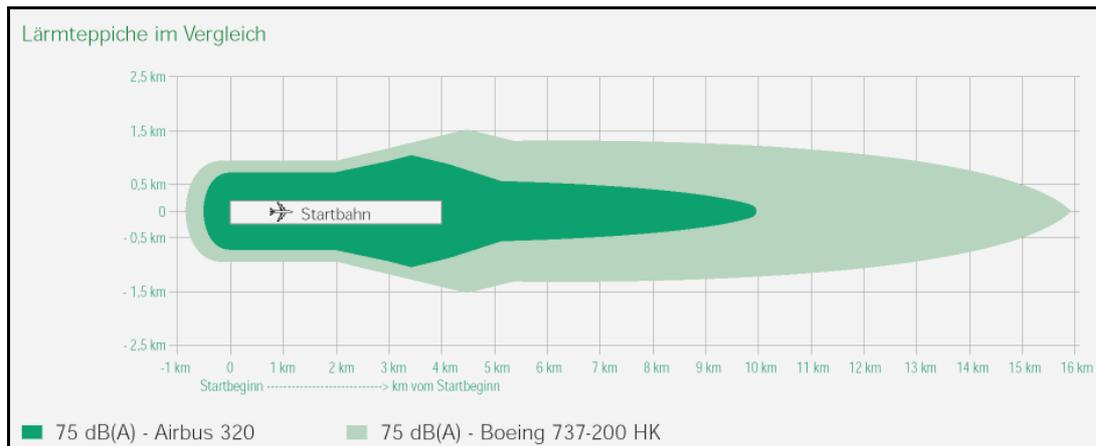


Bild 4.5 75 dB(A)-Lärmkonturen zweier Flugzeugmuster vergleichbarer Kapazität mit dem Unterschied von rund 25 Jahren technologischen Fortschritts (**München 2005**)

Eine andere Möglichkeit den Freistrahllärm zu senken, stellt der Austausch der vorhandenen Düsen durch gezackte Düsen, die sogenannten Chevron-Düsen BILD, dar (Abbildung 4.6). Dies ist zwar eine begrenzte Möglichkeit, jedoch ist sie aussichtsreich, da sie nur mit geringen Schubverlusten verbunden ist. Im Rahmen des Projektes „Leiser Flugverkehr“ wurde solch eine Düse an einem Airbus A319 der Lufthansa erprobt. Die Düse wurde vom DLR in Zusammenarbeit mit der Lufthansa Technik hergestellt. Bei Frequenzen bis zu 1000 Hz wurde im Flugversuch eine Lärminderung von bis zu 1 dB ermittelt. Mit gezackten Ausführungen der inneren und äußeren Düse sind Geräuschminderungen bis etwa 3 dB zu erreichen (**DLR 2004**). An der Boeing 787 werden diese Düsen zum Beispiel eingesetzt, um den Lärmpegel in der Kabine zu reduzieren, da ein CFK Rumpf nicht so viel Schall absorbiert, wie es ein herkömmlicher Metallrumpf tut.



Bild 4.6 Darstellung der Chevron-Düsen an einem Modell der 747-8 (**Stoker 2007**)

Im Folgenden werden einige Lärmreduzierungskonzepte am Beispiel des Fans vorgestellt. Der Fan ist bereits bei heutigen Triebwerken die wichtigste interne Schallquelle (**DLR 2004**). Sobald das Nebenstromverhältnis weiter erhöht wird, steigt auch seine relative Bedeutung. Wenn

der Freistrahllärm um 10 dB verringert wird, muss das Fangeräusch um einen vergleichbaren Betrag reduziert werden. Andernfalls wird es keine leisen Triebwerke mit hohem Nebenstrom geben (**DLR 2004**). Im Rahmen des Projektes „Leiser Flugverkehr“ wurden zwei Strategien zur Fangeräuschminderung verfolgt. Die erste Strategie zielt auf einen lärmarmen Entwurf ab. Die zweite nutzt Gegenschall um den Lärm zu reduzieren. Bei der Möglichkeit den abgegebenen Lärm durch Gegenschall zu reduzieren, gibt es drei verschiedene Ansätze, Gegenschall mit Lautsprechern, Gegenschall mit Lautsprechern nur für einzelne Frequenzbereiche, Gegenschall durch Strömungsbeeinflussung.

Der lärmarme Entwurf erfordert ein zuverlässiges Berechnungsverfahren für die Schallemission des Fans. Ein Verfahren für die Berechnung der Fan-Töne wurde vom DLR entwickelt. Weiterführende Informationen befinden sich hierzu im DLR Abschlussbericht zum Projekt „Leiser Flugverkehr“ im Kapitel 4. Das entwickelte Verfahren wurde eingesetzt, um in Zusammenarbeit mit der Firma Snecma für das europäische Projekt SILENCE(R) ein Fan mit einem Nebenstromverhältnis von 12 und sehr geringen Umfangsgeschwindigkeiten zu entwerfen. Durch geringe Umfangsgeschwindigkeiten und geneigte Statorblätter lassen sich die tonalen Schallemission eines Fans reduzieren (**DLR 2004**).

Das Verfahren der aktiven Lärminderung durch Gegenschall ist nicht neu, die Anwendung auf das Flugtriebwerk mit seinen hoch komplizierten Schallfeldern ist aber besonders schwierig. Bei der aktiven Lärminderung bei Strömungsmaschinen geht es um die Erzeugung eines gegenphasigen Schallfeldes in den Strömungskanälen, um das von der Turbomaschine erzeugte primäre Schallfeld möglichst weitgehend auszulöschen (**DLR 2004**). Das sich aus der Überlagerung von Schall und Gegenschall ergebende Schallfeld wird mit einem Satz Mikrofonen vermessen. Ein Regler berechnet in Echtzeit die erforderlichen Lautsprechersignale. Je komplizierter das auszulöschende primäre Schallfeld ist, desto mehr Fehlermikrofone und Lautsprecher werden benötigt, und desto höher werden die Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Reglers (**DLR 2004**).

Ein Prinzipexperiment zur aktiven Lärminderung in einem Flugtriebwerk wurde vom DLR durchgeführt. Der Versuchsaufbau mit 32 Lautsprechern (4 Ringe á 8), 32 wandbündigen "Fehlermikrofonen" und 96 wandbündigen Messpositionen zur Schallfeldanalyse ist in Abbildung 4.7 gezeigt. Man erkennt an der großen Zahl der Lautsprecher und Fehlermikrofone, dass der Aufwand zur Erzeugung von Gegenschall in einem Flugzeugtriebwerk erheblich ist, weil das Schallfeld sehr kompliziert ist. Das Experiment hat gezeigt, dass der Tonpegel um bis zu 24 dB gesenkt werden kann. (**DLR 2004**).

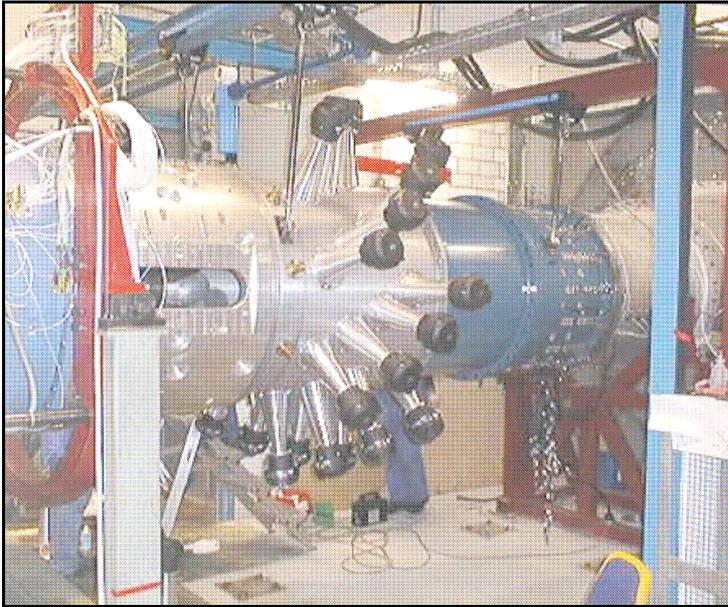


Bild 4.7 Foto des Versuchsaufbaus die aktive Lärminderung (DLR 2004)

Das DLR hat im Rahmen des Projektes ein neues Regelungsverfahren entwickelt, mit dem Ziel, den technischen Aufwand für die aktive Lärminderung erheblich zu reduzieren. Dies wird dadurch erreicht, dass der Gegenschall nur für eine begrenzte Zahl von so genannten akustischen Moden erzeugt wird. In der Abbildung 4.8 sind drei Ringe mit je 8 Lautsprechern zu erkennen. Es folgen 4 Ringe mit je 16 Mikrofonen und eine Modenanalyse-Sektion. Der technische Aufwand ist erheblich geringer als bei der herkömmlichen, oben beschriebenen, Regelung (DLR 2004).

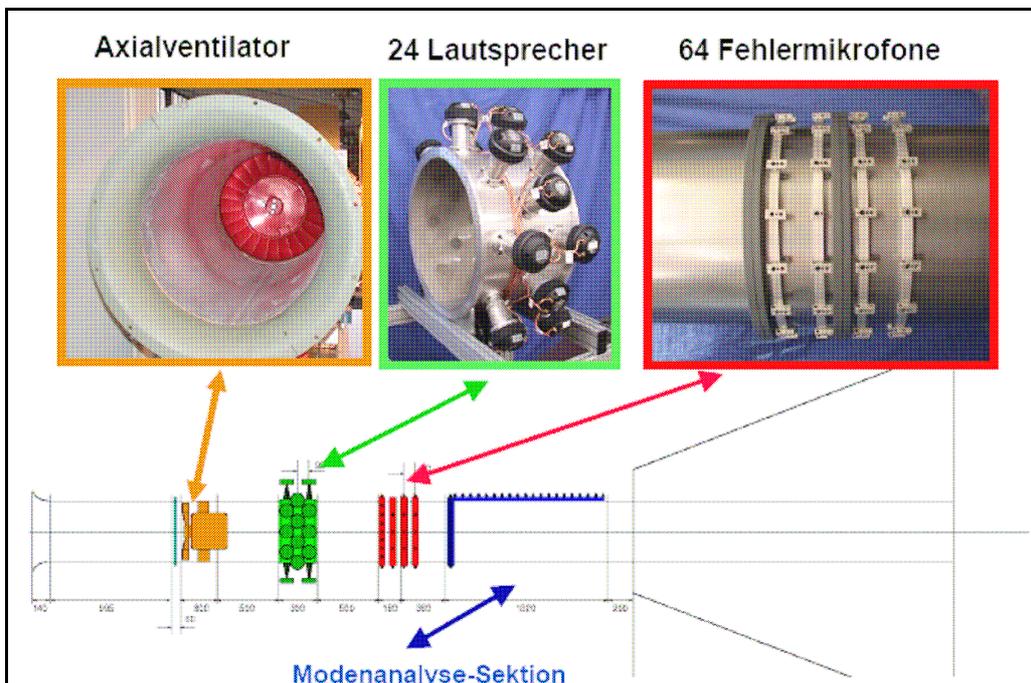


Bild 4.8 Versuchsaufbau zur Demonstration des modalen Regelverfahrens (DLR 2004)

Bei der dritten Methode der aktiven Lärminderung handelt es sich um die Erzeugung von Gegenschall an den Rotor- und Stator-Schaufeln durch aktive Beeinflussung der Strömung um die Schaufelspitzen (DLR 2004). Die Umströmung der Schaufelspitzen wird durch Luftstrahlen am Gehäuse gezielt verändert. Der hierzu benötigte Luftmassenstrom beträgt 0.9% des Hauptmassenstroms. Die Blattfolgefrequenz bei 900 Hz kann mit dieser Methode um über 20 dB reduziert werden. Allerdings erhöht sich der hochfrequente Breitbandpegel etwas. Damit ist bewiesen, dass auf den Einbau von Lautsprechern in Flugtriebwerken verzichtet werden kann (DLR 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine mögliche Technologie zur Minderung der störenden tonalen Komponenten des Fans der Einsatz aktiver Lärminderung („Antischall“) ist. Eine praktisch besser realisierbare neuartige Umsetzung des Konzepts bietet aber der Einsatz aerodynamischer Antischallquellen, z.B. durch Einblasen von Druckluft. Es ist auf Grund der langen Entwicklungszeiten im Flugzeugbau sehr wichtig, dass moderne technische Konzeptionen zur Lärminderung schon jetzt am Fluggerät untersucht werden. Dabei ist ein besonderes Augenmerk darauf zu richten, dass die entwickelten Verfahren auch in die alltägliche Praxis umgesetzt werden können (DLR 2004).

4.3.2 Minderung von Umströmungslärm

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, kommen die meisten Umströmungsgeräusche der Zelle von den Fahrwerken, Hochauftriebssystemen und der Fahrwerks/Klappen Interaktion. In diesem Kapitel sollen Forschungsansätze, Lösungsvorschläge und Ziele zur Minderung von Umströmungslärm erläutert werden. Bevor Lärminderungsmaßnahmen angesetzt werden können, müssen erst die verschiedenen hochkomplexen Entstehungsmechanismen von Umströmungslärm an Fahrwerken und Hochauftriebssysteme verstanden werden.

Das DLR hat im Rahmen des Projektes „Leiser Flugverkehr“ Messungen an verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen durchgeführt. Unter anderen wurde eine „strömungsgünstige“ Vollverkleidung der gesamten Fahrwerksstruktur untersucht. Dieser Prinzipversuch zeigte ein theoretisch erreichbares Lärminderungspotenzial von mehr als 10 dB. Diese Potenzial ist jedoch nur als „theoretisch“ anzusehen, weil der Grad der installierten Verkleidungen die wesentlichen Funktionen des Fahrwerks äußerst behinderte, bis verhinderte (DLR 2004). Es wurden jedoch auch mit realistischen Teilverkleidungen gute Ergebnisse erzielt. Da die heutigen Fahrwerke ein „Cluster“ an Einzelschallquellen aufweisen, kommen als eventuelle Nachrüstlösung nur Teilverkleidungen in Frage. Versuche haben gezeigt, dass mit nachrüstbaren Teilverkleidungen eine Lärminderung um bis zu 3 dB bezüglich des Gesamtpegels möglich ist (DLR 2004).

Der Umströmungslärm der Hochauftriebsysteme kann um bis zu 2 dB gemindert werden, wenn alle „konstruktionsbedingten“ Zusatzschallquellen wie Flügelausschnitte für Vorflügelhalter, Hohlräume in der Klappenseitenkante und Löcher in der Flügeloberfläche beseitigt werden. Detaillierte Studien wurden vom DLR insbesondere am Vorflügel durchgeführt, da er, wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, als die wesentlichste Lärmquelle am Hochauftriebssystem erkannt wurde (DLR 2004).

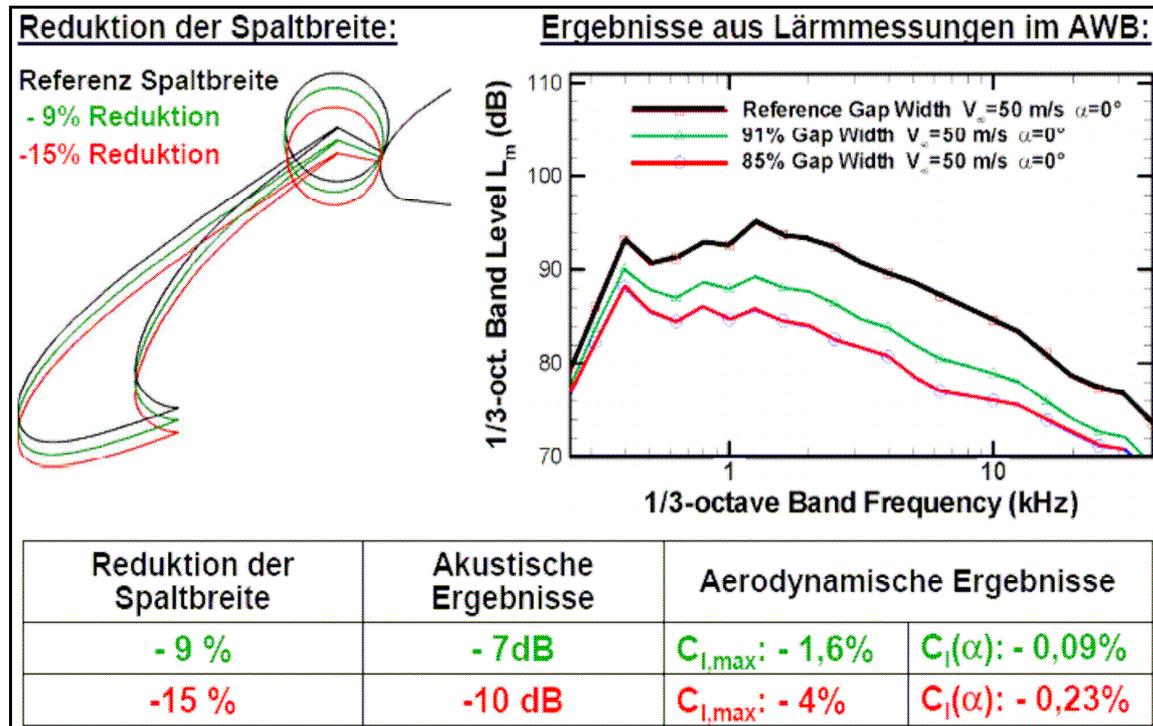


Bild 5.9 Lärmeinfluss des Vorflügelspaltes (DLR 2004)

Um den Zusammenhang zwischen Vorflügelstellung, den zugehörigen lokalen Strömungsgrößen und der sich ergebenden Lärmabstrahlung zu verstehen, wurden Lärmmessungen an einem Modell mit unterschiedlicher Vorflügelspaltbreite durchgeführt. Durch eine systematische Verringerung der Vorflügelspaltbreite bis auf 85% des Ausgangszustands, siehe Abbildung 4.9, konnte eine beträchtliche Lärminderung erreicht werden, die zum großen Teil durch die mit der Spaltverengung verbundene Absenkung der Abströmgeschwindigkeit an der Vorflügelhinterkante verursacht wird. Die gleichzeitig für eine Verengung der Spaltweite berechnete Absenkung des Maximalauftriebsbeiwertes blieb dabei unter 4 % (DLR 2004). Aktuelle technologische Entwicklungen, die den Umströmungslärm reduzieren, sind zum Beispiel die Droop Nose beim A380 und A350 (Abbildung 4.10), sowie die Droop Hinge Konzeption der Landeklappensysteme an der A350.

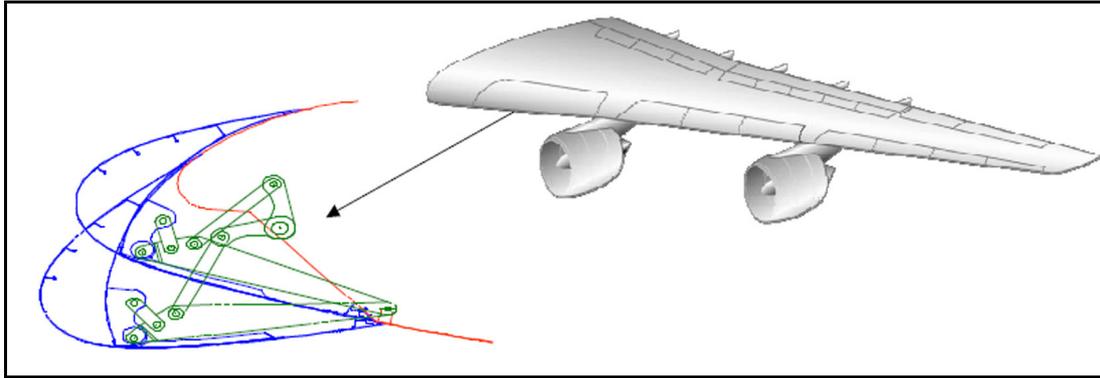


Bild 4.10 Droop Nose Konzept realisiert beim inneren Slat der A380 (**Recksiek 2004**)

Die Verminderung des durch die überströmten Vorflügelhinterkanten verursachten Lärms, kann durch eine Änderung der Kanteneigenschaften erreicht werden, da der Lärm durch die unetige Änderung der Randbedingungen an der Kante entsteht. Die praktische Umsetzung eines stetigen Überganges erfolgt in Form eines in Hauptströmungsrichtung ausgerichteten Bürstenansatzes an der oberen Vorflügelhinterkante. Im Windkanalversuch hat diese Methode eine Minderung des Vorflügelärms um 2 bis 3 dB erzielt (**DLR 2004**). Die physikalischen Hintergründe dieses beachtlichen Lärminderungserfolges sind jedoch noch nicht im Detail geklärt. Da die Mechanismen der Lärminderung durch Bürstenkanten zurzeit noch nicht vollständig erfasst sind, kann das maximale Minderungspotenzial noch nicht angegeben werden (**DLR 2004**).

Die Installation strömungsdurchlässiger Endkanten, in Form von porösen Metallschäumen oder Bürsten hat eine deutliche Lärminderung der Strömungsgeräusche bewirkt, welche durch die Seitenkanten der Landeklappen erzeugt werden (**DLR 2004**).

Weiterhin waren Modifikationen an Rumpfkomponten sehr wirkungsvoll. Die Erzeugung von Längswirbeln mittels kleiner Wirbelgeneratoren eignet sich, um die intensive Tonerzeugung durch überströmte Druckausgleichsöffnungen in der Flügelunterseite vollständig zu unterdrücken (**DLR 2004**).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wirksamkeit verschiedener Technologien zur Lärminderung nachgewiesen werden konnte. In der Summe ist für die nächste Generation konventioneller Flugzeuge eine Minderung des Umströmungslärms um ca. 3 dB realisierbar. Für das Gesamtflugzeug kann diese Minderung im Landeanflug jedoch nur dann voll umgesetzt werden, wenn der Pegel des Triebwerkslärms mindestens 10 dB unter dem des Umströmungslärms liegt (**DLR 2004**). Im Ergebnis sollte bei dominierendem Umströmungsgeräusch im Landeanflug eine Halbierung der am Boden auftreffenden Schallenergie erreicht werden, was einer Minderung von 3 dB entspricht (**DLR 2004**).

4.3.3 Lärmoptimierte Flugverfahren

Eine kurz- bis mittelfristig umsetzbare Maßnahme bilden lärmarme An- und Abflugverfahren. Sie basieren im Wesentlichen auf einer Optimierung von Flughöhe, Triebwerksleistung, Geschwindigkeit und aerodynamischer Konfiguration des Flugzeugs. Nach grundlegender Analyse des DLR wurden mehrere Konzepte lärmarmen Anflugverfahren erarbeitet. Dabei ergab sich im erweiterten Flughafenbereich ein lokales Lärminderungspotential von bis zu 3 dB (**DLR 2004**). Die Flugtauglichkeit der Verfahren wurde durch Flüge mit dem DLR-Versuchsträger ATTAS (Advanced Technologies Transport Aircraft System) demonstriert. Konzepte zur Integration solcher Verfahren in moderne Flugführungssysteme wurden ebenfalls erarbeitet. Beim Abflug wurde ein neues Verfahren namens MONA definiert (**DLR 2004**). Dieses bietet einen Kompromiss zwischen Lärminderung und Zeit- und Treibstoffverbrauch. Es ist mit bestehendem Gerät einsetzbar und durch Einführung einer Zwischenbeschleunigungsphase anpassbar an flughafenspezifische Gegebenheiten.

4.3.4 Lärmoptimierter Flugbetrieb

Weitere Maßnahmen befassen sich mit dem Flugbetrieb. Darunter fällt in erster Linie die Flugroutenplanung und -festlegung. Im Bereich von Flughäfen sind darunter vor allem die An- und Abflugrouten zu verstehen. Die Anflugroutenplanung muss man allerdings stark einschränken, da sie sich beim Anflug nach dem Instrumentenlandesystem (ILS) richtet und daher von einem Leitstrahl und der Landebahnausrichtung bestimmt wird (**DLR 2004**). Planbar hingegen sind die Anflugrouten beim Sichtflug. Dabei hat der Pilot mehrere Möglichkeiten den Flughafen anzufliegen. Es kann angestrebt werden, dass Flugzeuge über stark bebautem Gebiet keine Anflüge durchführen. Bei der Abflugroutenplanung stehen in der Regel verschiedene Routen zur Verfügung. Bei der Festlegung sollten möglichst lärmoptimierte Routen gewählt werden. In diesem Bereich spielt auch das bereits erwähnte Startverfahren eine Rolle. Ein Flughafen kann verlangen, dass Flugzeuge möglichst nur im Steilstart abfliegen, oder einen flacheren Start vorziehen. Von besonderer Bedeutung ist das Thema Nachtflug. Die Anwohner, die in der Nähe von Flughäfen wohnen, sind während der Nacht in besonderem Maße vor den Einwirkungen von Lärm zu schützen. Im Flugverkehr zählt die Zeit von 22.30 Uhr bis 06.00 Uhr zur Nachtzeit. In diesem Zeitraum haben Flughäfen die Möglichkeit Nachtflugbeschränkungen und -verbote zu verhängen. Während bei einer Nachtflugbeschränkung verspätete Flugzeuge und Verkehr im öffentlichen Interesse auch noch nach 22.30 Uhr landen dürfen, ist dies bei einem Nachtflugverbot nicht gestattet (**DLR 2004**).

4.3.5 Ökonomische Ansätze

Als fünfter Punkt der Maßnahmen zur Fluglärminderung sind die ökonomischen Ansätze zu nennen. Dies sind lärm-differenzierte Start- und Landegebühren, deren Höhe sich nach dem Lärm der Flugzeuge richtet. So können Flugplatzbetreiber auf das eingesetzte Fluggerät Einfluss nehmen und den aktiven Lärmschutz begünstigen, da eine höhere Belastung lauter Flugzeuge den Erwerb und den Einsatz leiserer Flugzeugmuster fördert (**ADV 2007**). Um den Flugbetrieb in den Abend- und Morgenstunden zu reduzieren haben Flughäfen die Möglichkeit zusätzliche Aufschläge auf die Start- und Landegebühren zu erheben (**ADV 2007**).

Um die Höhe der Gebühren festzulegen, sind die Flugzeuge in sogenannte Chapterklassen nach dem CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) eingeteilt, die sich am jeweiligen erzeugten Lärm orientieren. Momentan gibt es vier Chapterklassen, wobei Chapter 4 die strengste Klasse darstellt. Flugzeuge, die heutzutage zugelassen werden, müssen den durch die ICAO im Annex 16, des Environmental Protection Volume I, festgesetzten Vorschriften entsprechen (**ICAO 2007a**).

Die ersten strahlangetriebenen Flugzeuge wurden noch nicht bezüglich ihres Lärms gekennzeichnet und klassifiziert. Deswegen werden diese Flugzeuge, wie die Boeing 707 und Douglas DC-8, als NNC (non-noise certified) bezeichnet. Der Ausgangsstandard wird durch Chapter 2 beschrieben, welches im Jahr 1977 eingerichtet wurde. Beispielflugzeuge für diesen Standard sind Flugzeuge, wie die Boeing 727 und die Douglas DC-9. In der weiteren Zeit entwickelte sich das nochmals strengere Chapter 3 und alle neuen zugelassenen Flugzeuge mussten diesem entsprechen. Zu dieser Kategorie gehören die Flugzeugbaumuster Boeing 737-300/400, Boeing 767 und Airbus A319. Im Jahr 2001 wurde im Ausschuss für Luftfahrt und Umwelt der ICAO ein neuer Geräuschstandard mit dem Titel Chapter 4 beschlossen. Chapter 4 ist strenger als Chapter 3. Beginnend mit dem 1. Januar 2006 müssen die Auflagen des Chapters 4 von allen neuen zugelassenen Flugzeugen erfüllt werden, wie auch von einigen Flugzeugen des Chapters 3, für welche eine Recertification verlangt wird (**ICAO 2007a**). Die obere Grenze von Chapter 4 Flugzeugen liegt in der Summe um 10 dB(A) unterhalb des Chapters 3.

Besonders laute Flugzeuge sind in den letzten Jahren kontinuierlich aus dem Luftraum entwickelter Nationen verbannt worden. In den achtziger Jahren war der Fokus auf die NNC Flugzeuge gerichtet. In den neunziger Jahren auf die Flugzeug des Chapters 2. Heutzutage richten sich diese Interessen in Richtung der lautesten Flugzeuge des Chapters 3. Da Beschränkungen dieser Art bedeutende ökonomische Implikationen für die Fluglinien haben können ist das Ziel der ICAO stets einen Kompromiss zwischen allen Interessengruppen zu erreichen und dabei die Fluglinien, die Industrie und die Flughäfen Positionen zu beachten. So drängte im Fall der Chapter 2 Flugzeuge die ICAO 1990 darauf, den Betrieb dieser Flugzeuge nicht ohne die Prüfung anderer Maßnahmen einzuschränken. Die Prüfung ergab eine Grundlage, die es

den Flughäfen erlaubte, ab dem 1. April 1995 Flugzeuge des Chapters 2 zu verbannen. Flugzeugen des Chapters 2 wurde jedoch eine mindest In-Service Zeit von 25 Jahren zugestanden, so dass längst nicht alle fliegenden Flugzeuge direkt von den Regularien betroffen waren. Weiterhin waren die leiseren Widebody Flugzeuge des Chapters 2, welche mit Mantelstromtriebwerken ausgestattet sind, nicht betroffen (**ICAO 2007a**). In der Grenzen der Europäischen Union dürfen Flugzeuge, die lediglich den Anforderungen von Chapter 2 entsprechen, seit dem 01.04.2002 nur noch mit Sondergenehmigung operieren. Flugzeuge des NNC Chapters dürfen schon seit Jahren nur noch mit Ausnahmegenehmigung betrieben werden, z.B. als Regierungsflugzeuge oder aus historischem Interesse (**ADV 2007**). Viele Länder, auch außerhalb der EU, haben mittlerweile Flugzeuge des Chapters 2 die Lande- und Überflugrechte entzogen. Diese Maßnahme hat international zu einer erheblichen Abnahme der Lärmbelastung geführt (**ICAO 2007a**).

Die auf den deutschen Flughäfen angewandten lärm-differenzierten Landegebühren sind auf die oben genannte Einordnung der Flugzeuge in Lärmklassen gemäß ICAO Annex 16 oder Lärm-messungen vor Ort aufgebaut. Die lärm-differenzierten Gebührenstrukturen haben mit dazu beigetragen, dass der Anteil der auf deutschen Flughäfen verkehrenden Jets über 25 t MTOW mit einem Lärmzeugnis gemäß Chapter 3, ICAO-Annex 16, seit 1988 stark angestiegen ist. In Deutschland ist der Chapter 3 Anteil deutlich größer als in anderen Ländern. Chapter 2 Flugzeuge landen nur noch in Ausnahmefällen auf deutschen Flughäfen und der Anteil der modernen Chapter 4 Flugzeuge nimmt stetig zu (**ADV 2007**).

4.4 Fluglärmschutzgesetz

1971 wurde in Deutschland ein Fluglärmschutzgesetz verabschiedet. Dieses Gesetz diente der Steuerung der Bauplanung und sollte Tatbestände für den passiven Lärmschutz erstellen. Der Geltungsbereich erstreckte sich auf Verkehrsflughäfen mit Linienflugbetrieb und Militärflughäfen mit Strahlflugzeugbetrieb (**DFLD 2007**). Der Lärmschutzbereich bezog sich auf den Bereich außerhalb des Flughafengeländes in dem ein äquivalenter Dauerschallpegel von 67 dB(A) überstiegen wurde (**DFLD 2007**). Das Augenmerk des Gesetzes wurde nicht auf die aktive Lärmverminderung, also die Reduzierung an der Quelle, am Flugzeug, gelegt, da diese Art der Änderung in den Bereich des Luftverkehrsrechts fällt. Das Gesetz sah nicht vor, dass es im Bereich von Flughäfen Lärmschutzzonen gibt. In diesen Zonen gab es Baubeschränkungen für besonders schutzwürdige Einrichtungen wie Krankenhäuser, Schulen und Kindergärten (**ADV 2007**). Das Gesetz sah eine Einteilung in zwei Schutzzonen vor. Lärmschutzzone 1 mit einem Grenzwert für den äquivalenten Dauerschallpegel von 75 dB(A) und die Schutzzone 2 mit einem Grenzwert von 67 dB(A) (**DFLD 2007**). Das Fluglärmschutzgesetz sah keine Messung des Lärms, sondern ausschließlich dessen Berechnung für 10 Jahre im Voraus vor.

Als Grundlage wurden die sechs verkehrsreichsten Monate herangezogen und die 100/100 Regelung zur Berechnung angewendet. Eine Flughafenstartbahn kann in der Regel von zwei Seiten benutzt werden. Um die Anwohner nicht zu benachteiligen, wurde bei der Berechnung angenommen, dass der Verkehr des Flughafens zu 100 % aus einer Richtung kommt. Beide Seiten wurden zu 100% einbezogen. In der Realität ist ein Verhältnis von 30% zu 70% der Normalfall (**DFLD 2007**).

4.5 Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes

Der Luftverkehr hat sich in den letzten 35 Jahren drastisch geändert. Auf Grund von technologischen Veränderungen an den Flugzeugen wurden deren Lärmwerte stark verbessert. Heutige Maschinen sind weitaus leiser als frühere (**DFLD 2007**). Somit waren die Grenzwerte aus dem Gesetz von 1971 im Jahre 2005 nicht mehr aktuell und es wurde nötig, sie anzupassen. Zudem hat die Zahl der Flugbewegungen im genannten Zeitraum stark zugenommen. Für die Zukunft wird eine weitere Steigerung der Flugbewegungen prognostiziert. Das führt dazu, dass sich insbesondere Flughafenanwohner von der Häufigkeit des auftretenden Fluglärms immer stärker belästigt fühlen. Das bisherige Gesetz war zwar formell bis 2006 gültig, hat aber faktisch keine Wirkung mehr erzielt. Aus diesen Gründen gab es zwischen 2001 und 2005 drei verschiedene Referentenentwürfe für ein neues Gesetz (**DFLD 2007**).

Obwohl es längst überfällig war, das Gesetz zu novellieren, dauerte es sehr lange, um zu einem Ergebnis im Frühjahr 2007 zu kommen. Ein Grund dafür liegt in der Brisanz des Themas. Die beiden Seiten der Betroffenen lagen in ihren Anforderungen an das neue Gesetz sehr weit auseinander. Während Fluglärmbetroffene deutlich niedrigere Schutzzonengrenzwerte anstrebten, forderte die Luftverkehrsseite eine Festlegung nach Zumutbarkeitswerten und geringere Verschärfungen, um ökonomische Nachteile zu vermeiden. Zudem wollten Betroffene eine Aufnahme von aktiven Lärminderungsmaßnahmen, wie Nachtflugverbote erreichen. Einigkeit herrschte zwischen beiden Seiten nur beim Thema Bauverbote (**DFLD 2007**).

4.6 Ziele der Novellierung

Das neue Fluglärmschutzgesetz bleibt wie sein Vorgänger, auf den passiven Lärmschutz und die Steuerung der Bauplanung ausgerichtet. Daher wird weiterhin darauf verzichtet, Maßnahmen des aktiven Lärmschutzes in das Gesetz aufzunehmen. Ebenso sieht es das Gesetz nicht vor, die betriebliche Steuerung und Lenkung des Flugverkehrs zu verändern. Stattdessen liegen die Schwerpunkte des neuen Gesetzes darin, den Lärmschutz für Fluglärmbetroffenen zu

finanzieren und vor allem in der Nacht zu verbessern. Auf diese Weise sollen die Belastungen für Anwohner reduziert, die Betroffenen vor Gesundheitsschäden geschützt und zukünftige Nutzungskonflikte zwischen den verschiedenen Parteien verhindert werden (**DFLD 2007**). Die Tabelle 4.1 zeigt die verschärften Lärmgrenzwerte des novellierten Fluglärmsgesetzes im Vergleich zu den geltenden Grenzwerten für den Straßen und Schienenverkehr.

Tabelle 4.1 Tabelle der aktuellen Lärmgrenzwerte (**ADV 2007a**)

Verkehrsträger	Bestand		Neu-/Ausbau	
	Tagschutz	Nachtschutz	Tagschutz	Nachtschutz
Luftverkehr lt. FluglärmschutzG	$L_{eq3} = 65 \text{ dB(A)}$	$L_{eq3} = 55 \text{ dB(A)}$ $L_{max} = 6 \times 57 \text{ dB(A)}$ innen	$L_{eq3} = 60 \text{ dB(A)}$	$L_{eq3} = 50 \text{ dB(A)}$ $L_{max} = 6 \times 53 \text{ dB(A)}$ innen
Straßen- und Schienenverkehr	$L_{eq3} = 70 \text{ dB(A)}$ Kein Rechtsanspruch!	$L_{eq3} = 60 \text{ dB(A)}$ Kein Rechtsanspruch!	$L_{eq3} = 64 \text{ dB(A)}$ (16. BImSchV, Dorf- und Mischgebiete)	$L_{eq3} = 54 \text{ dB(A)}$ (16. BImSchV, Dorf- und Mischgebiete)

Es wurde eine zusätzliche Nachtschutzzone eingeführt. In dieser ist die Einführung eines Häufigkeits-Maximalpegel Kriterium zu erkennen. Zudem unterscheidet das neue Gesetz zwischen Bestandsflughäfen und Neu- bzw. Ausbauflyghäfen und sieht dort nochmals verschärfte Grenzwerte vor. Außerdem differenziert das neue Gesetz auch zwischen zivilen und militärischen Flughäfen, da an letzteren in der Regel nur zu normalen Arbeitszeiten geflogen wird und nicht vermehrt in den frühen morgen und späten Abendstunden.

Ebenfalls neu ist, dass den Anwohnern in der Tag-Schutzzone 1 und in der Nachtschutzzone Schallschutzmaßnahmen vom Flughafen erstattet werden müssen. Im Falle eines Flughafen Neu- bzw. Ausbaus steht den Anwohnern der Tag-Schutzzone 1 sogar eine Entschädigung für die Beeinträchtigung des Außenwohnbereichs zu (**DFLD 2007**). Die Siedlungsbeschränkungen hingegen sind eher moderat ausgefallen. Zudem wurde das Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Lärmschutzbereiche an die Verfahren für andere Verkehrslärmquellen angepasst (**DFLD 2007**). Die Folgen des neuen Gesetzes sind erhöhte Kosten für die Flughafenbetreiber, da sie zum zusätzlichen Schallschutz verpflichtet sind. Über die Höhe lässt sich aber derzeit noch keine genaue Aussage treffen, da an einigen Flughäfen auf freiwilliger Basis schon umfangreiche Schallschutzmaßnahmen getroffen wurden (**Airport Hamburg 2007**). Die Siedlungsbeschränkungen für besonders schutzbedürftige Einrichtungen werden durch eine Ausdehnung der Lärmschutzzonen räumlich ausgeweitet. Das Gesetz soll zu einer Verbesserung der Rechts- und Planungssicherheit bei Neu- bzw. Ausbauflyghäfen führen (**DFLD 2007**).

5 Umwelteinfluss von Schadstoffemissionen im Nahbereich von Flughäfen

In diesem Kapitel wird auf die Schadstoffemissionen im Nahbereich von Flughäfen eingegangen werden. Die Luftverschmutzung an Flughäfen resultiert großteils aus den zahlreichen An- und Abflügen (VCD 2006). Hinzukommen die Kfz-Emissionen für die Flugzeugabfertigung, stationäre Quellen wie energietechnische Anlagen und landseitiger Verkehr bzw. Verkehr der An- und Abreisenden. Die Servicegeräte am Boden sowie der sonstige Kfz-Verkehr liefern einen entscheidenden Beitrag zu den gemessenen Partikelmissionen (Feinstaub und Stickoxide) (ADV 2007). Weiterhin sind für die Partikelbelastung unter anderem auch der Bremsen- und Reifenabrieb der Flugzeuge beim Landen und Starten verantwortlich (Heinke 2006). Probleme bereiten im Einzelfall auch der hohe Energieverbrauch beim Betrieb des Flughafens, die Boden und Gewässerbelastung sowie der Flächenverbrauch. (VCD 2006).

Seit den 70er Jahren werden auf Flugplätzen und in ihrer Umgebung zahlreiche Luftqualitätsuntersuchungen durchgeführt. Auf mehreren deutschen Flughäfen sind permanente Messstationen installiert, die kontinuierlich über die lufthygienische Situation vor Ort Auskunft geben. Neben den "klassischen" Luftschadstoffen CO₂, HC, NO_x und SO₂ können weitere Spurengase und Partikel erfasst werden. Da sich gasförmige Schadstoffe nach ihrer Freisetzung aus verschiedenen Quellen in der Luft vermischen, kann bei Luftqualitätsmessungen nur die Gesamtbelastung durch den jeweiligen Schadstoff erfasst werden. In den ermittelten Schadstoffkonzentrationen sind daher neben den durch den Flugbetrieb verursachten Anteilen auch die Anteile des Bodenverkehrs sowie von außerhalb auf das Flughafenareal verfrachtete Belastungen enthalten (ADV 2007).

In Bild 5.1 ist ein Messcontainer für die Luftschadstoffmessung am Frankfurter Flughafen abgebildet. Gemessen werden folgende Parameter: Stickoxide, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Ozon, Staubinhaltsstoffe (Schwermetalle), Staub (PM₁₀), Aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzol oder Toluol) und meteorologische Parameter (ADV 2007).

Die Luftqualitätsmessungen geben jedoch nur Auskunft über die Belastungssituation am Messort. Um Informationen darüber zu erhalten, welchen Anteil bestimmte Verursacher an der Gesamtbelastung einer Region haben, werden Rechenmodelle eingesetzt. Seit November 2002 nutzen zahlreiche Flughäfen, darunter auch Zürich Airport, das Ausbreitungsmodell LASPORT (Lagrange Simulation Aérosol Transport for Airports), das im Auftrag der ADV entwickelt wurde. Dieses Modell ist das modernste seiner Art, das auf dem deutschen Ausbreitungsmodell LASAT (Lagrange Simulation Aérosol Transport) basiert (ADV 2007). Ein Berechnungsergebnis ist in Anhang A zu finden.



Bild 5.1 Luftmesscontainer SOMMI 1 am Frankfurter Flughafen (Heinke 2006)

In Bodennähe haben die emittierten Stickoxide zwar keine Klimawirksamkeit, als Beschleuniger für Ozon stellen sie jedoch ein Risiko für die menschliche Gesundheit dar, da die durch sie erhöhte Ozonkonzentration zu Atemwegserkrankungen führen kann (Schumann 2000). Es lässt sich aber auch sagen, dass der globale Flugverkehr nicht für eine wesentliche Ozonproduktion in Bodennähe verantwortlich ist, sondern andere Verkehrsträger (Schumann 1999). Außerdem spielt der Abbau von Ozon durch Methan in Bodennähe, anders als im Reiseflug, keine Rolle (Schumann 1999). Darüber hinaus können Stickoxide zu einer Versauerung der angrenzenden Böden führen. Diese Gefahr besteht insbesondere in der Umgebung von Flughäfen. Dies ist auf langsame Vermischungsprozesse, niedrigere Temperaturen und geringere Hintergrundverunreinigungen durch andere Quellen zurückzuführen (Schumann 2000). Insgesamt kommt eine vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie zu dem Ergebnis, dass die betrachteten Flughäfen jeweils weniger als 10% zur Gesamtbelastung einer Region beitragen, wobei die Bedeutung von NO_x auf die lokale Luftqualität hervorzuheben ist (UBA 2007a). Von den flughafeninduzierten Schadstoffen wird wiederum nur ein Drittel in den Flugzeugtriebwerken erzeugt. Der höchste Einzelanteil entfällt auf den landseitigen Pkw-Zubringerverkehr (UBA 2007a).

5.1 Emissionsquellen

Wie schon in der Einleitung erläutert, gibt es verschiedene Schadstoffemissionsquellen beim Betrieb von Flughäfen. Diese sollen in diesem Kapitel weiterführend erläutert werden.

Zur Ermittlung der in Bodennähe emittierten Triebwerks- und APU-Emissionen wurde international der so genannte LTO (Landing and Take Off) Zyklus eingeführt, siehe Abbildung 5.2. Dieser umfasst vier Phasen, den Anflug (inkl. Landung) auf den Flughafen (Approach), das Rollen der Luftfahrzeuge von der Landebahn zur Abfertigungsposition (Taxi in), das Rollen der Luftfahrzeuge von der Abfertigungsposition zur Startbahn (Taxi out) und den Abflug vom Flughafen sowie den Steigflug (Take Off und Climb) unterhalb der Grenzhöhe von 3.000 Fuß. Während dieser verschiedenen Flugphasen kommt es zur Emissionsabgabe, die dem Nahbereich zuzurechnen sind (**Heinke 2006**).

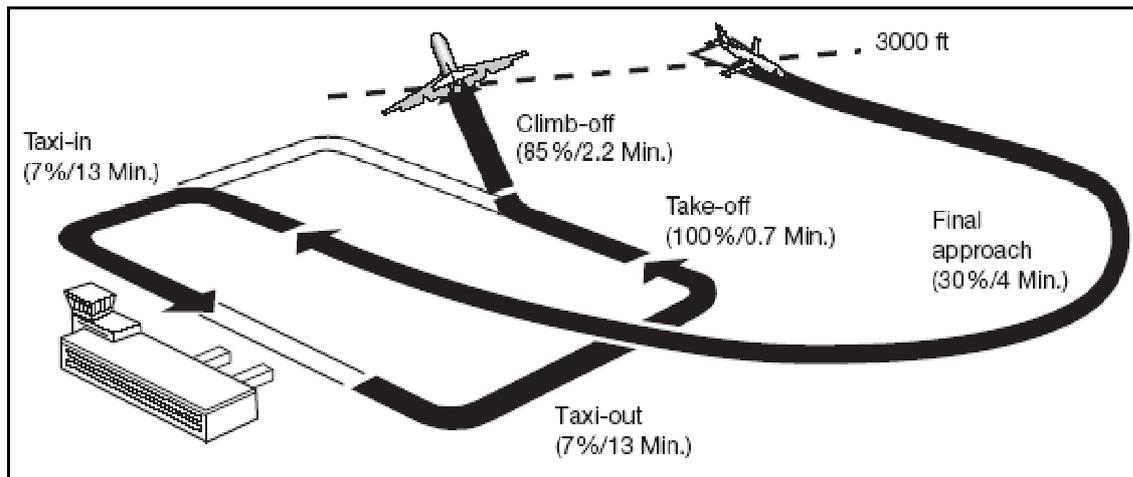


Bild 5.2 ICAO Referenz-LTO-Zyklus mit Schub und Dauer Angabe (**Unique 2007**)

Weiterhin werden Wartezeiten in der Luft (Holding) und am Boden in den LTO Zyklus mit einbezogen (**UBA 2007a**). Stahltriebwerke, eingeschlossen der APU, von Flugzeugen verbrennen Kerosin zusammen mit Luft. Kerosin besteht aus zu 85,5% Kohlenstoff, 14% Wasserstoff, 0,05% Schwefel und noch geringe Mengen an Zusatzstoffen (**Heinke 2006**). Der Verbrennungsvorgang und die Verbrennungsprodukte von einem 1 kg sind in Anhang B anschaulich dargestellt.

In Abbildung 5.3 sind verschiedene Triebwerksemissionen in der Abhängigkeit von der Flugphase im LTO Zyklus in Tonnen pro Jahr des Frankfurter Flughafens dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass die während des LTO Zyklus verursachten Emissionen teilweise nicht unerheblich sind. Besonders die Rollvorgänge stechen mit ihren HC und CO Emissionen hervor. Zu beachten ist auch, dass der Startvorgang (Take-off) eine hohe Nox Emission aufweist.

Neben dem Betrieb des Flugzeuges an sich 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. Hierbei spielen folgende Emissionsquellen eine Rolle (**UBA 2007a**):

- 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

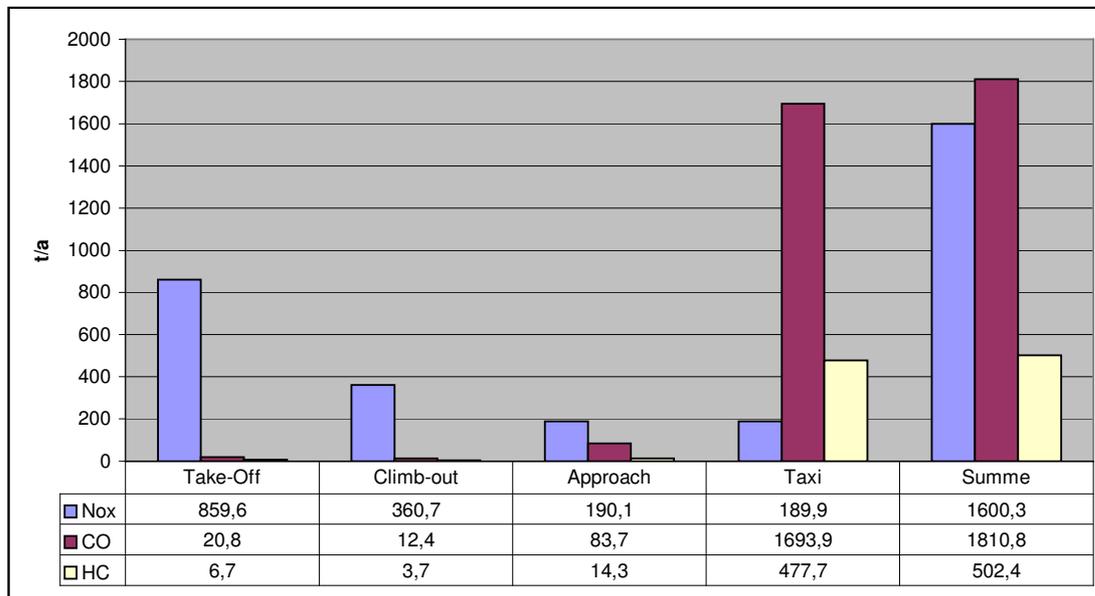


Bild 5.3 Eigene Darstellung der Emissionen während des LTO Zyklus auf dem Flughafen Frankfurt/Main (Kühl 2000)

Die hinzukommenden Emissionen durch den landseitigen Verkehr, Kraftfahrzeugverkehr durch Passagiere und ihre Begleiter, Besucher, Beschäftigte, Lieferanten sowie den Lieferbetrieb für das Fracht- und Postaufkommen, sind nicht zu unterschätzen. 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 gefördert werden (UBA 2007a).

5.2 Auswirkungen der Emissionen

Zu den Schadstoffen, die Flugzeugturbinen, in hohem Maße aber auch Energiegewinnungsanlagen, Fahrzeuge zur Abwicklung des Flugbetriebs sowie Fahrzeuge der an- und abreisenden Passagiere, ausstoßen, gehören in erster Linie Feinstaub und Stickoxide (VCD 2006). Luftschadstoffe haben verschiedene Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen und das Ökosystem.

So werden Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe, kurz PAK, in der Nahrungskette angereichert, da sie aus stabilen Einzelverbindungen bestehen. Kohlenwasserstoffe gelten als

krebserregend. Auch Schwermetalle werden in der Nahrungskette angereichert, wobei sie als Spurenmetalle zum Teil lebensnotwendig, z.B. Kupfer, Zink, Kobalt, sind. In höheren Konzentrationen sind sie wiederum gesundheitsschädlich und zum Teil krebserregend, wie z.B. Blei, Cadmium, Quecksilber. Schwefelverbindungen tragen zur Versauerung des Bodens bei und schädigen so indirekt die Vegetation. Ozon schädigt Pflanzen direkt und führt beim Menschen zu Reizung der Schleimhäute und Lunge. Weiterhin tragen die emittierten Stickstoffverbindungen, z.B. Ammoniak, zur Überdüngung des Bodens bei. (**München Airport 2007**).

Das stark wachsende Verkehrsaufkommen an Flughäfen erhöht auch den Anteil der Luftschadstoffe in deren Umfeld drastisch. Schon heute werden die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte immer öfter erreicht. Am Flughafen Frankfurt/Main wurde der zulässige Tagesmittelwert für Feinstaub von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis Mitte des Jahres 2005 bereits zehnmal überschritten. 1,35 Überschreitungen pro Jahr sind erlaubt (**VCD 2006**). In London-Heathrow mussten Anfang 2005 die Pläne für den Bau einer vierten Landebahn wegen Nichteinhaltung von Stickoxidgrenzwerten verschoben werden (**VCD 2006**). So könnte es nur eine Frage der Zeit sein, bis auch an anderen Flughäfen Pläne zur Ausweitung von Flugbewegungen an Schadstoffgrenzwerten scheitern werden (**VCD 2006**).

5.3 Maßnahmen zur Reduzierung der Belastung

Um eine Reduzierung der Schadstoffbelastung zu erreichen, können verschiedene Maßnahmen durchgeführt werden. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln weitergehend erläutert.

Im Bereich des Flugzeugbetriebes weisen schadstoffoptimierte An- und Abflugverfahren, sowie Strategien zur Vermeidung von Wartezeiten ein hohes Potenzial auf (**UBA 2007a**). Auch das Schleppen von Flugzeugen anstatt des Rollens mittels der Triebwerke und die Minderung des Schwefelgehalts im Kerosin können zur Schadstoffreduzierung beitragen. Im Bereich der Luftfahrzeugabfertigung, ist eine Substitution des APU-Betriebes durch eine bodenseitige Energieversorgung sinnvoll (**UBA 2007a**). Aktuell investieren die Flughäfen in moderne Energieerzeugungstechnik (Blockheizkraftwerke) und in emissionsarme Vorfeldfahrzeuge um die Luftqualität weiter zu verbessern (**ADV 2007**). So wurde am Flughafen Hamburg damit begonnen, den flughafeneigenen Fuhrpark auf Erdgas und Wasserstoff umzustellen (**ADV 2007**). Als eine weitere effektive Maßnahme zur Verringerung der flughafeninduzierten Schadstoffbelastung sei die optimale Anbindung des Flughafens durch öffentliche Verkehrsmittel genannt, da der Zubringerverkehr einen nennbaren Teil der Belastung ausmacht (**ADV 2007**). Das öffentliche Verkehrsnetz kann durch sogenannte Job-Tickets, „Rail and Fly“ und Car Sharing Angebote gefördert und unterstützt werden (**UBA 2007a**). Zusätz-

lich gilt es Betankungsemissionen, Emissionen durch Enteisung und Emissionen aus Klimaanlagen in der Zukunft zu verringern (**UBA 2007a**).

Die Einführung von Emissionsgrenzwerten für Triebwerke stellt eine klassische Möglichkeit dar. Diese Grenzwerte gelten bei der Zulassung neuer Triebwerktypen. Alte Triebwerke müssen entsprechend ersetzt werden. Grenzwerte sind somit, sowohl für die lokale Luftqualität als auch generell für den Ausstoß von Treibhausgasen in der Luft von Bedeutung. Die Grenzwerte für Abgasemissionen werden auf internationaler Ebene durch die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation ICAO festgelegt. Da bereits heute eine Vielzahl von Triebwerken den gültigen Grenzwert für Stickoxide deutlich unterschreitet, besteht effektiv kein wirklicher Anreiz für den Einsatz neuer Technologien (**VCD 2006**). In der Zukunft ist bei der Triebwerkstechnologie mit einem deutlichen Reduktionspotential hinsichtlich der Stickoxidemissionen zu rechnen. Um technisch mögliche Verbesserungen zur Luftreinhaltung schneller voranzutreiben, rät der VCD dringend zu einer Verschärfung der derzeit gültigen Grenzwerte (**VCD 2006**).

Ein weiteres anerkanntes Instrument, das zu einer Verbesserung der Luftqualität an Flughäfen beitragen kann, sind emissionsbezogene Landeentgelte. In einem solchen Verfahren, das in Schweden und der Schweiz Anwendung findet, werden die Flugzeuge gemäß ihrer Triebwerksemissionen in Klassen eingeteilt und die Landegebühren entsprechend gestaffelt. Die Höhe der Entgelte schafft Anreize für den Einsatz neuer, umweltschonender Technologien. Vorausschauend eingesetzt, können emissionsbezogene Landeentgelte Flughäfen vor einer Überschreitung von Schadstoffgrenzwerten retten, welche aufgrund des raschen Wachstums im Flugverkehr sonst nicht eingehalten werden könnten (**VCD 2006**).

Die Substitution des APU-Betriebes an Flughäfen durch den Einsatz stationärer Bodenstromversorgung auf allen Abfertigungspositionen sowie der stationären Klimatisierung am Gate kann eine Reduzierung der gesamten flughafeninduzierten NO_x-Emissionen um 6% bis 7% bewirken (**UBA 2007a**).

Einzelne Flughäfen haben freiwillig Umweltmanagementsysteme zur Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes eingeführt. Unter diesen Bereich fallen neben der Luftreinhaltung auch u.a. der Lärmschutz, Gewässerschutz, Energiebewirtschaftung und Abfallmanagement. Diese Flughäfen, wie unter anderen München, Hamburg und Bremen, geben sich konkrete und überprüfbare Ziele vor, welche durch einen unabhängigen, staatlichen zugelassenen Umweltgutachter auf Inhalt und Umsetzung überprüft werden (**VCD 2006**).

5.3.1 Flugzeugschlepp

Das Konzept der Bundesregierung „Luftverkehr und Umwelt“ mit dem Ziel, Ökologie und Ökonomie weitgehend in Einklang zu bringen, sowie der Bericht des Luftfahrtbundesamtes 2007 (**UBA 2007a**) enthalten den Hinweis auf die Möglichkeit eines umfassend organisierten Flugzeugschleppsystems. Dieses mögliche neue System soll hier etwas genauer betrachtet werden.

Der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen während der Rollvorgänge von Verkehrsflugzeugen mit Strahltrieb liegen, bezogen auf den Reiseflug (Cruise), zwar nur im Prozentbereich, siehe Abbildung 5.4, erreichen jedoch für den Flughafenbereich in der Summe der Start- und Landevorgänge beachtliche Werte, siehe Abbildung 5.3, da die Rollvorgänge (Taxi) von Luftfahrzeugen bedeutende Zeitanteile an den gesamten Start- und Landevorgängen haben (**Kühl 2000**).

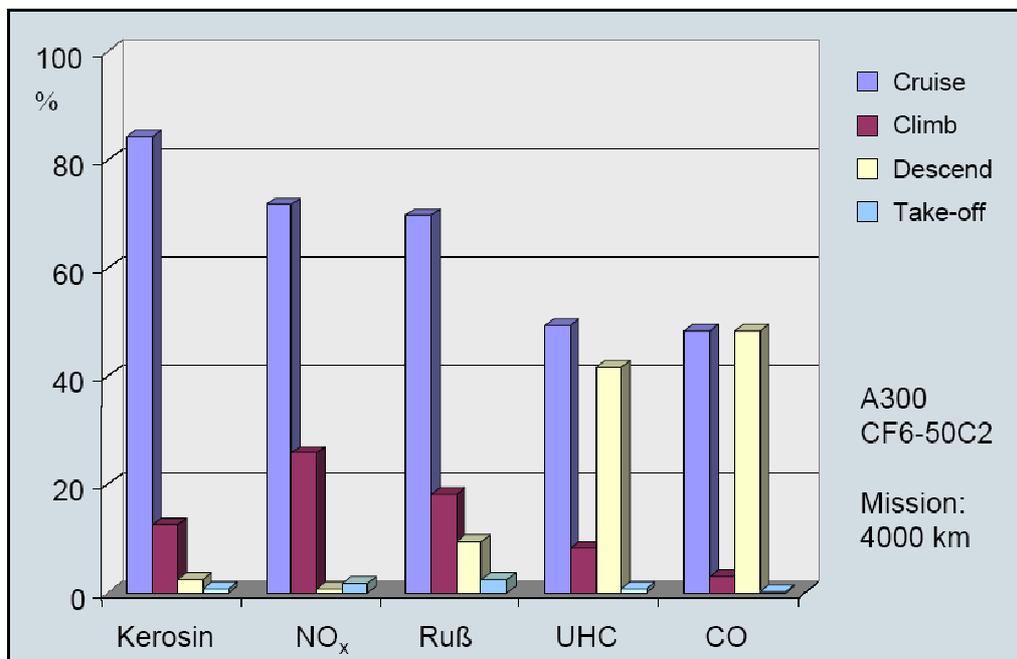


Bild 5.4 Verteilung der Emissionen über eine Flugmission (4000km) am Beispiel eines A300, (**Donnerhack 2005**)

Legt man den LTO-Zyklus nach ICAO zugrunde, wird die mittlere Rollzeit von strahlgetriebenen Verkehrsflugzeugen mit 26 Minuten bewertet. Die Vorgänge des Starts (0,7 min.), des Aufstiegs bis 3000 ft (2,2 min.) und des Landeanflugs aus 3000 ft (4 min.) haben in diesem Zyklus dagegen eine mittlere Gesamtzeit von 6,9 Minuten (20,79% der Zeit des LTO-Zyklus) (**Kühl 2000**). Siehe auch Abbildung 7.2 zur Veranschaulichung.

Der Brennstoffverbrauch der Strahltriebwerke im Leelauf oder Ground-Idle-Betrieb liegt bei den Rollvorgängen gegenüber den anderen LTO-Teilzyklen bei etwa 8 bis 9% (**Kühl 2000**). Da die Treibwerke während der Rollvorgänge auf der Optimierung für den Reiseflug unter

geringer Last und dadurch die Teilwirkungsgrade der Triebwerkskomponenten und auch der Wirkungsgrad des thermodynamischen Prozesses gering sind, kommt es zu ungünstigen, hohen Abgasemissionswerten, insbesondere von CO₂ (**Bräunling 2007**). Vielfach wird auch ein Teil der Leistung während des Rollvorgangs weggebremst (**Kühl 2000**). Weiterhin sind während der Rollvorgänge in der Regel alle Triebwerke in Betrieb, auch bei drei- oder vierstrahligen Flugzeugen. Dieser Umstand resultiert aus den Vorschriften einiger Luftverkehrsgesellschaften, dass die Triebwerke vor dem Start „Warmlaufen“ sollen.

Im Regelfall liegt die Taxi-out Zeit vor dem Start wesentlich höher als die Taxi-in Zeiten nach der Landung. Nach Angaben der Flughafenverwaltung München lagen im Jahre 1997 dort je nach Flugzeugtyp die Taxi-in Zeiten bei 5 bis 6 Minuten, die Taxi-out Zeiten bei 12 bis 14 Minuten (**Kühl 2000**). Diese Verhältnisse liegen bei anderen Flughäfen ähnlich. Bezüglich der Schadstoffemissionen kann man somit davon ausgehen, dass das größte Schadstoffeinsparpotential beim Rollvorgang vor dem Start liegt. Außerdem ist der Einsatz von Schleppfahrzeugen bei Rollvorgängen nach der Landung nicht sinnvoll, da dies eine Unterbrechung des Taxi-in Vorgangs in einer sicherheitskritischen Zone der Landebahn mit erheblichen Zeitverzögerungen bedeuten würde. Das Flugzeug muss aus Organisationsgründen die Landebahn möglichst schnell frei machen und auf kürzestem Weg seine Parkposition erreichen (**Kühl 2000**).

Untersuchungen zum Schleppsystem haben gezeigt, dass sich die Taxizeit gegenüber der mittleren Taxizeit von 18 Minuten, 25 Minuten verlängert. Mangelnde Möglichkeiten der praktischen Umsetzung führten dazu, dass die Untersuchungen zum Schleppsystem nicht mehr weiterverfolgt wurden (**Kühl 2000**).

Die meisten Flughäfen sind schon von der Konzeption her so angelegt, dass sie den Rollbewegungen Rechnung tragen. So ist die Lage der Abfertigungspositionen, z.B. an Abfertigungssternen, so gewählt, dass zum Startbahnkopf der Hauptstartrichtung (je nach Windrichtung) nur kurze Rollwege erforderlich sind. Bei den prozentual wenigen ungünstigen Windrichtungen nimmt man die längeren Rollwege in Kauf (**Kühl 2000**). Parallele Start- und Landebahnen, wie z.B. in München, sind in Längsrichtung versetzt, so dass je nach Windrichtung die eine oder die andere Startbahn den kurzen Rollweg erlaubt, siehe Abbildung 5.5 (**Kühl 2000**).



Bild 5.5 Anlage des Flughafens München mit kurzen Rollwegen zur Startbahn 08L bzw. 26L (Google Earth 2007)

Abschließend lassen sich die bisherigen Untersuchungen wie folgt zusammenfassen (**Kühl 2000**):

- Das Schleppen von Verkehrsflugzeugen birgt gegenüber dem Rollvorgang unter Eigenantrieb nennenswerte Einsparpotentiale bezüglich des Brennstoffverbrauchs und der Schadstoffzeugung im Flugvorfeld und im Flughafennahbereich.
- Die technische Durchführung von Schleppvorgängen ist möglich, wäre jedoch nur bei Taxiout-Bewegungen sinnvoll.
- Die organisatorische und operationelle Durchführung von Schleppvorgängen erweist sich als schwierig, weil sie einen starken Eingriff in die Abläufe der Rollbewegungen (z.B. Verlängerung der Rollzeiten) bedeutet.
- Die Durchführung von Schleppvorgängen erfordern als Voraussetzung Investitionen und Raumplanungsmöglichkeiten (z.B. Einrichtung von Absetzonen und Schlepper-Rückfahrwegen, Anschaffung von Schleppern, Ausbildung des Personals, Klärung juristischer Fragen).

Möglichkeiten, die Brennstoffverbrauch und Schadstoffproduktion verbessern können, liegen heute sicherlich in Teilbereichen. Zu nennen sind (**Kühl 2000**):

- Konsequente Durchführung von Maintenance-Schlepp
- Freiwillige Schleppvorgänge bei Cargo-Flugzeugen in ruhigeren Tageszeiten und besonders in der Nacht
- Durchführung der Rollvorgänge mit zwei statt vier Triebwerken

5.3.2 Brennstoffzelle als APU Ersatz

Das Hilfstriebwerk, die APU, ist eine sehr uneffiziente Maschine, da sie relativ viel Kraftstoff benötigt, um am Boden das Flugzeug mit Energie zu versorgen (**Bräunling 2007**). An einigen Flughäfen ist es wegen Lärmschutzgründen untersagt die APU zu benutzen (**Airport Hamburg 2005**). Aber auch die Schadstoffemissionen sollten nicht außer Acht gelassen werden. Eine Lösung, neben der Möglichkeit die Versorgung bodenbasiert durchzuführen, ist, die APU langfristig gesehen durch eine Brennstoffzelle zu ersetzen.

Im Juni 2007 wurde der erste Schritt in diese Richtung vom DLR vollzogen. Das DLR eigene Forschungsflugzeug ATRA (Advanced Technologies Research Aircraft) wurde zu Testzwecken mit einer Brennstoffzelle ausgestattet, welche bisher nur die Funktion der Stauluftturbine (Ram-Air-Turbine) übernehmen kann, jedoch ist dies ein bedeutender Schritt (**f-cell 2007**). Die Brennstoffzelle liefert eine Stunde lang 20 Kilowatt Strom, dies entspricht genau der Leistung, die zum Betrieb des Notstromaggregats benötigt wird, wobei die Anlage auch Lastspitzen bis zu 40 Kilowatt abdecken kann (**f-cell 2007**). Das „Mini-Kraftwerk“ verfügt über einen Wasserstoff- und einen Sauerstofftank und produziert Gleichstrom. Diese Art der Stromerzeugung ist total CO₂, bzw. Schadstoffemission neutral, weist einem hohen Wirkungsgrad auf und ist sehr leise. Einzige Produkte der Stromerzeugung sind Strom und Wasser. Die Brennstoffzelle versorgt ein Hydrauliksystem mit Strom und übernimmt die Funktion der Ram Air Turbine. Da die Brennstoffzelle eine gleichbleibende Leistung unabhängig von der Flugeschwindigkeit und der Flughöhe liefert, ergibt sich ein zusätzlicher Vorteil für den Betrieb des Flugzeugs (**f-cell 2007**).

Es wurden die für den Flugbetrieb geforderten Qualifikationstests und eine sehr aufwändige Qualifizierung durchgeführt. Außerdem wurde ein Sicherheitskonzept entwickelt, das für alle denkbaren Fehlerfälle, einschließlich Wasserstoffleckagen, die notwendige Sicherheit für den zivilen Flugbetrieb nachweist. Mit den erfolgreich absolvierten Qualifikationstests konnte gezeigt werden, dass die Brennstoffzellentechnologie qualifizierbar ist. Sie erfüllt die geforderten Sicherheitsstandards und hat die nachgewiesene technische Reife, welche die Voraussetzung für eine Serienentwicklung ist. Während der weiteren Tests ist es geplant die Energie der Brennstoffzelle auch zur Versorgung des Flugzeugs am Boden bereit zustellen, was einen weiteren Schritt darstellt, um die APU eines Tages ganz zu ersetzen (**f-cell 2007**).

Abschließend ist zu bemerken, dass die Erprobung der Brennstoffzelle ein erster Schritt in Richtung eines emissionsarmen Flugzeugs ist. Das selbstgesetzte Ziel der Forscher ist, dass bis 2020 die neu auf den Markt kommenden Flugzeuge 50% weniger CO₂ und 80% weniger Stickoxide im Vergleich zum Emissionsniveau des Jahres 2000 produzieren, hierzu kann die Brennstoffzelle einen wichtigen Beitrag leisten.

6 Messverfahren zur Quantifizierung der Umweltbelastungen

Wie schon im Kapitel 4 genannt, werden im Einflussbereich von Flughäfen Lärmmessungen und Schadstoffmessungen auf unterschiedlichste Weise vorgenommen. Neben den Lufthygieneuntersuchungen, werden zahlreiche Pflanzen- und Bodenuntersuchungen, sowie ein Biomonitoring durchgeführt. Auf diese verschiedenen Verfahren soll in diesem Kapitel eingegangen werden.

6.1 Lärmmessung

Das Messverfahren wird detailliert im Annex 16 der ICAO beschrieben und gilt einheitlich sowohl für Chapter 3 als auch Chapter 4 Strahlflugzeuge. In Deutschland werden alle Lärmmessungen in Übereinstimmung mit den Methoden von Annex 16 durchgeführt (**UBA 2006a**).

Das Lärmmessverfahren sieht jeweils für den Startüberflug, die seitliche Lärmabstrahlung beim Start und beim Landeanflug einen eigenen Messpunkt vor. Beim Startüberflug befindet sich der Lärmmesspunkt in einer Entfernung von 6.500 m vom Startrollpunkt auf der verlängerten Mittellinie der Startbahn (**ADV 2007**). Der seitliche Lärmmesspunkt wird dort gewählt, wo während des Starts auf einer Linie im Abstand von 450 m parallel zur Startbahnachse der Lärmpegel des Flugzeugs ein Maximum erreicht (**ADV 2007**). Als Landeanflug-Lärmmesspunkt wurde ein Punkt definiert, der 120 m senkrecht unterhalb eines Anflug-Gleitpfades von 3° auf der verlängerten Mittellinie der Landebahn liegt (**ADV 2007**). Im ebenen Gelände entspricht diese Festlegung einer Entfernung von 2.000 m vor der Landebahnschwelle (**UBA 2006a**). Hierbei werden für alle Messungen folgende Referenzbedingungen festgelegt. Eine Temperatur von 25°C, ein Druck von 1013,25 hPa bzw. 1,013 bar und eine relative Luftfeuchtigkeit von 70% (**UBA 2006a**). Abbildung 6.1 stellt den Messaufbau anschaulich dar.

Aus den ermittelten Messwerten an den Messpunkten werden dann die Lärmwerte errechnet. Die Formeln zur Ermittlung der Lärmwerte wurden so gestaltet, dass eine Abhängigkeit von der höchstzulässigen Startmasse des jeweils betrachteten Flugzeugs gegeben ist (**ADV 2007**). Dadurch gelten für schwerere Flugzeuge höhere Grenzwerte als für leichtere Maschinen. Außerdem wird beim Startüberflug zusätzlich nach der Anzahl der Triebwerke unterschieden. Seit der Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes, enthält das Luftverkehrsgesetz auch eine verbindliche Regelung, nach der die im Fluglärmschutzgesetz für neu- und auszubauende

Flughäfen festgeschriebenen Lärmwerte im Zuge von Genehmigungs- und Planfeststellungsverfahren zu berücksichtigen sind (ADV 2007).

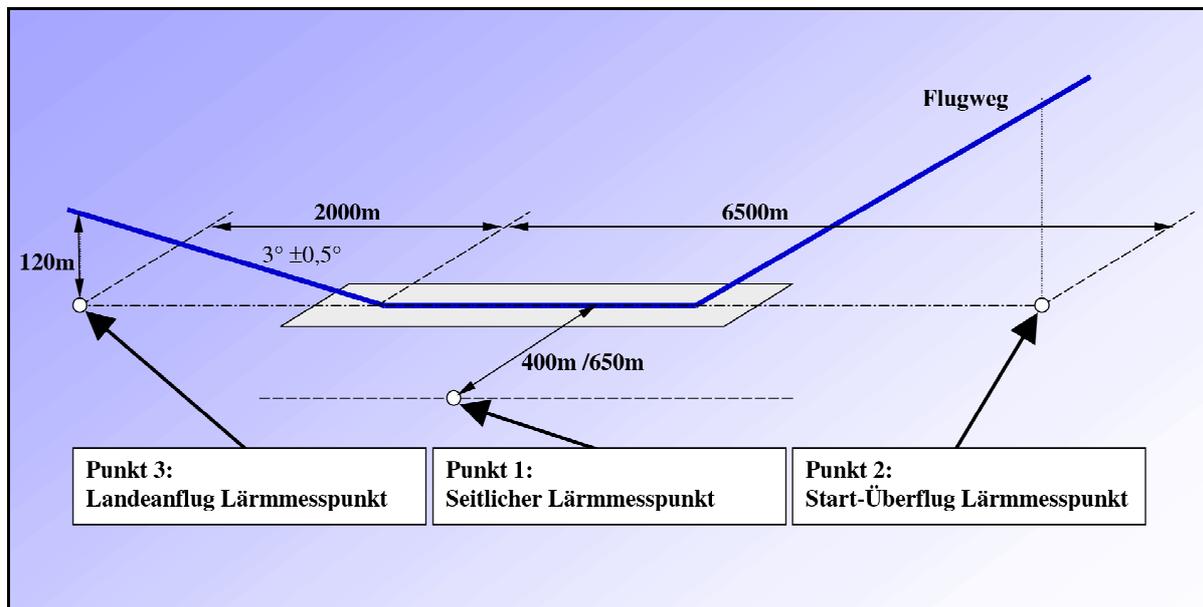


Bild 6.1 Darstellung der Lärmmesspunkte (Schmid 2004)

6.2 Schadstoffmessung

Wie schon in Kapitel 5 beschrieben, werden an den meisten Flughäfen Lufthygieneuntersuchungen, die zur Überprüfung der Luftqualität dienen, durchgeführt. Neben diesen Messungen werden weitergehend Pflanzen- und Bodenuntersuchungen (passives Biomonitoring) durchgeführt. Außerdem wird ein aktives Biomonitoring durchgeführt.

Unter dem Begriff Biomonitoring, bzw. Bioindikation, wird die Verwendung von Organismen oder Organismengemeinschaften verstanden, deren Lebensfunktionen sich mit bestimmten Umweltfaktoren so eng in Beziehung setzen lassen, dass sich Rückschlüsse auf diese Umweltfaktoren möglich sind (ADV 2007). Man unterscheidet dabei aktives und passives Biomonitoring. Beim passiven Biomonitoring werden Organismen an ihrem natürlichen Standort untersucht. Zum Beispiel werden von Wiesen Proben genommen und im Labor auf Schadstoffe untersucht. Aktives Biomonitoring hingegen verwendet standardisierte Bio-Monitore (München Airport 2007). Hierbei eignet sich Grünkohl zum Nachweis von Kohlenwasserstoffen, Tabak zum Nachweis der Schädigung von Ozon und Weidegras zum Nachweis von Schwermetallen (ADV 2007). Die Pflanzen werden unter gleichartigen Bedingungen angezchtet und in genormten Kulturen in dem zu untersuchenden Gebiet aufgestellt. Gegenüber dem passiven Biomonitoring wird mit der aktiven Methode die aktuelle Luftschadstoffsituation

on gemessen. Vorbelastungen wie zum Beispiel des Bodens, werden dabei ausgeschlossen (**München Airport 2007**).

Grünkohl, welcher ein Vertreter von Nahrungspflanzen für den Menschen ist, wird gerne verwendet, weil er Luftschadstoffe besonders gut anreichern kann. Gemäß dem VDI-Verfahren werden die frostresistenten Grünkohlpflanzen in Kulturtöpfen für einen Zeitraum von 8 Wochen auf 1,50 m Höhe im Freiland aufgestellt (**München Airport 2007**). Danach werden sie im Labor spurenanalytisch auf organisch-chemische Schadstoffe wie PAK untersucht. Zur Bewertung der Luftsituation werden die Messergebnisse unterschiedlicher Standorte verglichen, die zum Beispiel von Landesämtern für Umwelt stammen (**München Airport 2007**). Die Vergleichswerte stammen von Orten ohne direkten Einfluss von Schadstoffquellen. Bei der Bewertung der Messwerte werden die gesetzlichen Vorschriften für Schutzgüter, Nahrungs- und Futtermittel mit einbezogen (**München Airport 2007**).



Bild 6.2 Grünkohlkultur als Bioindikator (**München Airport 2007**)

Im Gegensatz zu technischen Messungen ermöglicht Biomonitoring präzise Aussagen über die Wirkung einer Vielzahl von Stoffen auf die Umwelt. Die Messung erfolgt kontinuierlich im gesamten Zeitraum der Aussetzung. Sowohl der äußere Einfluss als auch das Zusammenwirken verschiedener Schadstoffe wird mit einbezogen. Wirkungen an Organismen können anders, unter Umständen sogar stärker ausfallen, als technische Messungen einzelner Stoffkonzentrationen es erwarten lassen (**München Airport 2007**).

Außerdem halten sich einige deutsche Flughäfen, darunter z.B. Hamburg, Bienenvölker zur Kontrolle der Schadstoffbelastung in ihrer Umgebung. Auch die Bienen dienen hier als Bioindikator (**ADV 2007**). Schadstoffe aus der Umwelt können auf verschiedenen Wegen in ein Bienenvolk gelangen. Die Biene kann direkt über Wasser und Luft Schadstoffe aufnehmen und in das Bienenvolk tragen. Pflanzen können Schadstoffe aus Luft, Wasser oder Boden aufnehmen und über die Nektar- und/oder Pollentracht an die Bienen weitergeben. Bienenvöl-

ker durchfliegen ihr Fluggebiet sehr intensiv und decken dabei mindestens eine Fläche von 12 km² ab (ADV 2007). Die Untersuchung des Honigs kann aufzeigen, wie sich die Schadstoffbelastung in diesem Gebiet zusammensetzt. Es ergibt sich ein Bild der Umweltbedingungen im Erntegebiet. Die Biene selbst wirkt quasi als „Biofilter“. Sie ist sehr empfindlich gegenüber Pflanzenschutzmitteln und anderen Chemikalien. Pro Tag macht eine Biene ca. 40 Ausflüge und besucht dabei ca. 4.000 Blüten. Dabei nimmt die Biene mit ihrem Saugrüssel den Nektar der Blüten auf und verdünnt ihn mit ihrem Speichel. Dieser enthält Enzyme, die hauptsächlich für den Umbau des Nektars in Honig verantwortlich sind. Die Eigenschaft der Biene als Indikator und Sammler sowie die mögliche Akkumulation von Schadstoffen in Pollen, Wachs und Honig dient somit der Überwachung und Einschätzung von Immissionen im jeweiligen Beobachtungsgebiet. Die bisherigen Messergebnisse bestätigten die positiven Ergebnisse der Luftqualitätsmessungen der Flughäfen und bescheinigten dem Honig eine einwandfreie Genießbarkeit (ADV 2007).



Bild 6.3 Bienenvölker und Honig als Bioindikator (ADV 2007)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die auf den Flughäfen durchgeführten Bioindikationsprogramme, die mit anderen Messmethoden erzielten Untersuchungsergebnisse bestätigen und somit für alle mittels Bioindikation untersuchten Substanzen keine Auffälligkeiten festgestellt wurden (ADV 2007).

7 Umweltverträglicher Flugzeugbetrieb

Um einen umweltfreundlichen Flugzeugbetrieb gewährleisten zu können, muss nicht nur das Flugzeug selbst in die Überlegungen mit einbezogen werden, sondern auch die Energie- und Abfallwirtschaft der Flughäfen, der komplette Life Cycle eines Flugzeuges inkl. Recycling, sowie die Flugverkehrsführung, da dort durch eine bessere Ressourcennutzung und Planung erhebliche Potenziale bestehen. Es ist aber auch wichtig, dass neben den Klima- und weiteren Umweltaspekten vor allem auch wirtschaftliche und soziale Randbedingungen berücksichtigt werden, um zu nachhaltigen Lösungen zu gelangen. Dies erfordert Innovationen im technologischen Bereich, aber auch bei der Neugestaltung der Energie- und Abfallwirtschaftskonzepte der einzelnen Flughäfen.

7.1 Energieverbrauch an Flughäfen

Neben den flugzeugbezogenen Quellen verursachen auch stationäre Quellen Emissionen im Flughafenbereich. 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 (**UBA 2007a**). Im Jahr 2005 lag der Gesamtverbrauch schon bei 1084 GWh inkl. 580 GWh für Strom (**Fraport 2006**). Der Flughafen München verzeichnete im Vergleich einen Gesamtenergieverbrauch von rund 332 GWh im Jahr 1996 (**UBA 2007a**). Im Jahr 2005 lag der Gesamtenergieverbrauch in München bei 519 GWh, Tendenz steigend (**München Airport 2006**). 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 im Jahr 1996/1997 (**UBA 2007a**) und nach eigenen Berechnungen nach **München Airport 2006** und **Fraport 2006** von ca. 18 - 21 kWh/PAX im Jahr 2005.

Durch die Anwendung von neuen Technologien, wie zum Beispiel Solaranlagen, oder dem Einsatz von energiesparenden Lampen kann an einem Flughafen viel Energie, sogar kurzfristig, eingespart werden.

7.2 Abfälle und Abfallarten an Flughäfen

Neben dem hohen Energieverzehr, kommt es an Flughäfen zur Abfallproduktion. Dabei fallen als Abfallarten verwertbare und nicht verwertbare Abfälle, sowie Sonderabfälle an. Einige Abfälle aus dem Spektrum der umweltbezogenen Rückstände an Airports sind beispielsweise (**Hamburg 2005**):

- Verpackungsmaterial aus Aluminium, Pappe, Kunststoff
- Büro- und Verwaltungsabfall (Papier, Kartonage, Kunststoffe)
- Zeitungen und Mischpapier
- Altglas
- Pflanzen, Laub und Rasen
- Altholz
- Restmüll
- Öl, Reinigungsmittel
- Batterien aller Art
- Ölverschmutzte Betriebsmittel
- Enteisungsmittel

Diese Auflistung zeigt, mit welchen abfalltechnischen Problemen ein Flughafen konfrontiert wird. Masse und Vielfalt der Abfälle und Rückstände erfordern einen systematischen Umgang mit dem „Müll“, um das Flughafengelände und das Grundwasser frei von Belastungen zu halten.

7.3 Flugzeug Life Cycle

Ein Flugzeugleben beginnt mit der Definition, Entwicklung und Produktion, besteht aus vielen Wartungsintervallen und Flugzyklen und endet mit der Verschrottung, bzw. Recycling, sofern dies möglich ist. Die Design-Philosophie der großen Hersteller sollte daher auf den gesamten Lebenszyklus eines Flugzeugs ausgerichtet sein. Von der Konzipierung bis zur Demontage und Wiederverwertung. Daher wird momentan daran gearbeitet, eine umweltfreundliche Stilllegung der Flugzeuge zu gewährleisten.

In den nächsten zwei Jahrzehnten werden mehr als 6.000 Luftfahrzeuge das Ende ihrer Betriebsdauer erreichen. Die Frage, wie man mit diesen alten Maschinen verfahren soll und gleichzeitig die Umwelt möglichst wenig belastet, verlangt nach Antworten. Bei Airbus zum Beispiel gibt es ein Projekt namens PAMELA, das sich mit der Erprobung modernster Rück-

bau- und Recyclingverfahren, zur Wiedergewinnung der meisten Wertstoffe und Komponenten für ausgediente Flugzeuge befasst (**EADS 2006**).

Das Projekt startete im Februar 2006 mit der Zerlegung einer A300-Zelle im südfranzösischen Tarbes. Ziel ist es, umweltgerechte Verfahrensnormen für das Recycling von Flugzeugen und deren Wiederverwendung zu 85% bis 95% festzulegen. Gegenstand laufender Forschungen sind auch die Weiterentwicklung der Verwertungsmethoden und die Förderung innovativer Recyclingverfahren für Verbundwerkstoffe, welche in zukünftigen Flugzeugen häufiger verbaut werden (**EADS 2006**).

Des Weiteren hat ein Team im April 2007 mit der Demontage der statischen A380-Bruchzelle begonnen, um die Techniken, die bereits für die A300 entwickelt wurden, zu erproben und an die Werkstoffe und Größe der A380 anzupassen. Dies ist das erste Mal, dass die Versuche vor der Indienststellung eines neuen Baumusters den kompletten Lebenszyklus abdecken. Nach Zerschneiden der Zelle in zehn große Sektionen mit Hilfe wirtschaftlicher, umweltfreundlicher Verfahren werden diese Sektionen dann gezielt auseinandergelöst, die verschiedenen Werkstoffe getrennt und für das Recycling aufbereitet (**EADS 2006**).

Die gewonnenen Erkenntnisse liefern viele Informationen, die in die Konstruktion von neuen, umweltfreundlicheren, einfach zu recycelnden Flugzeugen einfließen werden (**EADS 2006**).

Während des gesamten Lebens wird ein Flugzeug, angefangen mit der Produktion, mehrmals lackiert, auf Grund von Wartungsmaßnahmen oder Leihgeschäften. Hierbei fallen immer wieder große Mengen von Farbe an. Die herkömmlichen, verwendeten Lacke und Reiniger sind meistens nicht sehr umweltfreundlich, da sie Lösungsmittel und andere Chemikalien enthalten. Eine große Herausforderung stellt somit die Senkung der VOC-Emissionen (Volatile Organic Compounds) dar (**Fraunhofer 2007**). Im Bereich der Grundierung lassen sich heute bereits zwei Drittel eines Flugzeugs mit wasserbasierten Farben lackieren. Durch die Einführung eines VOC-reduzierten Reinigungsmittels konnte bezogen auf die Produktion eines normierten Flugzeugs der Lösemittelverbrauch um 13% reduziert werden (**Airbus 2007**).

Lackfarben lassen sich jedoch im Allgemeinen nicht mit Wasser mischen, so dass die Entwicklung einer wasserbasierten Farbe ein langer Prozess war und ist. Seit mehreren Jahren laufen Versuche auf verschiedenen Ebenen, um alle Ansprüche an die Lacke für Flugzeugkomponenten auf einer wasserbasierten Basis zu realisieren (**Fraunhofer 2007**). Hierbei ist es besonders schwierig die Anforderungen, welcher aus den verschiedenen Arten der Lackierung resultieren (Handlackierung, Automatenlackierung und Nietkopfkonservierung), mit wasserbasierten Produkten zu erreichen. Der deutsche Gesetzgeber hat festgelegt, dass in der Fertigung, wie auch bei der Wartung nur noch Lacke eingesetzt werden dürfen, die mit einem VOC Anteil von 250 g/l auskommen. Der heutzutage eingesetzte umweltgerechte Lack kann

ähnlich gut verarbeitet werden wie die konventionellen Produkte und enthält nur noch etwa ein Viertel der Lösemittel. Die Qualität bleibt voll erhalten, da der neue Lack genauso beständig ist, wie der alte VOC enthaltende Lack.

7.3.1 Optimale Flugroutenplanung

Steigende Umweltbelastungen infolge des ansteigenden Flugverkehrs sowie steigende Brennstoffpreise fordern mehr und mehr eine sparsame und umweltschonende Verkehrsführung, auch auf den Flughäfen. Infrastrukturverbesserungen am Boden und in der Luft eröffnen ein erhebliches Einsparpotenzial. Im IPCC Bericht von 1999 ist bereits festgestellt worden, dass Air Traffic Management und andere operative Maßnahmen den Kerosinverbrauch der Flugzeuge zwischen 8% und 18% senken können (**Lufthansa 2006**). Die größten Möglichkeiten bietet dabei eine verbesserte Nutzung der Lufträume.

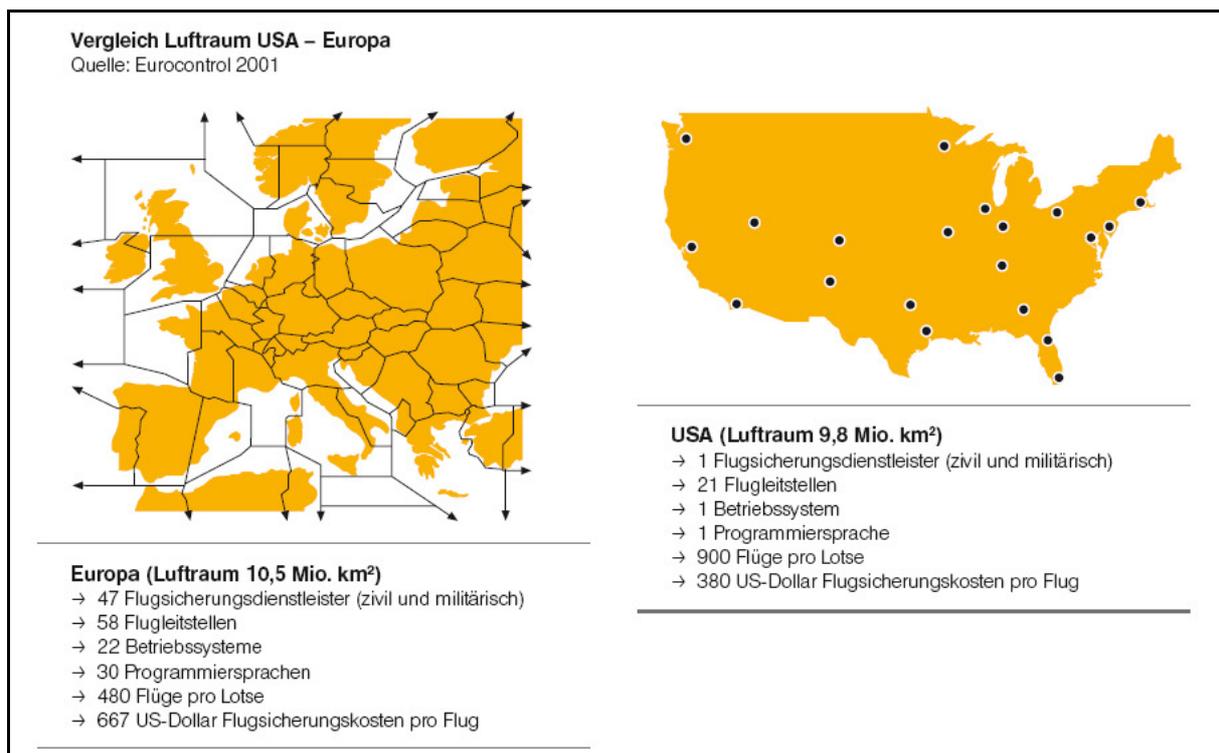


Bild 7.1 Vergleich Luftraum USA – Europa (**Lufthansa 2006**)

Experten sehen dort ein Einsparpotenzial von 4% bis 6% bis 2020 (**Lufthansa 2006**). Gerade bei der Optimierung der europäischen Flugsicherung gibt es Handlungsbedarf. Die Fragmentierung der Kontrolle des europäischen Luftraums, siehe Abbildung 7.1, führt bei den Airlines zu Mehrkosten von mehr als zwei Milliarden Euro und zu rund zehn Millionen Tonnen unnötigen CO₂-Emissionen (**Lufthansa 2006**). Die Flugzeuge der Lufthansa zum Beispiel mussten im Jahr 2005 zusammengerechnet über 420 Tage in Warteschleifen verbringen. Allein durch

die Vermeidung derartiger Anflugverzögerungen hätte Lufthansa rund 110.000 Tonnen CO₂ weniger emittieren können. Dies entspricht dem Transport von mehr als 300.000 Urlaubern von Frankfurt nach Mallorca und zurück (**Lufthansa 2006**).

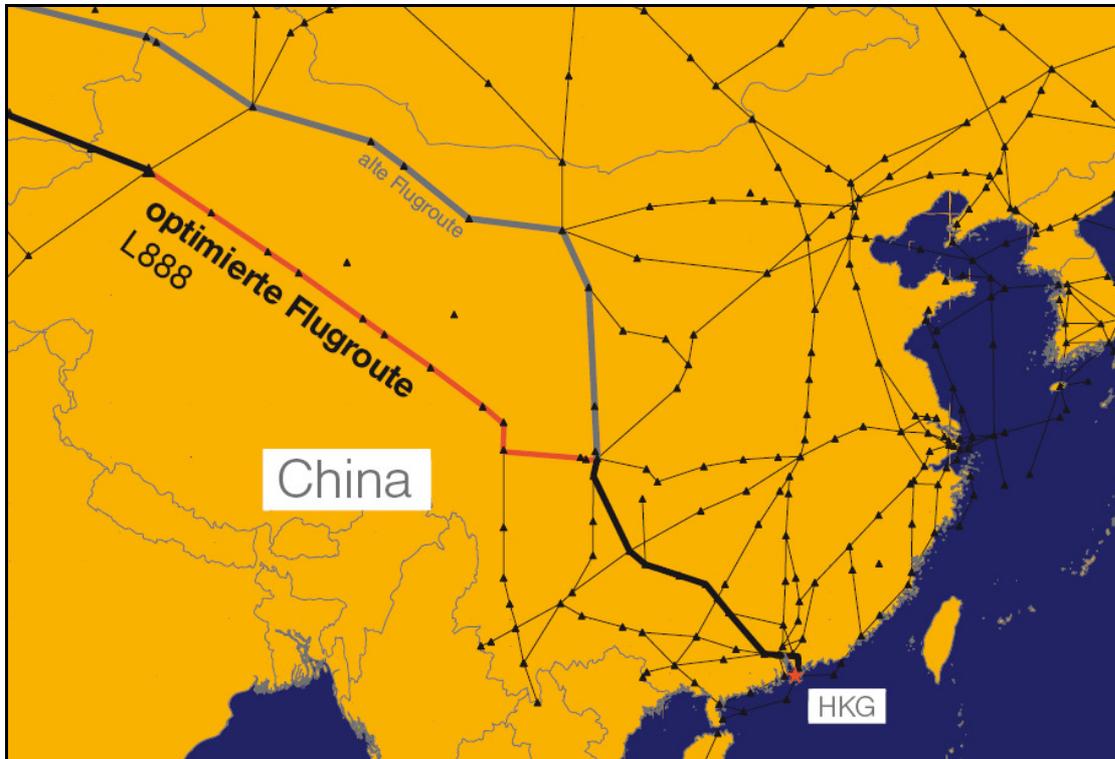


Bild 7.2 optimierte Flugroute nach Hongkong der Lufthansa (**Lufthansa 2006**)

Operative Maßnahmen sind optimierte Flugrouten und –geschwindigkeiten. Durch variable Fluggeschwindigkeiten lassen die Winde auf Langstreckenflügen besser ausnutzen und somit kann auf diese Weise der Kerosinverbrauch reduziert werden. Optimale, direktere Flugrouten weisen häufig ein Kraftstoffeinsparpotenzial auf. Durch eine direktere Hongkong–Route, siehe Abbildung 7.2, spart zum Beispiel die Lufthansa pro Flug neben Zeit auch Kerosin. Im Jahr 2005 konnten 1.800 Tonnen Kerosin durch die optimierte Routenplanung eingespart werden. Dies entspricht einer Vermeidung von 5.670 Tonnen CO₂ (**Lufthansa 2006**).

8 Umweltoptimierter Flugzeugentwurf

Auf den Flugzeugentwurf nehmen viele verschiedene Parameter Einfluss. Einige dieser Parameter sind von einander abhängig, so dass der optimale Entwurf mit Hilfe eines iterativen Prozesses gefunden werden muss.

Im ersten Schritt werden Spezifikationen, wie z.B., welche Payload über welche Distanz mit welcher Geschwindigkeit und in welcher Höhe transportiert werden soll, festgelegt. Aus den Spezifikationen entsteht eine Konfiguration. Mit Hilfe der Konfiguration wird das Gewicht des Flugzeuges berechnet, womit auch der benötigte Auftrieb bestimmt ist. Wird der Widerstand berücksichtigt, kann der benötigte Schub bestimmt werden, sowie der Kraftstoffverbrauch und annähernd die Schadstoffemissionen. Am Ende eines Design Loops wird überprüft, welche Performance, u.a. Lärmwerte, das Flugzeug liefert. Wenn nötig, wird die Konfiguration nachgebessert. Abbildung 8.1 veranschaulicht diesen Vorgang.

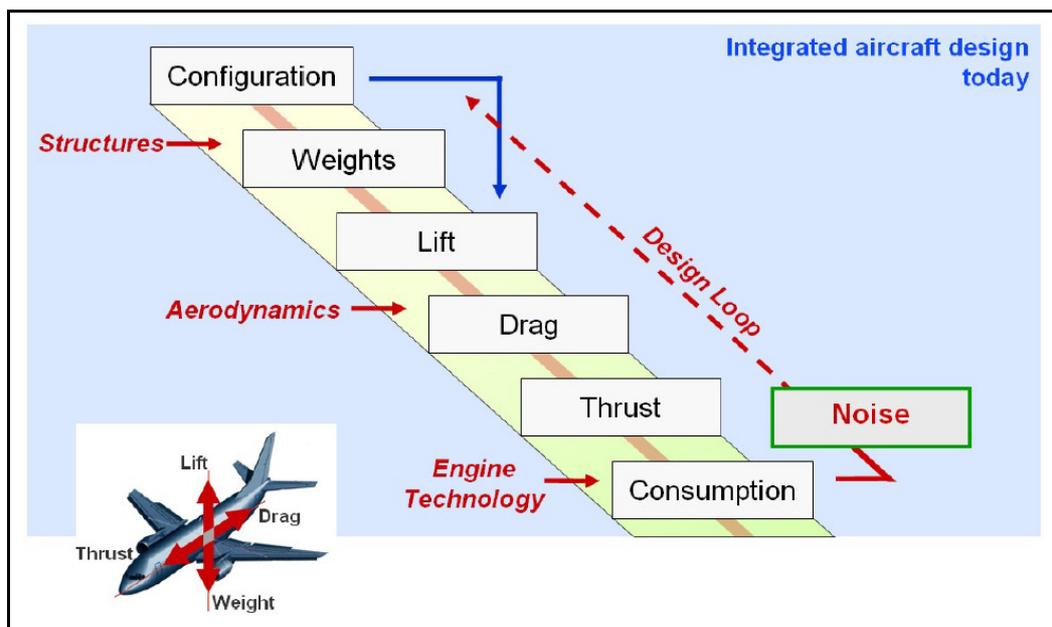


Bild 8.1 Darstellung des aktuellen Entwurfprozess (Egelhofer 2007)

Um einen umweltoptimierten Flugzeugentwurf zu erreichen, sollten, nachdem der Kraftstoffverbrauch ermittelt worden ist, explizit die zu erwartenden Emissionen bewertet und analysiert werden. Wichtig dabei ist, dass bei der Bewertung nicht die Quantität der Emissionen zum Urteil führt, sondern die zu erwartende Auswirkung des Schadstoffcocktails auf die Umwelt, bzw. Atmosphäre (Egelhofer 2007). Diese Vorgehensweise ein Flugzeug auszulegen, könnte helfen, zukünftige Flugzeuge umweltfreundlicher zu gestalten (Abbildung 8.2).

Da dieser Bericht sich mit den Umweltaspekten im Nahbereich von Flughäfen beschäftigt, sollen als Maßstab für die Umweltfreundlichkeit neben dem Einfluss auf die Klimaänderung,

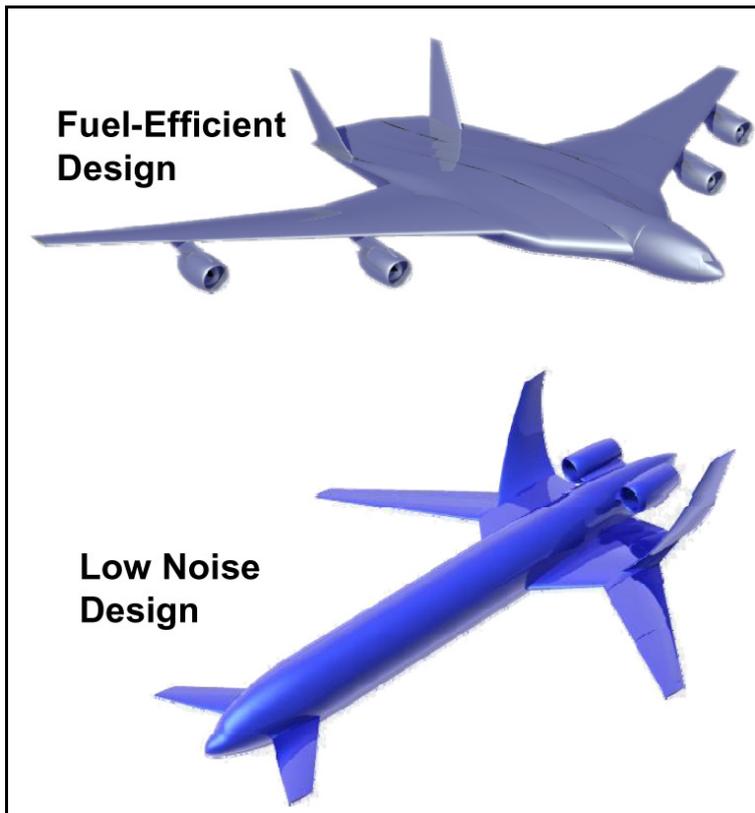


Bild 8.3 Beispiele für optimierte Entwürfe (**Rossow 2007**)

Der Kraftstoffverbrauch lässt sich neben dem Flugzeuggewicht auch durch konstruktive, aerodynamische und konfigurationstechnische Möglichkeiten und durch den Einsatz von neuen Technologien beeinflussen. Verschiedene Ansätze und Möglichkeiten werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

8.1 Grundlegende Parameter

8.1.1 Entwurfsreichweite

Für jedes Flugzeug und Technologiestandard gibt es eine optimale Reichweite, bei der die Nutzlast-Kraftstoff-Effizienz maximal ist. Diese Reichweite wird als Design Range bezeichnet. Sie stellt sozusagen die Reichweite dar, für welche, bzw. mit welcher das Flugzeug ausgelegt wurde. Für den heutigen Technologiestand beträgt die optimale Design Range ungefähr 4.000 Kilometer (**SoBAC 2001**).

Ein Flugzeug mit einer Design Range von 4.000km ist 40% effizienter als ein Flugzeug mit einer Design Range von 15.000 km bezogen auf den Spritverbrauch. Das Langstreckenflugzeug erreicht bei 6000 km seine höchste Effizienz (**SoBAC 2001**). Es gibt eine direkte Erklä-

rung für dieses Phänomen. Bei einem Langstreckenflugzeug werden ca. 40% des beim Start vorhandenen Kraftstoffes, von dem ein erheblicher Anteil auf den ersten 4000 km verbrannt wird, benötigt, um den Kraftstoff für die letzten 11000 km in der Luft zu halten (SoBAC 2001). Zudem ist zu beachten, dass eine festere Struktur des Flügels, Rumpfes und Fahrwerk nötig ist, um die Extralast zu tragen. Die folgende Tabelle 8.1 vergleicht zwei Flugzeuge, die beide entworfen worden sind, um eine gegebene Nutzlast über einer Strecke von 15.000 Kilometer zu befördern. Ein Flugzeug vollstreckt diese Aufgabe ohne Zwischenstopp und das andere legt zwei Zwischenstopps ein, um aufzutanken.

Tabelle 8.1 Transport einer Payload über 15.000 km in einem oder drei Steps (SoBAC 2001)

Design range km	Payload tonne	Fuel tonne	Max TOW tonne	Empty tonne	Fuel for 15,000km tonne
15,000	44.8	120.4	300.0	134.8	120.4
5,000	44.8	28.6	169.0	95.6	85.8

Aus der Tabelle 8.1 geht hervor, dass ein Flugzeug, welches die Nutzlast von 15.000 km ohne Zwischenstopp befördert, ein 40% größeres Leergewicht hat und 40% mehr Kraftstoff verbrennt als das kleinere Flugzeug, wenn es die Mission durchführt. Weitergehend hat das Langstreckenflugzeug ein maximales Startgewicht, welches fast 80% höher ist als das eines Mittelstreckenflugzeuges (SoBAC 2001). Der Flugzeugpreis und die Kraftstoffkosten bilden zusammen gewöhnlich ca. 70% der direkten Betriebskosten für Langstreckenflugzeuge (SoBAC 2001). Somit hätte ein großes Flugzeug, welches entworfen worden ist, um große Distanzen in kleinen Steps zurückzulegen, wahrscheinlich erheblich niedrigere Sitzkilometerkosten als seine Langstrecken-Konkurrenten (SoBAC 2001). Diese Argumente müssten allerdings gegen die häufigeren Landezyklen, den höheren Zeitaufwand, die höheren Anforderungen an die Flughäfen und an die Flugverkehrssteuerung, sowie gegen die höheren Wartungskosten abgewogen werden.

Die aktuelle Tendenz beim Entwurf von großen Flugzeugen geht in die Richtung von ständig steigenden Reichweiten. Dieses Verhalten der Hersteller ist damit zu begründen, dass eine Nachfrage seitens der Airlines und der Öffentlichkeit nach diesen Flugzeugtypen besteht. Flugzeuge mit kleinen Design Ranges sind weder bei der reisenden Öffentlichkeit, noch bei den Fluglinien populär. Kein Reisender akzeptiert gerne zwei oder mehr Zwischenstopps bis zum Ziel. Flugzeuge mit einer Reichweite um die 5000 km haben jedoch ohne Zweifel weniger Einfluss auf den Klimawandel (SoBAC 2001).

8.1.2 Entwurfsflughöhe

Obwohl es einige Unklarheiten über den Einfluss der Flughöhe auf die Umweltfolgen von Flugzeugemissionen gibt, sollte auch dieser Aspekt bei zukünftigen Flugzeugentwürfen beachtet werden (**IPCC 1999**). Es kann, so zum Beispiel die generelle Aussage getätigt werden, dass der Einfluss auf den Klimawandel bei einem Mittelstreckenflugzeug, welches in einer Höhe von 32.000 ft fliegt, um die Hälfte kleiner als des eines Langstreckenflugzeuges ist, welches in der Höhe von 40.000 ft fliegt. Der Kraftstoffverbrauch des Mittelstreckenflugzeuges ist hierbei 15% niedriger (**SoBAC 2001**). Das Langstreckenflugzeug könnte seinen Einfluss auf den Klimawandel zwar um ein Viertel reduzieren, indem es seine Flughöhe auf 35.000 ft ändert, jedoch zu Kosten des Spritverbrauches, welcher um 11% ansteigen würde (**SoBAC 2001**). Diese Zahlen sind nicht mehr als grobe Indikatoren. Zum einen berücksichtigen sie nicht den Effekt der Kondensstreifenbildung in Abhängigkeit zur Flughöhe, was durchaus einen großen Unterschied ausmachen könnte. Zum zweiten wird der Effekt von NO_x abhängig von der Flughöhe zwar berücksichtigt, es gibt jedoch nicht genügend Messdaten und Erfahrungen, um diese Betrachtung als ausreichend deklarieren zu können. Zum dritten gibt es geographische Unterschiede, z.B. nördliche und südliche Hemisphäre, und Saisonschwankungen in den Effekten von Kondensstreifenbildung und von NO_x. Diese Veränderungen in Verbindung mit den unterschiedlichen Flughöhen können maßgebliche Unterschiede in den Effekten verursachen (**SoBAC 2001**).

Zusammenfassend vorformuliert ist der Effekt der Flughöhe heutzutage nicht komplett erforscht und verstanden. Jedoch gibt es momentan eine Tendenz in immer höheren Flughöhen zu fliegen. Dieser Trend sollte zusammen mit der optimalen Design Range überdacht werden. Daher werden beide Faktoren, optimale Reichweite und Flughöhe, die zukünftige Forschung und den Technologieerwerb der Luftfahrtindustrie beeinflussen (**SoBAC 2001**). Ein Forschungsansatz wäre eine Methode für das Entwerfen von Flugzeugen zu entwickeln, welche die Auswirkungen auf die Klimaänderung pro Nutzlast und Strecke herabsetzt. Dabei sollten die Variablen, wie Fluggeschwindigkeit, Reichweite und Flughöhe mit einbezogen werden (**SoBAC 2001**).

8.1.3 Druckverhältnis im Triebwerk

Um einen höheren thermischen Wirkungsgrad zu erreichen, wird im allgemeinen das Gesamtdruckverhältnis eines Triebwerkes erhöht. Diese Erhöhung lässt die Temperaturen innerhalb des Triebwerkes ansteigen, mit der Folge, dass die NO_x Emissionen pro Kilogramm verbrannten Kraftstoff ansteigen. Bei zukünftigen Entwürfen muss daher beachtet werden, dass die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrad nicht auf Kosten von erhöhten NO_x Emissionen

stattfindet. Die Anwendung eines anderen Kreisprozesses, anstatt des Joulprozesses, könnte hier in Zukunft Abhilfe schaffen. Dem ICR (Inter-Cooled Recuperative) Zyklus wird nachgesagt, dass er die NO_x Emissionen um einen Faktor von drei im Verhältnis zum gegenwärtigen Standard verringert (SoBAC 2001). In folgender Abbildung 8.4 sind die verwendeten Wärmetauscher (blau) gut erkennbar.

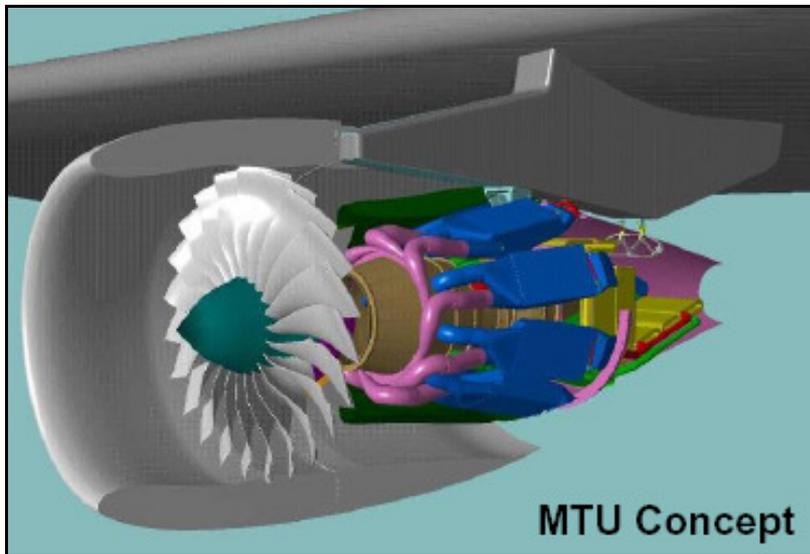


Bild 8.4 Darstellung eines Triebwerkes mit dem ICR Zyklus (Stoker 2007)

8.2 Fortschrittliche Technologien

8.2.1 Composite Werkstoffe und zukünftige Rumpfkongzepte

Mit Hilfe von neuen Werkstoffen, aktuell CFK und Aluminium Silicium, kann das Flugzeuggewicht reduziert werden. Verglichen mit dem Technologiestandaed von 1990 wurden bis 2005 im Schnitt 8% Gewicht eingespart. Bis 2010 sollen 15% bei neuen Flugzeugtypen, wie die 787 und A350, sein. Durch die weitere Reduzierung des Gewichtes sollen bis zu 5% Kraftstoff eingespart werden. Dieses Ziel soll mit Verbundwerkstoffen der nächsten Generation erreicht werden. Wichtig dabei ist, dass nicht nur die Materialien verändert werden, sondern auch die Konstruktionsweise angepasst wird, da die optimale Bauweise von Verbundwerkstoffen nicht mit der von Metallwerkstoffen übereinstimmt. Die folgende Abbildung 8.5 zeigt die Verkettung zwischen der Materialerforschung, der optimalen Bauweise und somit der optimalen Ausnutzung der Eigenschaften von Verbundwerkstoffen. Anhang F zeigt drei konkrete Lösungsansätze für Rumpfstrukturen aus Verbundwerkstoffen, welche für den neuen Werkstoff optimiert sind.

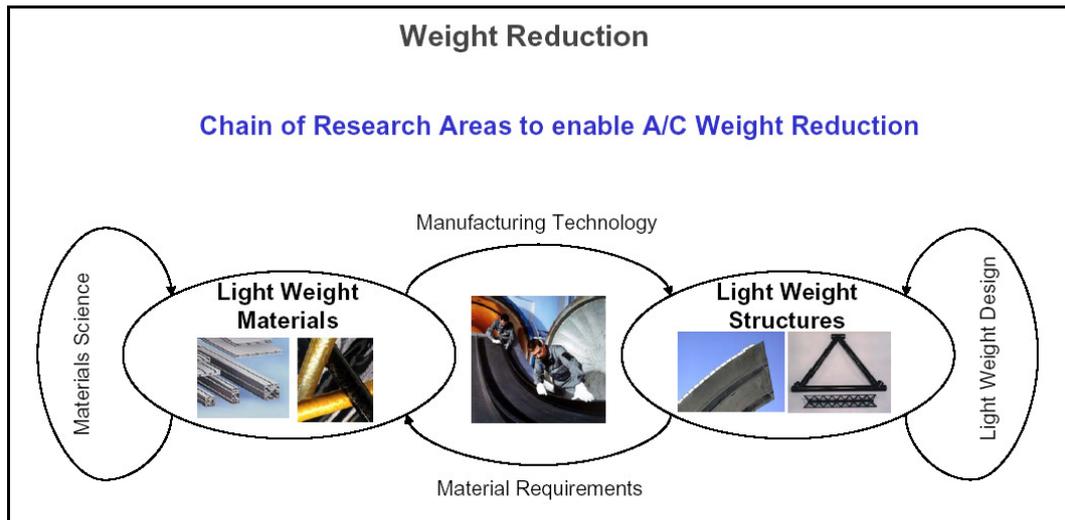


Bild 8.5 Verzahnung zwischen optimaler Bauweise und optimalem Material (**Rossow 2007**)

8.2.2 Fortschrittliche Aerodynamik

Durch die Anwendung verschiedener aerodynamischer Technologien kann der Kraftstoffbedarf verringert werden. Eine bereits eingesetzte Methode sind die sogenannten Winglets und Wingtips (**Egelhofer 2007**). Abbildung 8.6 zeigt, dass das Kraftstoffeinsparpotenzial von Winglets von der zurückgelegten Strecke abhängt.

Design range	≈	+130 nautical miles	
Fuel burn	≈	-2.50%	500 nm mission
	≈	-3.50%	1500 nm mission
NOx Emissions	≈	-4.60%	1500 nm mission
Payload at fixed range	≈	+6000 lb	at fuel capacity limit
	≈	+1000 lb	at MTOW



Bild 8.6 Kraftstoffeinsparpotenzial von Winglets anhand eines Beipiels (**Egelhofer 2007**)

Weitere 10% Kraftstoffersparnis sollen durch neue Oberflächen, eine natürliche laminnare Strömung, durch Grenzschichtabsaugungen oder durch innovative Konfigurationen erreicht werden (**Egelhofer 2007**).

Umströmte Oberflächen könnten mit Nano Partiklen, bzw. Bakterien, versehen werden, welche dafür Sorgen, dass der Widerstand abnimmt und so der Auftrieb zunimmt. Diese Technologie ist im Volksmund unter dem Begriff „Haifischhaut“ bekannt (**Egelhofer 2007**).

Durch die Erhöhung des Verhältnisses L/D kann die Performance eines Flugzeuges verbessert werden. Ziel ist es, dem im Nenner stehenden Widerstand zu minimieren. Dies kann auf

verschiedenen Wegen erreicht werden. Eine Erhöhung der Spannweite bringt zum einen eine Widerstandsreduzierung mit sich, jedoch auch ein höheres Gewicht. Durch festere und leichtere Materialien und einer verringerten Reisegeschwindigkeit, könnte jedoch das höhere Gewicht kompensiert werden. Andere Möglichkeiten stellen unkonventionelle Konfigurationen, wie ein BWB, oder die Ausnutzung von einer laminaren Strömung, welche weniger Widerstand erzeugt, dar (**Egelhofer 2007**).



Bild 8.7 Darstellung der Installation eines HLFC Systems im Heck einer A320 (**Jupp 2007**)

Das HLFC Verfahren, welches Grenzschichtabsaugungen durch sehr feine Oberflächenbohrungen verwirklicht und so eine laminare Strömung erzeugt, trägt zur Widerstandsreduzierung bei (**SoBAC 2001**). Verschiedene Studien besagen, dass trotz Beachtung der Kosten-, Gewicht- und Wartungsnachteil, die HLFC Technologie zusammenfassend gesehen durchaus die direkten Betriebskosten verringern kann (**SoBAC 2001**). Airbus hat ein Seitenleitwerk einer A320 mit einem HLFC System ausgerüstet und mit dem Verfahren experimentiert. Die Versuche wurden erfolgreich abgeschlossen. An 50% der Profiltiefe konnte eine laminare Strömung erzeugt werden (**Jupp 2007**). Abbildung 8.7 und 8.8 zeigen Bilder des Versuchsaufbau.

Um das volle Potential der HLFC Technologie auszunutzen, muss jedoch ein neues Flugzeug entworfen werden, welches speziell für diese Technologie ausgelegt ist. Diese Tatsache stellt momentan aber einen Blocking Point dar, da es mehrere offene Fragen gibt, wie zum Beispiel die Verschmutzung der sehr feinen Bohrungen durch Insekten und über die Wartbarkeit der Saugoberflächen.

Erwähnenswert ist, dass Versuche mit anliegender laminarer Strömung über einen gesamten Flügel bereits in den vierziger bis sechziger Jahren durchgeführt wurden. Dabei fand man heraus, dass ein fliegender Flügel mit einer anliegender laminaren Strömung das größte Spritpotential hat (**SoBAC 2001**).



Bild 8.8 HLFC Systems am Seitenleitwerk einer A320 (Jupp 2007)

Zweidrittel des Kraftstoffverbrauches der Luftfahrt, wird nach eine Schätzung des Berichtes „Greener by Design“, auf Strecken verbrannt, die kürzer sind als 5.000 Kilometer, und mehr als die Hälfte für Strecken, die kürzer sind als 2.800 Kilometer. Ein großer Anteil dieser oben genannten Strecken wird mit kleinen bis mittelgroßen Flugzeugen zurückgelegt, für die das herkömmliche Design, gepfeilerter Flügel, das einzige sinnvolle Konzept für die vorhersehbare Zukunft ist. Für diese Konfiguration sollte HLFC somit die erste Wahl sein, um den Widerstand zu verringern (SoBAC 2001).

8.2.3 Fortschrittliche Systeme

Neu entwickelte Systeme können zu eine Reduzierung des Energiebedarfes beitragen. Durch ein Bleedless-System könnte bis zu 30% der bisher benötigten Energie eingespart werden. Weiterhin kann der Einsatz einer Brennstoffzelle den Kraftstoffbedarf um 3% senken (Egelhofer 2007). Fortschrittliche Systeme können auch zur Gewichtsreduzierung beitragen. Ein aktuelles Arbeitsfeld stellt das „More Electric Aircraft“ dar. In herkömmlichen Flugzeugen sind bis zu drei Hydrauliksysteme eingebaut. Die benötigten, teilweise sehr langen und redundanten Rohrleitungen, weisen ein hohes Gewicht auf (AIAA 2005). Abbildung 8.9 zeigt schematisch eine herkömmliche Konfiguration der Energieversorgung.

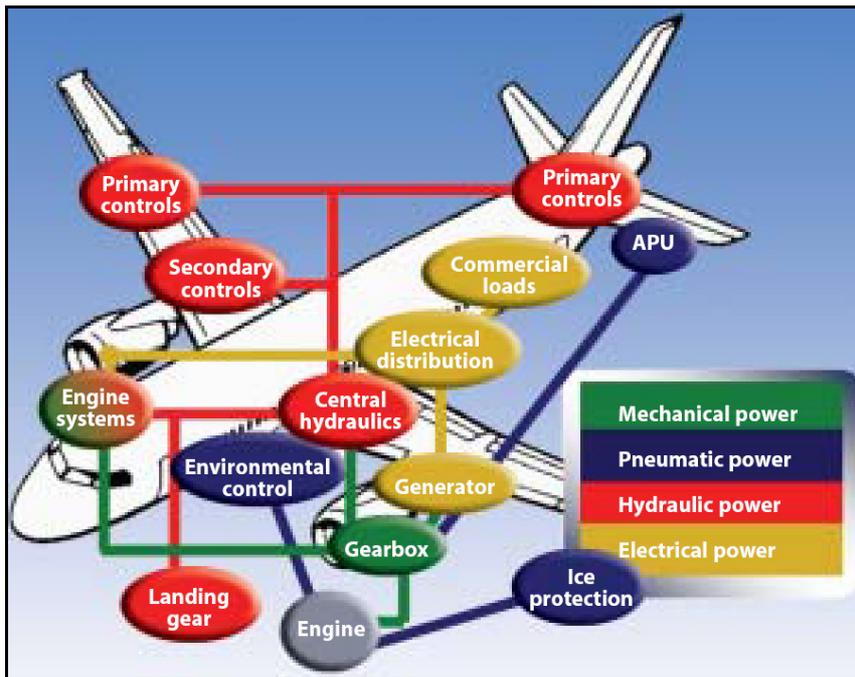


Bild 8.9 Darstellung der herkömmlichen Energieversorgung (AIAA 2005)

Beim A380 wurde bereits ein Hydraulikkreis eingespart und durch zwei elektrische ersetzt. Da so schwere Rohre durch Kabel ersetzt werden konnten, wurde das System leichter. Außerdem weisen solche Systeme geringere Wartungskosten auf (AIAA 2005). Bei den zukünftigen Modellen wird die Elektrisierung weiter zunehmen. So ist zum Beispiel vorstellbar, dass es neben den zwei Hydrauliksystemen ein Hybridsystem, hydraulisch-elektrisch, gibt oder nur ein Hydrauliksystem zusammen mit einem Hybridsystem und einem, bzw. zwei reinen elektrischen. Die optimale Kombination muss für jede Flugzeugkonfiguration individuell ermittelt werden. Abbildung 8.10 zeigt eine mögliche zukünftige Konfiguration.

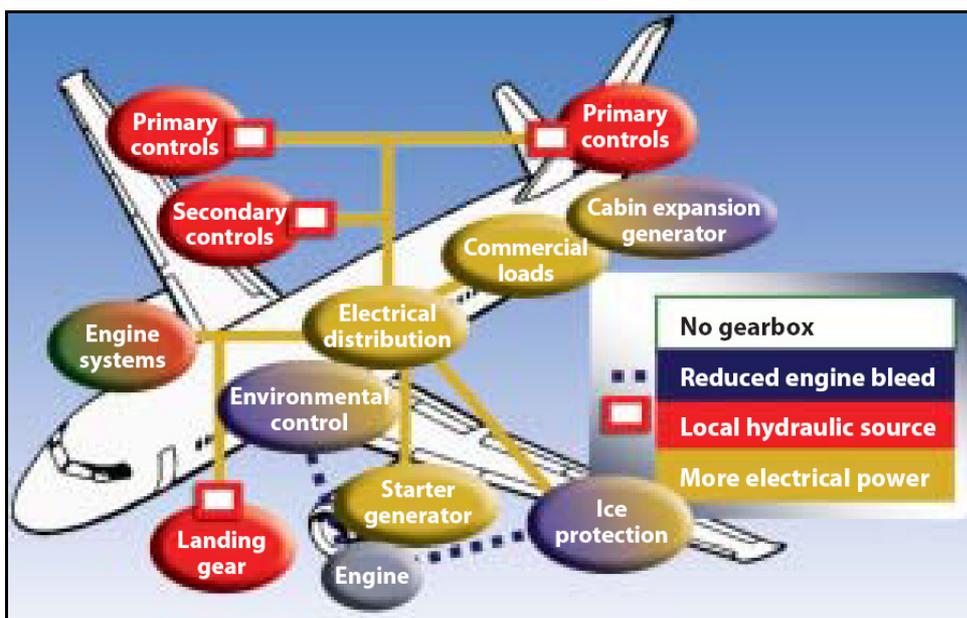


Bild 8.10 Darstellung einer möglichen zukünftigen Energieversorgung (AIAA 2005)

8.3 Alternative Antriebe und Kraftstoffe zu herkömmlichen Antriebsmitteln

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen viele Schadstoffe. Daher stellt sich die Frage nach umweltschonenden erneuerbaren Energiequellen und Antriebstechniken.

Auf dem Feld der Antriebstechniken wird der Propeller für zukünftige Flugzeugfamilien in Betracht gezogen, da er ein erhebliches Kraftstoffpotenzial gegenüber dem Turbofantriebwerk mit sich bringt. Hybrid-Antriebe, eine Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor, spielen in der Luftfahrt bisher eine kleine, bis gar keine Rolle, da solche Antriebe wahrscheinlich schwerer werden würden. Andere Antriebstechniken, wie z.B. der Antrieb mit Ionen, Elektronen oder Mikrowellen sind sicherlich in naher Zukunft eher eine Fiktion. Daher ist im folgenden Kapitel der umweltfreundlichste Propeller Antrieb, UDF, erläutert.

Im Bereich der alternativen Kraftstoffe gibt es viele Kandidaten, welche es zu erproben gilt. Dazu gehören unter anderen Erdgas (Methan), Wasserstoff und Biokraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Hierbei ist Wasserstoff mit seinem hohen massenspezifischen Heizwert und seiner großen Wärmekapazität den anderen alternativen Energieträgern überlegen.

Air New Zealand und Virgin Atlantic möchten zusammen mit Boeing im Jahr 2008 testen, wie gut Biotreibstoffe in der Praxis tatsächlich funktionieren. In einer Boeing 747 soll ein Gemisch aus Kerosin und Biokraftstoff zum Einsatz kommen. In absehbarer Zeit werden Biokraftstoffe Kerosin nicht komplett ersetzen können, da der benutzte Treibstoff auch bei Außentemperaturen von minus 50°C flüssig bleiben muss. Diese Anforderung ist mit Biokraftstoffen sehr schwer zu erfüllen (**B2BBB 2007**).

Auf der anderen Seite gibt es mittlerweile gibt eine Vielzahl industrieller Studien und Projekte über wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen wie z. B. das deutsch-russische Gemeinschaftsprojekt Cryoplane, dass 1990 ins Leben gerufen und im Rahmen eines geförderten EU-Projektes durchgeführt wurde. Der Wasserstoffantrieb ist in einem der folgenden Unterkapiteln beschrieben.

8.3.1 Unducted Fan

Während der achtziger Jahre wurde die Technologie des UDF Antriebs vorangetrieben, bis das Interesse nachgelassen hat. Ein Grund dafür sind die verringerte Fluggeschwindigkeit und die Lärmemissionen, welche nach der damaligen Meinung einen erheblichen Nachteil darstellten. Hinzukommend waren, bzw. sind, Propellertriebwerke bei der Öffentlichkeit nicht sehr populär auf Grund des offenen Rotors (**Bräunling 2007**). Seit den 70er Jahren gibt es Bestrebungen die Propellergrenze von 0,6 Mach anzuheben, um die Wirtschaftlichkeit des Propellers mit akzeptablen Fluggeschwindigkeiten zu kombinieren. Die Firma Hamilton-Standard entwickelte deshalb zusammen mit der NASA den hier beschriebenen nicht ummantelten Propfan (UDF) (**Luftpiraten 2007**).

Aktuell werden Studien zum UDF Antrieb bei den großen Herstellern für zivile Luftfahrzeuge durchgeführt. Grund dafür ist, dass die vorhandenen Short-Range Flugzeuge in die Jahre gekommen sind, und im Blick auf das Erreichen der Vision 2020 noch viel zu tun ist. Der UDF Antrieb bietet ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 10-15% bei einer Machzahl von ungefähr 0,8. Diese höhere kritische Machzahl kann erreicht werden, da der UDF im Gegensatz zu konventionellen Propellern acht bis zehn verhältnismäßig kurze, aber extrem tiefe Schaufeln aufweist. Dadurch können sie mechanisch und aerodynamisch höher belastet werden als wenige lange, schmale, konventionell geformte Blätter (**Luftpiraten 2007**). Die Lärmemissionen der UDF Antriebe gelten momentan als verbesserungswürdig, können jedoch durch konstruktive Maßnahmen z.B. durch den Flugzeugrumpf gedämmt werden.

Ein Nachteil ist jedoch, dass UDF Antriebe nicht ohne weiteres an den heutigen Flugzeugkonfigurationen einsetzbar sind, da diese für eine höhere Machzahl, sprich für Turbofantriebwerke ausgelegt sind (**SoBAC 2001**). Manche Airlines sprechen sich offen für die Einführung von UDF Antrieben aus, unter anderem Easyjet. Easyjet hat bereits den sogenannten Eco Jet vorgestellt, welcher mit UDF Triebwerken bestückt ist. Abbildung 8.11 zeigt ein UDF Triebwerk an einer McDonnell Douglas.



Bild 8.11 Ein UDF Triebwerk an einer McDonnell Douglas (**Luftpiraten 2007**)

Ein Vergleich eines UDF Antriebs mit einem modernen konventionellen Turbofan Triebwerk zeigt folgende Tabelle 8.2:

Tabelle 8.2 Vergleich eines UDF Antriebs mit einem konventionellen Turbofan (**Luftpiraten 2007**)

	GE UDF	CFM 56-3B1
Schaufelzahl pro Fan	8	38
Stand Schub	111 kN	90 kN
Nebenstromverhältnis	35 : 1	5 : 1
Fandurchmesser	3,6 m	1,5 m
Kraftstoffverbrauch	40 kg/(kN*h)	63 kg/(kN*h)

Abbildung 8.12 veranschaulicht die Tradeoffs der verschiedenen Antriebe. Durch die Anwendung eines UDF Antriebes kann der Kraftstoffverbrauch, sowie die Nox Emissionen verringert werden, jedoch zu Kosten eines höheren Lärmpegels. Bei Anwendung eines höheren Nebenstromverhältnisses würden sich der Kraftstoffverbrauch, sowie die Nox Emissionen im Reiseflug erhöhen. Hingegen würde der Lärmpegel zusammen mit den Nox Emissionen im LTO Zyklus sinken.

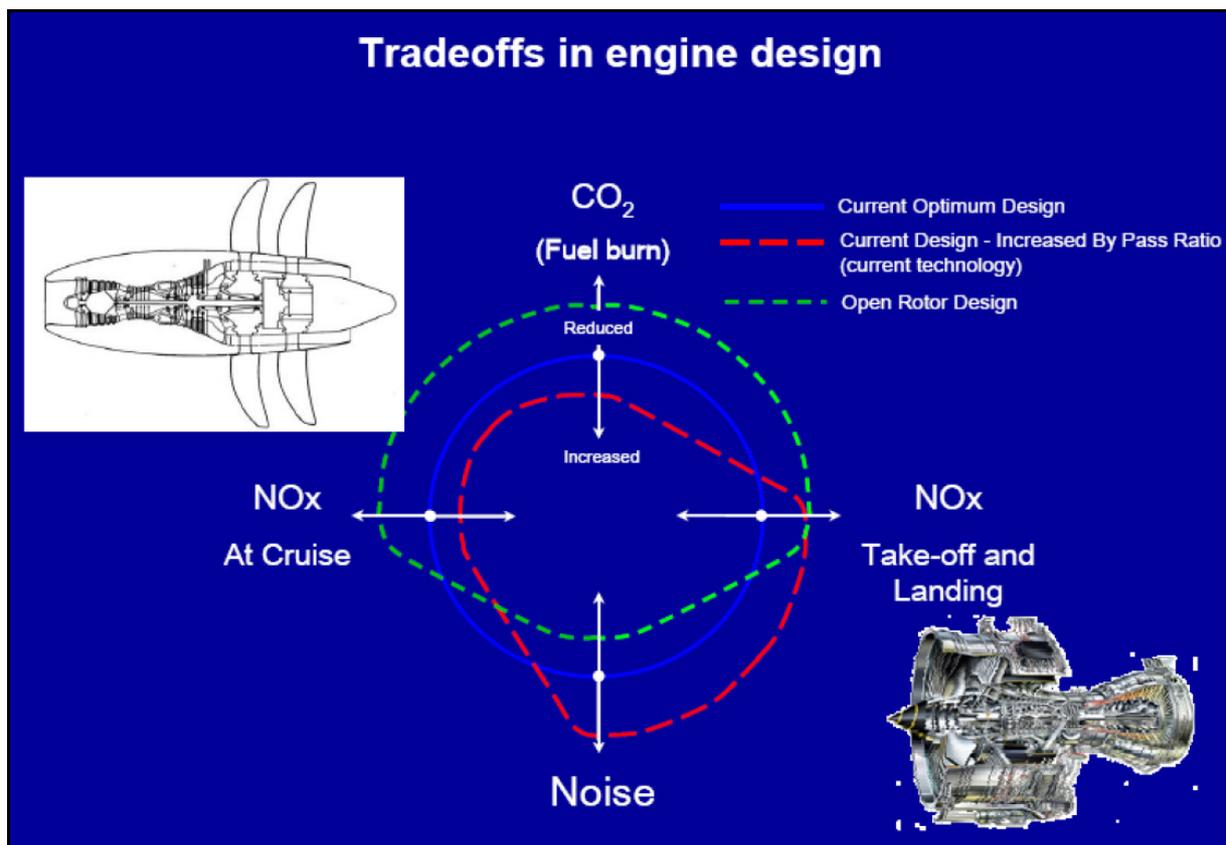


Bild 8.12 Gegenüberstellung (Tradeoffs) verschiedener Antriebsgenerationen (**Jupp 2007**)

8.3.2 Wasserstoffantrieb

Mit Wasserstoff angetriebene Flugzeuge zeigen eine erhebliche Verringerung des Einflusses auf den Klimaeffekt im Verhältnis zu ihren mit Kerosin betriebenen Gegenstücken (**SoBAC 2001**). Zu beachten ist jedoch, dass diese Aussage nicht die Mögliche Zunahme von Kondensstreifen und Zirruswolken beachtet, die durch den Wasserstoff und dem Wasserdampf besonders in der Troposphäre entstehen können. Um den vollen Nutzen aus dem Gebrauch von Wasserstoff zu erzielen, müsste der neue Treibstoff in einem Flugzeug verwendet werden, welches für Flughöhen optimiert ist, in denen die Gefahr der Kondensstreifen- und Zirruswolkebildung klein ist (**SoBAC 2001**). Abhilfe könnte ein System schaffen, welches es dem Flugzeugführer ermöglicht, Luftmassen zu erkennen, die Kondensstreifenbildung unterstützen, so dass diese Gebiete umflogen werden könnten (**Airbus 2001**). Weiterhin ist zu beachten, dass die geschätzten Verringerungen des Einflusses auf den Klimawandel sich nur auf den Effekt der Emissionen im Flug selbst beziehen und keineswegs die Emissionen durch die Herstellung des flüssigen Wasserstoff mit einbezieht (**SoBAC 2001**).

Folgende Abbildung 8.13 gibt einen Überblick über den Ausstoß von Schadstoffen von Kerosin und Wasserstoff in verschiedenen Höhen. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch Wasserstoff allgemein weniger Schadstoffe emittiert werden als durch Kerosin. Umso niedriger die Flughöhe ist, desto größer ist der Unterschied (**Airbus 2001**). Ein Nachteil ist, dass flüssiger Wasserstoff im Vergleich mit Kerosin ein 11,5-fach größeres Volumen bei 2,8-fachem massenspezifischen Heizwert hat. Die Speicherung des flüssigen Wasserstoffes benötigt daher etwa das 4-fache Volumen.

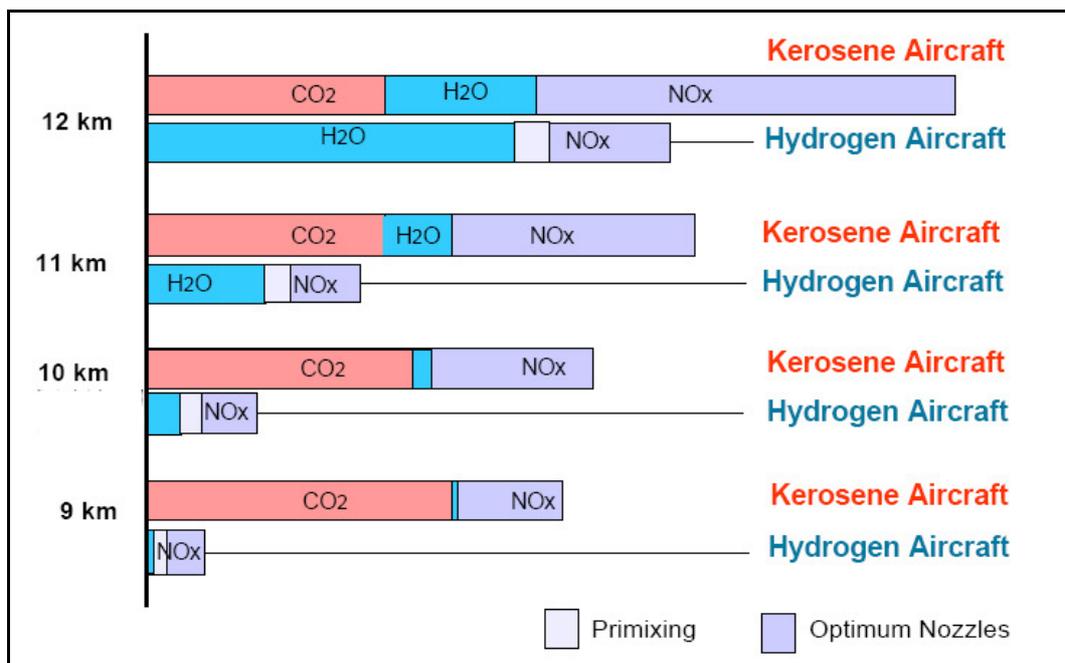


Bild 8.13 Vergleich des Schadstoffausstoßes von Kerosin und Wasserstoff in verschiedenen Höhen (**Airbus 2001**)

9 Mögliche Auswirkungen von neuen Flugzeugentwürfen auf den Klimawandel anhand von beispielhaften, fiktiven Konfigurationen

Mögliche Auswirkungen durch neue Technologien wurden durch die Kreation von dreizehn verschiedenen Flugzeugkonfigurationen im Rahmen des Projektes „Greener by Design“ erforscht. Unter diesen dreizehn verschiedenen Konfigurationen sind auch einige sehr zukunftsweisende Konzepte zu finden (SoBAC 2001).

Acht von den verschiedenen Konfigurationen sind kerosingetrieben, wovon vier ein klassisches turbofangetriebenes Design aufweisen und zwei Designs ein BWB darstellen, welche jeweils turbofan- oder turbopropgetrieben sind. Zusätzlich zu den acht kerosingetriebenen Konzepten wurden fünf verschiedene Wasserstoffvarianten entwickelt, wobei fünf der vorher untersuchten kerosinbetriebenen Varianten modelliert wurden (SoBAC 2001).

Für jedes einzelne Design wurde der zu erwartende Spritverbrauch für eine bestimmte Strecke mit einer definierten Nutzlast in einer Höhe von 20.000 ft bis zu 40.000 ft ermittelt und daraus der relative Einfluss auf die Klimaerwärmung abgeleitet. Die Fluggeschwindigkeit wurde hierbei mit Mach 0.85 für die turbofangetriebenen Designs und für die Turbopropvarianten mit 0.80 festgelegt (SoBAC 2001). Für jedes Design ist eine Berechnungen mit dem heute verfügbaren Technologiestandard und mit einem prognostizierten Standard im Jahre 2050 durchgeführt worden. Zusätzlich wurden Berechnungen für die kerosingetriebenen Flugzeuge durchgeführt, bei denen ein anderer Kreisprozess zu Grunde gelegt wurde, nämlich der ICR Zyklus, anstatt des herkömmlichen Joulezyklus (SoBAC 2001).

Die kerosinbetriebenen Flugzeugdesigns sind folgend aufgelistet (SoBAC 2001):

- A) Basis Flugzeug, Design Range 15.000 Kilometer, Flughöhe 40.000 ft.
- B) Medium Range Flugzeug, Design Range 5.000 Kilometer, Flügelbelastung beim Start 30%, höher als bei A)
- C) Flugzeug B) mit anliegender laminarer Strömung, erzielt durch Grenzschichtabsaugung am Leitwerk und an der Zelle.
- D) Flugzeug C) mit zusätzlicher Grenzschichtabsaugung auf der Flügeloberseite

Diese vier Flugzeugentwürfe weisen einheitlich eine klassische Konfiguration des gepfeilten Flügels auf, welches heutzutage das dominierende Designkonzept für Unterschallflugzeuge ist.

Weitere untersuchte Varianten der Untersuchung sind (**SoBAC 2001**):

- E) Ein turbofanantriebener BWB mit einer turbulenten Grenzschicht, Design Range 5.000 Kilometer
- F) Wie Flugzeug E), jedoch mit UDF Antrieb

Die am meisten spritsparenden Konfigurationen der Untersuchung sind folgende (**SoBAC 2001**):

- G) Ein turbofantriebener BWB mit anliegender laminarer Strömung, erzielt durch Grenzschichtabsaugung am gesamten Flügel, Design 9.000 Kilometer
- H) Flugzeug G) mit UDF Antrieb.

Zusätzlich wurden Flugzeug B und Flugzeug E bis H als wasserstoffangetriebene Flugzeuge ausgelegt.

9.1 Analyse der einzelnen Konfigurationen

Einführend ist zu bemerken, dass vom Flugzeug A) aus gesehen, alle darauffolgenden Konfigurationen einen niedrigeren Spritverbrauch aufweisen und somit auch einen kleineren Einfluss auf den Klimawandel haben (**SoBAC 2001**).

Für die turbofanangetriebenen Flugzeuge beginnend mit Flugzeug B war das wesentliche Ziel den erzeugten Widerstand zu verringern, um so L/D zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch zu verringern. Das Potential den Widerstand eines herkömmlichen Flugzeugdesigns unterhalb des heutigen Standards zu verringern ist jedoch sehr begrenzt. Flugzeug C und D tun dies durch die Anwendung von Grenzschichtabsaugungen (HLFC) an allen möglichen Oberflächen. Für das Flugzeug D wird eine Verringerung des Einflusses auf den Klimawandel und des Kraftstoffverbrauchs von 17% prognostiziert (**SoBAC 2001**).

Besonders für große Flugzeuge ist ein möglicher Schritt, das herkömmliche Konzept des gepfeilten Flügels fallen zu lassen, und anstelle über ein BWB nachzudenken, wie Flugzeug E und Abbildung 9.1. BWB Konfigurationen sind bereits auf beiden Seiten des Atlantiks studiert worden. Ein BWB weist eine beträchtliche Verringerung des Kraftstoffbedarfs auf und hat kleinere Betriebskosten. Der geschätzte Kraftstoffbedarf von Flugzeug E ist 20% niedriger als der des Flugzeuges B, verglichen bei gleicher Flughöhe und zurückgelegter Strecke. Die Produkteinführung eines großen BWB wird momentan durch die hohen Investition verhindert, die benötigt werden würden, um das Projekt anzustoßen. Außerdem ist ein sehr hohes techni-

ches Risiko vorhanden und die Möglichkeit der Nichtakzeptanz durch die Passagiere auf Grund der sehr breiten und fensterlosen Kabine gegeben. Die Produkteinführung solch eines Produktes ist auf langer Sicht gesehen jedoch wahrscheinlich, bis dahin ist es aber notwendig, diese mögliche Schlüsseltechnologie in einem realistischen Umfeld zu erforschen (SoBAC 2001).

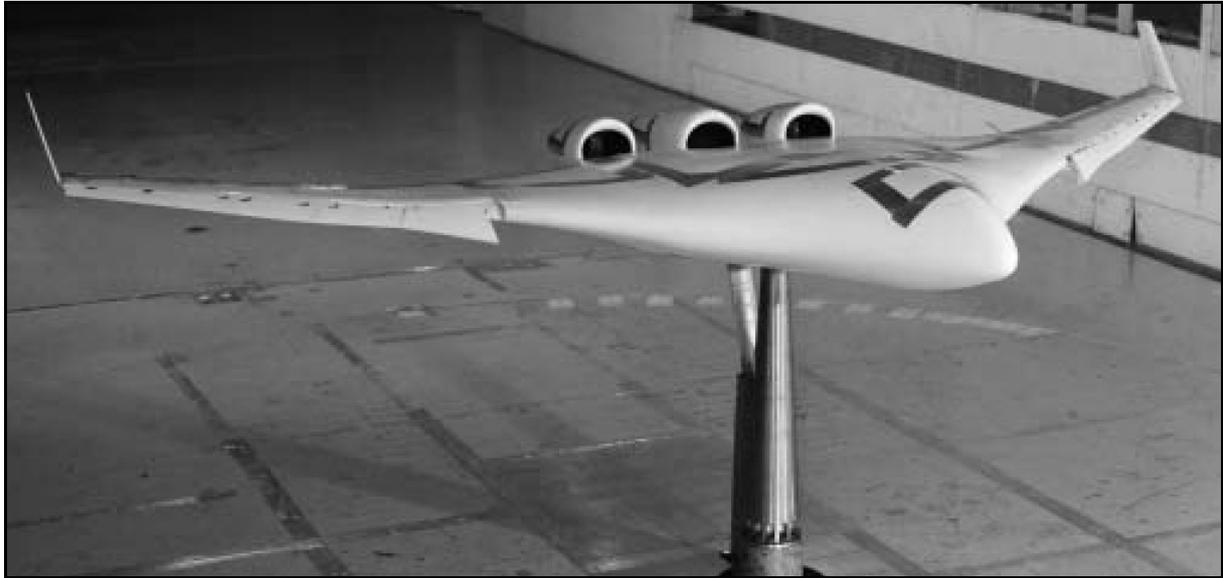


Bild 9.1 BWB Konfiguration (Flugzeug E) (SoBAC 2001)

Flugzeug G (Abbildung 9.2) mit einer anliegenden laminaren Strömung ist ein Konzept, das am Anfang der sechziger Jahre untersucht wurde. Es wurden Flugdemonstrationen durchgeführt, die gezeigt haben, dass eine weitere erhebliche Verringerung des Widerstandes möglich ist. Das Flugzeug G zeigt eine vierfache Verringerung des Profilwiderstandsbeiwertes im Verhältnis zu dem normalen BWB mit turbulenter Strömung auf, welche selbst nur die Hälfte des Profilluftwiderstandsbeiwert des Flugzeuges B aufweisen. Auf Grund seines niedrigen Widerstandes hat der BWB eine andere optimale, niedrigere Flughöhe und eine längere optimale Design Range, als herkömmliche Flugzeuge. Am heutigen Technologiestandard gemessen, würde der prognostizierte Einfluss auf den Klimawandel des Flugzeuges G bei operieren in 29.000 ft über einer Strecke von 9.000 Kilometer kleiner als die Hälfte sein, verglichen mit Flugzeug B, welches in 32.000 ft über 5.000 Kilometern operiert. Wenn 50 Jahre technologischer Fortschritt in der Abschätzung beachtet wird, inklusive einem neuen Antriebssystem, verringern sich die NOx Emission um einen Faktor von vier. Dies wäre eine Verkleinerung des Einflusses auf den Klimawandel um mehr als das zehnfache zu den heutigen in großer Höhe fliegenden Long Range Flugzeugen (SoBAC 2001).

Abschließend lässt sich also feststellen, dass ein BWB mit laminarer anliegender Strömung das größte aerodynamische Potential mitbringt, um den Einfluss der Luftfahrt auf den Klimawandel zu verringern. Dieses Konzept weist andererseits noch eine sehr hohe technische Ge-

fahr auf und viele weitere Fragen sind offen, so z.B. die Sicherstellung der laminaren Strömung bei allen Wetterlagen im Flug, trotz Insektverschmutzung (**SoBAC 2001**).

Für BWB Konfigurationen im allgemeinen ist man sich uneins, wie die Evakuierungssituation gelöst werden kann, und auch die Strukturkonstruktion könnte auf Grund des Druckrumpfes Probleme bereiten. BWB Konfigurationen sind auf Grund des größeren internen Volumens ihres Rumpfes Anwärter für flüssigen Wasserstoff als Kraftstoff. Der Einfluss auf den Klimawandel könnte durch den Einsatz von Wasserstoff um den Faktor von vier gesenkt werden. Für ein BWB mit laminarer Strömung im Jahr 2050 wird sogar vorhergesagt, dass der Einfluss dieses Flugzeuges nur einvierzigstel, verglichen mit dem der heutigen Long Range Flugzeuge, beträgt (**SoBAC 2001**).

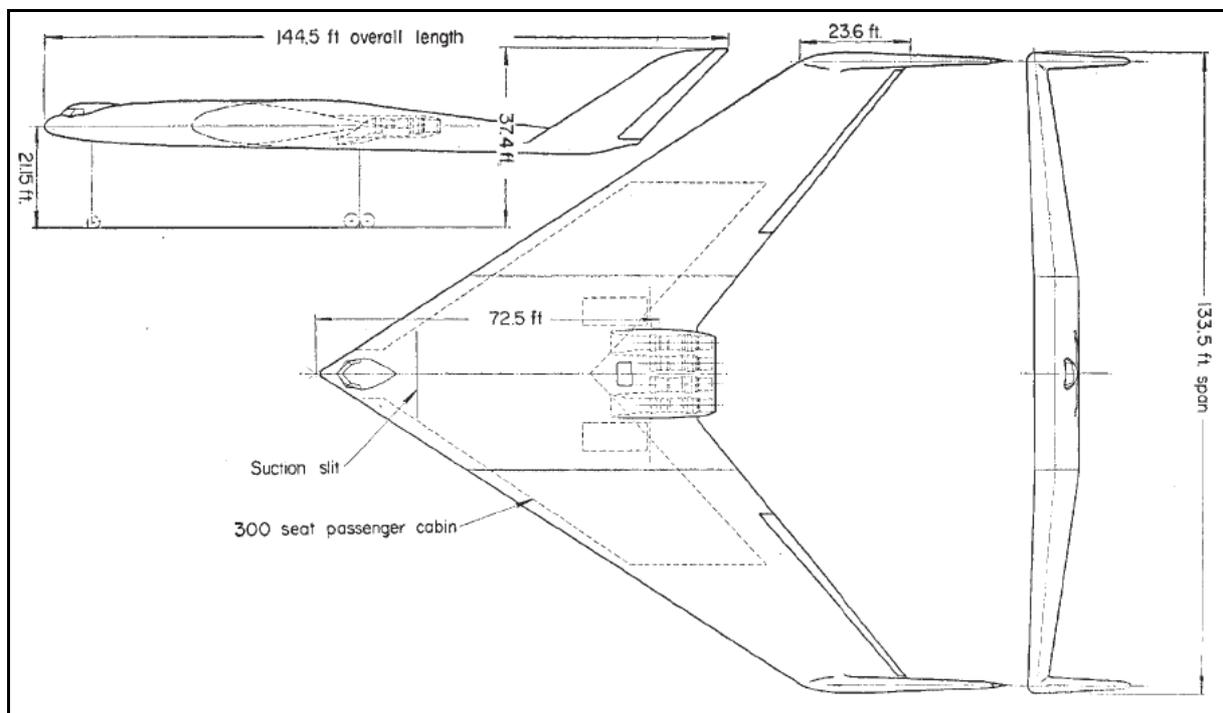


Bild 9.2 Handley Page projected 300-seat laminar flow airliner (1961) (**SoBAC 2001**)

Abschließend ist zu bemerken, dass sich nach neusten Untersuchungen mit operationalen Maßnahmen bis zu 8% und sich durch die Einführung von UDF Triebwerken bis zu 12% Kraftstoff einsparen lassen. Für die vermehrte Anwendung von Faserverbundwerkstoffen wird ein Potenzial von 15% vorhergesagt. Durch Grenzschichtabsaugungen am Seitenleitwerk, an der Zelle und am Flügel lassen sich 17% einsparen. Ein BWB ist in der Lage 20% Kraftstoff zu sparen, hingegen kann ein BWB mit laminarer anliegender Strömung bis zu 50% Kraftstoff sparen (**Jupp 2007**). Grundlage für diese Abschätzung ist der Technologiestandard von 2005. Abbildung 9.3 verdeutlicht diese Zahlen.

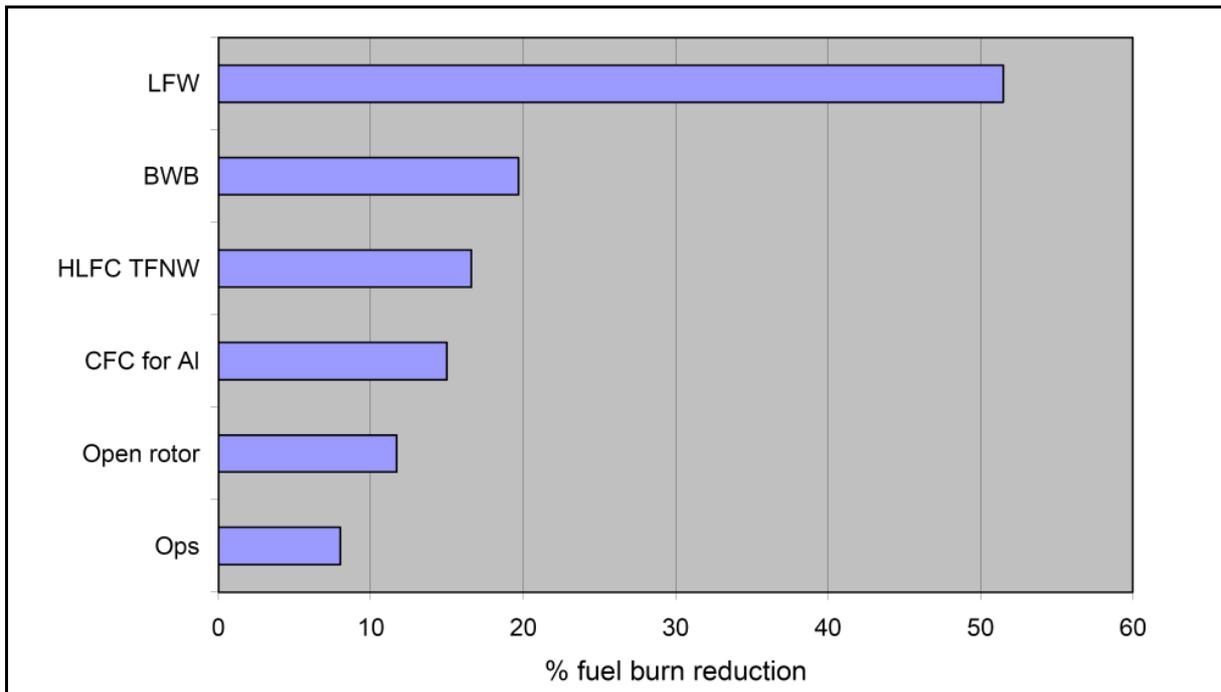


Bild 9.3 Kraftstoffsparpotential neuer Maßnahmen und Technologien (Jupp 2007)

10 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sind die Umweltaspekte des Luftverkehrs, sowie die Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nahbereich von Flughäfen analysiert und erläutert worden.

Durch den wachsenden Flugverkehr, bedingt durch die Globalisierung, ist eine Beschleunigung des Klimawandels festzustellen und somit besteht akuter Handlungsbedarf. Um den Folgen entgegenzutreten, sind Maßnahmen erforderlich, die nicht nur auf die Reduzierung der Lärmemissionen, sondern auch auf neue umweltfreundliche Technologien und Flugzeugkonfigurationen abzielen.

Die Reduzierung von Lärmemissionen hat in den vergangenen Jahren die Hauptrolle bei der Entwicklung von Flugzeugen gespielt. Diese Tatsache spiegelt sich auch in den zahlreich vorhandenen Forschungsprojekten und Berichten der letzten Jahre wieder. Die Novellierung des Fluglärmsgesetzes am Anfang dieses Jahres hat die Lärmgrenzwerte noch einmal verschärft. Erst aktuell, nach Ausbruch der Klimadiskussion in der Öffentlichkeit und Festlegung der Vision 2020, mit klar definierten Zielen, zeichnen sich mehr und mehr Projekte ab, die sich der Reduzierung des Schadstoffausstoßes widmen.

Es gibt zahlreiche Ideen, wie das Gewicht von Baugruppen, Systemen und der Struktur verkleinert werden kann, um den Schadstoffausstoß zu reduzieren und somit das Produkt Flugzeug umweltgerechter zu gestalten. Hinzukommen zahlreiche Ideen über die verschiedensten Konfigurationen, um die Performance der zukünftigen Flugzeuge zu erhöhen. Auch die Weiterentwicklung der vorhandenen Antriebe und die Entwicklung von neuen Antriebstechniken wird dazu beitragen, dass der Ausstoß von Schadstoffen abnimmt.

Außerdem weisen Optimierungen in der Flughafenumgebung und Verbesserungen der Flugführungssysteme ein nicht zu unterschätzendes Potenzial auf. Optimale Flugrouten können dazu beitragen, kurzfristig Kraftstoff und folgend CO₂ einzusparen. Energie kann auch in den Terminals der Flughäfen und bei der Bodenabfertigung eingespart werden. Ein weiterer wichtiger Bereich ist der Flugzeug „Life Cycle“. Hier ist es besonders wichtig, dass Recyclingverfahren für die Faserverbundwerkstoffe entwickelt werden.

Ein wichtiger Erkenntnispunkt nach der Ausarbeitung ist, dass man bei diesem sehr großen Themenbereich nicht in einer einzigen Arbeit allen Aspekten gerecht werden kann. Jeden Aspekt im Detail zu erläutern hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Besonders trifft dies für Kapitel 7.3 und 9 zu.

11 Schlussbemerkung

Das Projektthema *Umweltaspekte des Luftverkehrs, sowie die Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nahbereich von Flughäfen*, bedarf am Anfang das Einarbeiten in sehr große, komplexe und manchmal kontroverse Gebiete. Das Thema Lärm stellt neben dem Schadstoffaspekt und dem damit verbundenen Klimawandel ein eigenes Fachgebiet dar. Beide Themengebiete sollten in dieser Arbeit Beachtung finden. Dieses Unterfangen war zwischenzeitlich nicht ganz einfach, da es viele Quellen zu beiden Themen gibt.

Andererseits bekommt man durch das Projekt und der damit verbundenen Recherche ein sehr gutes Verständnis der Zusammenhänge. Allen Zusammenhängen und Aspekten kann man auf Grund der breite des Themas innerhalb einer Arbeit jedoch nicht gerecht werden. Trotzdem hoffe ich, dass es mir gelungen ist, einen guten Überblick über das Thema „Umweltaspekte in der Luftfahrt“ zu geben, so dass diese Ausarbeitung anderen Studenten bei deren Projekt- oder Diplomarbeit nützlich sein kann.

Literaturverzeichnis

- ADV 2005** ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN E.V: *Emissionsanteile 2005 in Deutschland – nach Verursachern* – URL: http://www.adv-net.org/gfx/background/Bild_17_Emissionsanteile-2005_neu-Neu.pdf (2007-10-09)
- ADV 2007** ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN E.V: *Luftfahrt und Umwelt. 4. Aufl. Berlin : Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e.V., 2007* – URL: http://www.adv-net.org/download/presse/ADV_Broschure_web.pdf (2007-08-12)
- ADV 2007a** ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN E.V: *Tabelle mit Lärmgrenzwerten, 2007* – URL: http://www.adv.aero/gfx/background/Tabelle_Laermgrenzwerte.pdf (2007-11-16)
- ADV 2007b** ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN E.V: *Webseite zum Fluglärm des ADV, 2007* – URL: http://www.adv.aero/de/gfx/um_laerm.php (2007-11-16)
- ADV 2007c** Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e.V: *Geräusche und ihre Einzelschallpegel - Flugzeugtypen, Kraftfahrzeuge, Hochgeschwindigkeitszug, 2007* – URL: http://www.adv.aero/gfx/background/Grafik_Schallpegel_deutsch.pdf (2007-11-16)
- AIAA 2005** AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS: *Beyond the More Electric Aircraft, 2005* – URL: http://www.aiaa.org/aerospac/images/articleimages/pdf/AA_Sept05_FAL.pdf (2007-12-05)
- Airbus 2007** AIRBUS S.A.S.: *Enviromental, Social and Economic Report, 2007* – URL: http://www.airbus.com/store/mm_repository/pdf/att00008803-/media_object_file_Airbus_ESEReport.pdf (2007-12-06)
- Airport Hamburg 2005** AIRPORT HAMBURG: *Umwelterklärung, 2005* – URL: http://www.airport.de/de/downloads/UE_2005_A4.pdf (2007-06-04)
- Airport Hamburg 2007** AIPIORT HAMBURG: *Informationen zum Schallschutz, 2007* – URL: <http://www.airport.de/de/schallschutz.html> (2007-11-13)

- Bräunling 2007** BRÄUNLING, Willy J.G.: *Triebwerke*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Fachbereich für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Vorlesungsskript, 2007
- DFLD 2007** DEUTSCHER FLUGLÄRMDIENST: Webseite zum Thema: *Gesetz zum Schutz vor Fluglärm*" – URL: <http://www.dfld.de/Archiv-/FluglaermGesetz.htm> (2007-07-06)
- DLR 2004** DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: *Abschlussbericht zum Projekt „Leiser Flugverkehr“*, 2004 – URL: http://www.dlr.de/me/Portaldata/25/Resources/dokumente/flug-physiologie/LFVKAbschlussbericht_Komplett.pdf (2007-04-28)
- DLR 2004a** DOBRZYNSKI, Werner; M. Pott-Pollenske; B. Gehlhar: Abschlusspräsentation Projekt „Leiser Flugverkehr“ – Umströmungslärm. Köln-Porz, 16.03.2004
- Donnerhack 2005** DONNERHACK, Stefan, MTU Aero Engines, München: *Beiträge der Flugtriebwerke zur Schadstoffreduktion im Luftverkehr*. Präsentation beim Workshop “Flugverkehr und Luftqualität -Partikel-und Stickoxidemissionen“ beim UBA Berlin, 2005
- EADS 2006** EUROPEAN AERONAUTIC DEFENCE AND SPACE COMPANY: *Im Focus*, 2006 – URL: http://www.reports.eads.com/2006/de/s/downloads/files/im_fokus_eads_gb06.pdf (2007-11-17)
- Egelhofer 2007** EGELHOFER, REGINA: *Aircraft for Reduced Impact on Climate*, Präsentation im der “First CEAS European Air and Space Conference” 2007 – URL: http://www.dlr.de/pa/Portaldata/33/Resources/dokumente/ceas/CEAS_WS_Egelhofer.pdf (2007-12-09)
- f-cell 2007** F-CELL SYMPOSIUM: *Präsentationen im Rahmen des F-cell Symposiums 2007 in Stuttgart*, 2007 – URL: http://www.f-cell.de/pdf/Bestellformular_Doku_dt.pdf (2007-10-10)
- Fraport 2006** FRAPORT AG: *Verkürzte Umwelterklärung 2006*, 2006 – URL: http://www.emas.de/datenbank/2423_Fraport_2006.pdf (2007-10-12)

- Fraunhofer 2007** FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG: *Webseite*, 2007 – URL: http://www.if-am.fraunhofer.de/jahresberichte/jb01/d_jb01_erg_plato1.html (2007-08-10)
- Google Earth 2007** GOOGLE EARTH: *Draufsicht vom Münchener Flughafen* (2007-11-12)
- Heinke 2006** HEINKE, Katja: *Luftverkehr als Quelle von Luftverunreinigungen*, 2006 – URL: http://www.goek.tu-freiberg.de/oberseminar-/OS_05_06/katja_heinke.pdf (2007-06-05)
- IATA 2007** INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *New financial forecast*, 2007 – URL: http://www.iata.org/NR/rdonlyres/DA8ACB38-676F-4DB1-A2AC-F5BCEF74CB2C/0/Industry_Outlook_Sep07.pdf (2007-09-05)
- ICAO 2007** INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION NEWS: *Growth in air traffic projected to continue to 2025*, 2007 – URL: http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200708_e.pdf (2007-09-23)
- ICAO 2007a** INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION ENVIROMENTAL UNIT: *Aircraft Noise*, 2007 – URL: <http://www.icao.int/icao/en/env/noise.htm> (2007-11-14)
- IPCC 1999** INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: *Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- IPCC 2007** INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: *Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4) - Klimaänderung 2007 - Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger*, 2007 – URL: <http://www.proclim.ch/products/IPCC07/de/IPCC2007-FullDocument.pdf> (2007-09-21)
- Jupp 2007** JUPP, JEFF: *The Impact of Aviation on the Environment: How will the future for Air Transport be Affected?*, 2007 – URL: www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2007_01_25_RAeS_Environment.pdf (2007-09-01)

- Kühl 2000** KÜHL, W.; Niehuis, R.; Stöcker, U.: *Brennstoffeinsparung und Schadstoffvermeidung durch Fluzeugschlepp*. DGLR Jahrestagung in Leipzig, 2000
- Lufthansa 2006** LUFTHANSA: *Vier Säulen für den Klimaschutz*, 2006 – URL: http://konzern.lufthansa.com/de/downloads/verantwortung/lh_viersaehlen.pdf (2007-06-06)
- Lufthansa 2007** LUFTHANSA: *Balance 2007 (Nachhaltigkeitsbericht)*, 2007 – URL: http://konzern.lufthansa.com/de/downloads/presse/downloads/publikationen/lh_nachhaltigkeitsbericht_2007.pdf (2007-10-09)
- NASA 2007** NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - Aerospace Research and Technology for Vision 2050: *Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics* – URL: http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=10518&page=5 (2007-11-06)
- Montgomery 2007** MONTGOMERY, JOSHUA: *Aircraft Primary Structure and Materials*, 2007 - URL: <http://www.nianet.org/workshops/quietaircraft.php> (2007-10-12)
- München Airport 2005** FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH: *Umweltbericht 2005*, 2005 – URL: http://www.munich-airport.de/Mediapool/Content/Download/pubs/DE/UM_Erklaerung_2005_D.pdf (2007-10-12)
- München Airport 2006** FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH: *Perspektiven- Verkürzte Umwelterklärung 2006*, 2006 – URL: http://www.munich-airport.de/Mediapool/Content/Download/pubs/DE/UM_Erklaerung_kurz.pdf (2007-10-12)
- München Airport 2007** FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH: *Webseite* - URL: <http://www.munich-airport.de/DE/Areas/Company/UmweltUmland/index.html> (2007-11-01)
- Recksiek 2004** RECKSIEK, Martin; Airbus Deutschland GmbH: *Hochauftriebssysteme - von der Flugzeugkonfiguration zur Systementwicklung*, 2004 – URL: http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text-_2004_12_16_Hochauftriebssysteme.pdf (2007-07-07)

- Rossow 2007** ROSSOW, C.-C.: *ACARE goals and DLR-Contributions for Reduction of Aviation Climate Impact*, 2007 – URL: http://www.dlr.de/pa/Portaldata/33/Resources/dokumente/ceas/CEAS_WS_Rossow.pdf (2007-12-09)
- Schmid 2004** SCHMID: *Experimentelles Fliegen – FLUGLÄRM* – URL: http://www.ilr.tu-berlin.de/LB/exp_Fliegen_HP/WS_03_04/Veranstaltung4/laerm_II.PDF (2007-11-01)
- Schumann 1999** SCHUMANN, Ulrich: *Wie stark beeinflussen die Emissionen des Luftverkehrs Ozon und Klima?*, GAiA 8 no. 1, Nomos Verlagsgesellschaft, Seite 19 – 27
- Schumann 2000** SCHUMANN, Ulrich: *Effects of Aircraft Emissions on Ozone, Cirrus Clouds and Global Climate*. In: *Air & Space Europe*. Vol.2. No.3. – URL: <http://www.aeronet.org/lib/articles/029-033%20schumann.pdf> (2007-05-05)
- Scholz 2007** SCHOLZ, Dieter: *Forschungsprojekt - Grüner Frachter* – URL: <http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF.html> (2007-11-14)
- Stoker 2007** STOKER, ROBERT: *Environmental Benefits - World Environmental Trends and Boeing's Planned Response*, 2007 – URL: <http://www.nianet.org/workshops/quietaircraft.php> (2007-10-12)
- SoBAC 2001** SOCIETY OF BRITISH AEROSPACE COMPANIES: *Air Travel – Greener by Design The Technology Challenge*, 2001 – URL: http://www.greenerbydesign.org.uk/_INCLUDESPHP/redir.php?p=16 (2007-05-12)
- UBA 2007** UMWELTBUNDESAMT: *Info Broschüre*, 2007 – URL: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3203.pdf> (2007-05-04)
- UBA 2007a** UMWELTBUNDESAMT: *Umweltprobleme durch den Betrieb von Flughäfen* – URL: www.umweltdaten.de/verkehr/downloads/flughumw.pdf (2007-05-10)

- UBA 2007b** UMWELTBUNDESAMT: *Definition Fluglärm*, 2007 – URL: <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/hauptlaermquellen/luftverkehrs-laerm.html> (2007-07-14)
- UGA 2007** UMWELTGUTACHTERAUSSCHUSS: *Webseite zu EMAS, Eco-Management and Audit Scheme*, 2007 – URL: <http://www.emas.de/unterrubrik-8.html> (2007-12-12)
- Unique 2007** UNIQUE (FLUGHAFEN ZÜRICH AG): *Flugzeuge und Lufthygiene*, 2007 – URL: http://www.unique.ch/dokumente/umw_Flugzeuge-und_Luft-ygiene.pdf (2007-11-12)
- VCD 2006** VERKEHRSClub DEUTSCHLAND: *VCD Fakten Reduzierung der Umweltfolgen des Flugverkehrs*, 2006 – URL: http://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/redakteure/themen/flugverkehr/VCD_Flugverkehr.pdf (2007-10-12)
- Wagner 2004** WAGNER, Ralf: *Zwischen Verkehrswachstum und Umweltinteressen - Die deutschen Verkehrsflughäfen im Spannungsfeld*, 2004 – Präsentation im Rahmen des DGLR-Symposium in Bremen: Nachbar Flughäfen
- Wagner 2006** WAGNER, Ralf: *Zwischen Verkehrswachstum und Umweltinteressen - Die deutschen Verkehrsflughäfen im Spannungsfeld*. Unterlagen zur Präsentation in Bremen, November 2006

Anhang A

Vergleich von Einzelschallquellen

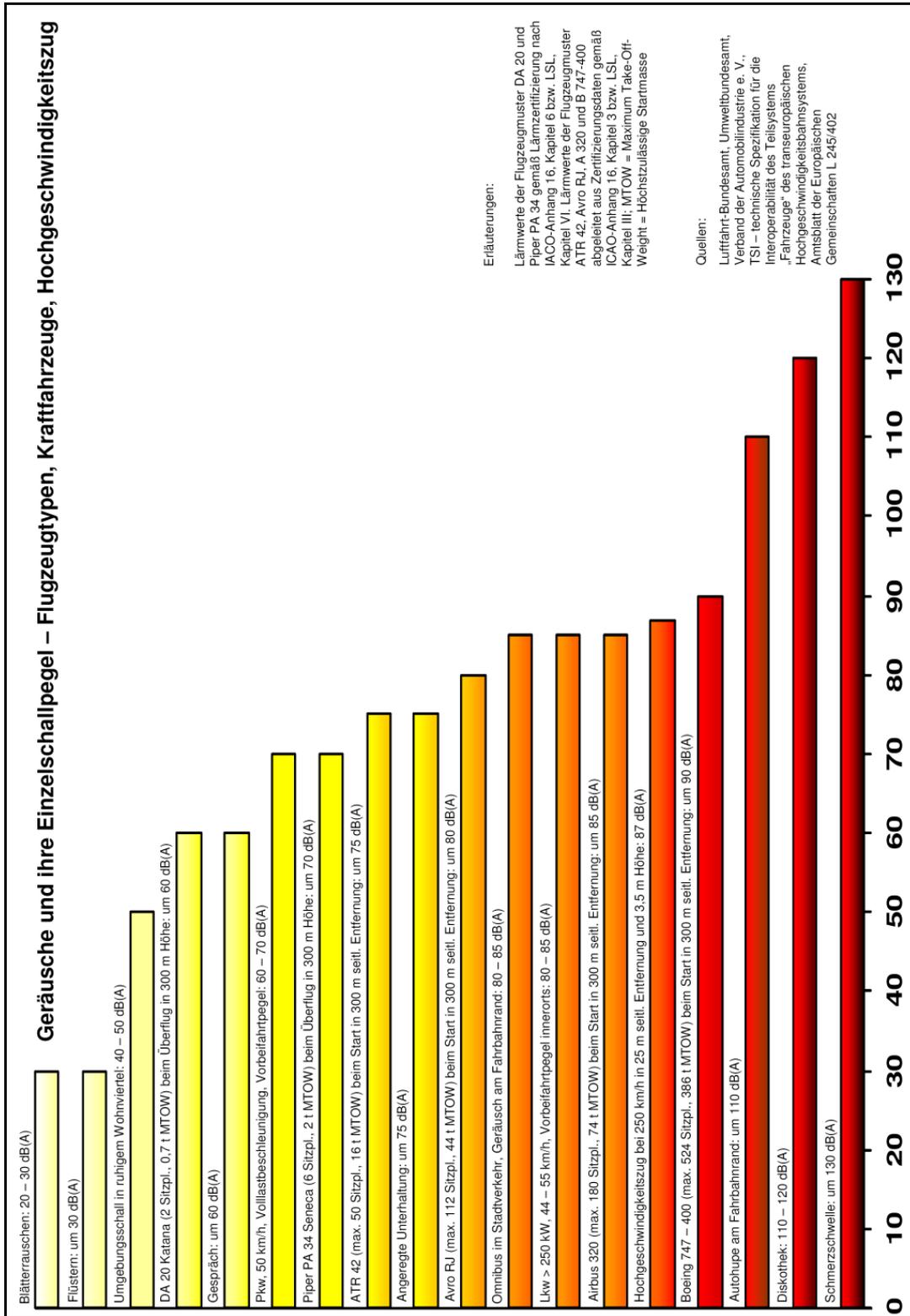


Bild A.1

Geräusche und ihre Einzelschallquellen (ADV 2007c)

Anhang B

Lärmpegel gemäß Lärmzertifizierung

Flugzeugtyp		MTOW (in t)	Anzahl der Triebwerke	Lärmpegel gemäß Lärmzertifizierung nach ICAO-Anhang 16 (in EPNdB) Umrechnung: dB(A) = EPNdB – 13		
				Start	Seitenlinie	Landung
Mit Strahlantrieb	A 380-800	560	4	93,7	95,3	97,9
	B 747-400	386	4	99,0	98,3	103,3
	MD 11	280	3	93,8	96,4	104,1
	A 340-300	254	4	94,4	94,7	97,2
	A 340-600	368	4	93,5	95,5	99,9
	B 777-200	243	2	90,9	95,1	99,2
	A 330-300	212	2	91,6	97,4	98,6
	B 767-300	185	2	93,2	97,0	100,2
	A 300-600	165	2	89,8	96,7	99,9
	A 310-300	153	2	88,0	94,7	98,4
	B 757-200	109	2	88,1	93,8	97,2
	A 321-100	83	2	86,9	95,5	95,4
	A 320-200	74	2	88,0	94,4	96,2
	B 737-800	79	2	88,6	92,1	96,5
	MD 87	68	2	89,2	97,1	93,3
	A 319-200	64	2	83,8	92,3	92,8
	B 737-500	53	2	83,8	89,9	99,8
	Avro RJ 85	44	4	84,3	88,4	97,3
	Fokker 100	43	2	83,4	89,3	93,1
	Embraer 170	36	2	83,0	94,1	98,1
Canadair RJ	23	2	78,6	82,2	92,1	
Mit Propeller- turbinen	Saab 2000	23	2	79,1	86,9	87,9
	ATR 72-200	22	2	86,5	84,7	94,1
	Fokker 50	20	2	86,8	90,5	94,2
	Dash 8-300	19	2	79,8	87,0	96,3
	ATR 42-300	16	2	82,6	83,8	96,8
	Dash 8-100	16	2	79,8	86,1	97,5
	Dornier 328	14	2	82,7	83,8	94,8
	Saab 340	12	2	77,3	86,0	90,8
	Embraer 120	11	2	81,3	84,0	92,7

*Quelle: Flight International "Airliners of the world, 1995"
 **Quelle: LBA-Lärm listen 1 und 2 vom 18.01.2005

Bild B.1

Lärmpegel gemäß Lärmzertifizierung nach ICAO-Anhang 16 (ADV 2007a)

Anhang C

Footprints unterschiedlicher Flugzeugtypen

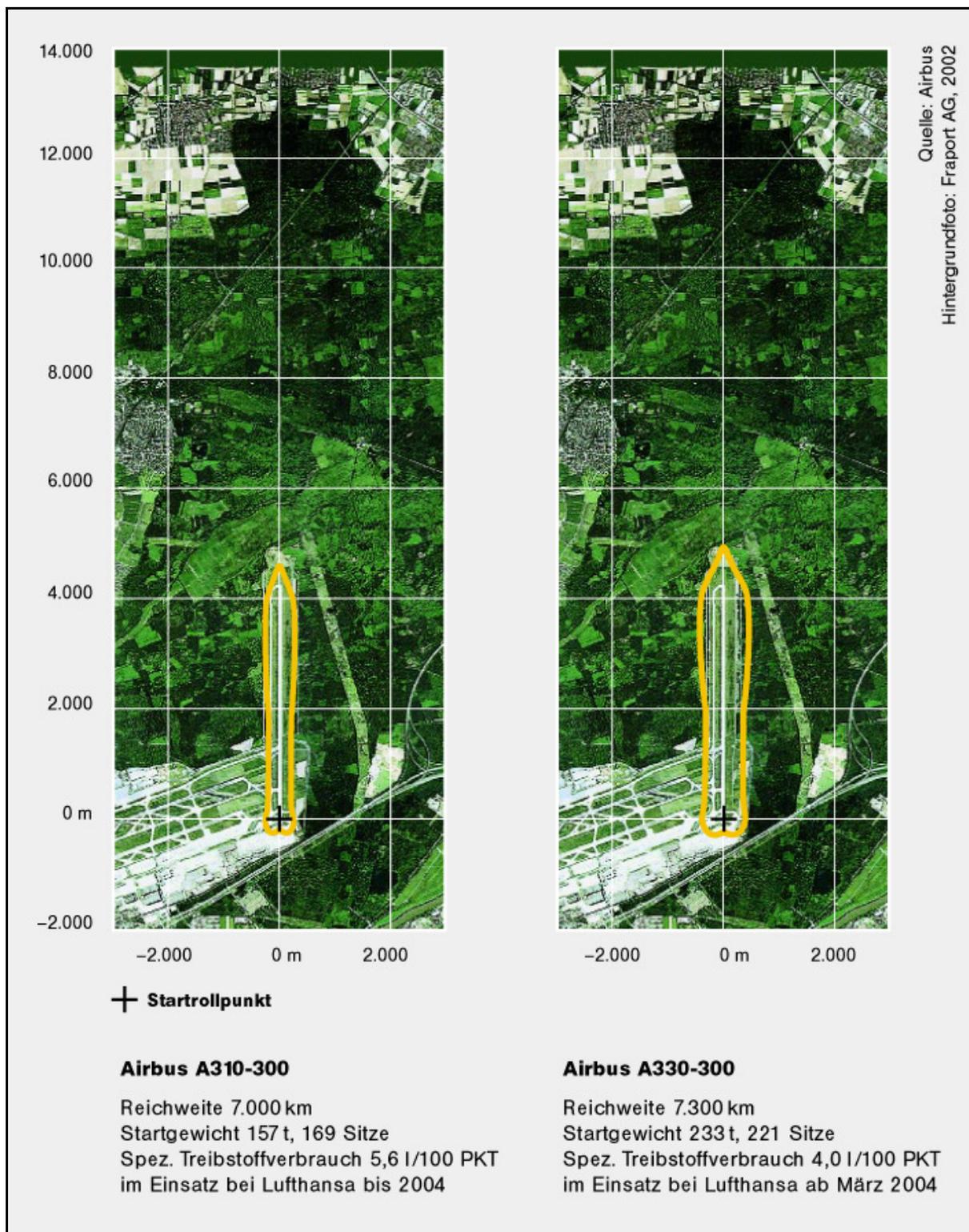


Bild C.1

85 dB Lärmkontur einer A310-300 gegenüber einer A330-300 (ADV 2007b)

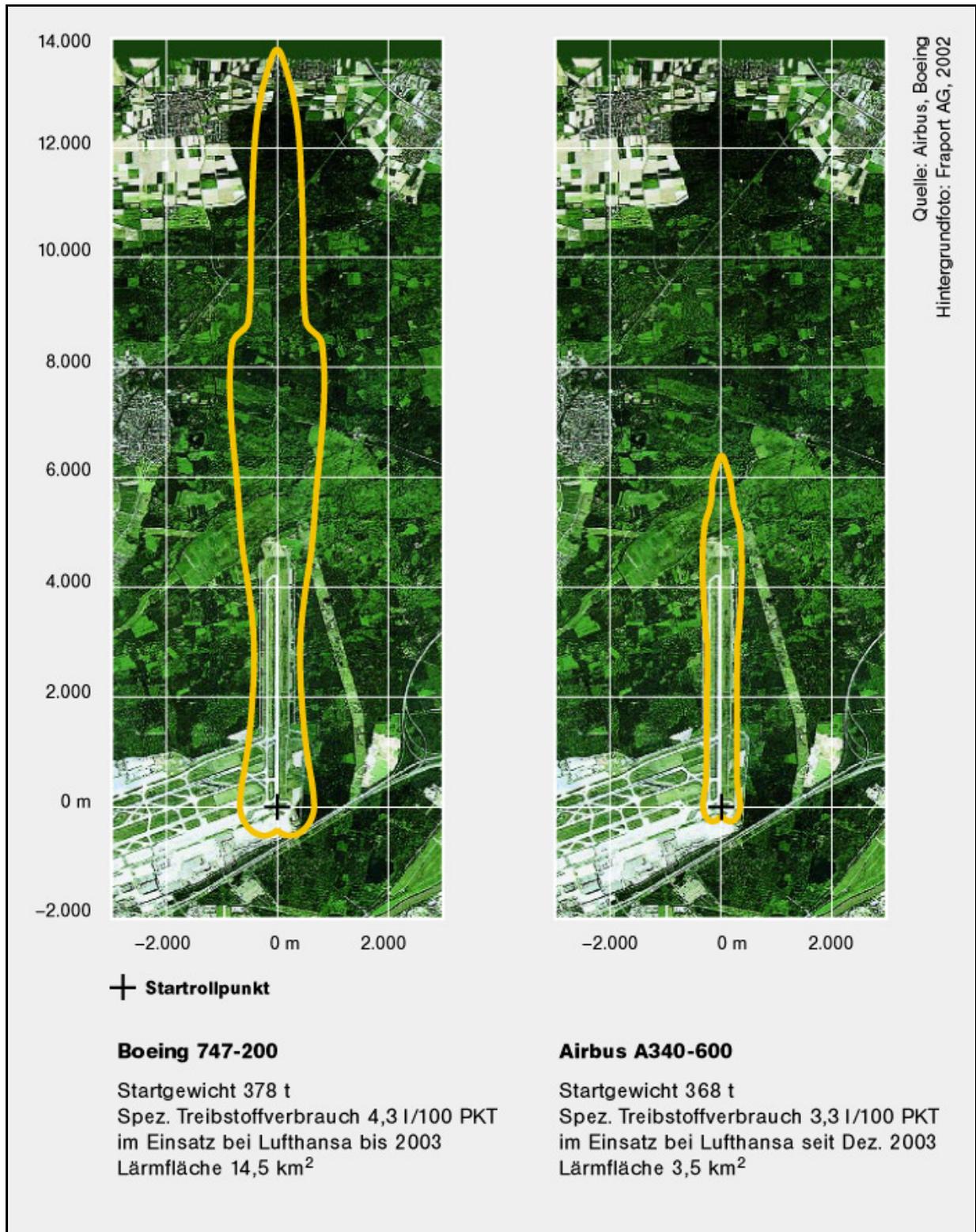


Bild C.2 85 dB Lärmkontur einer 747-200 gegenüber einer A340-600 (ADV 2007b)

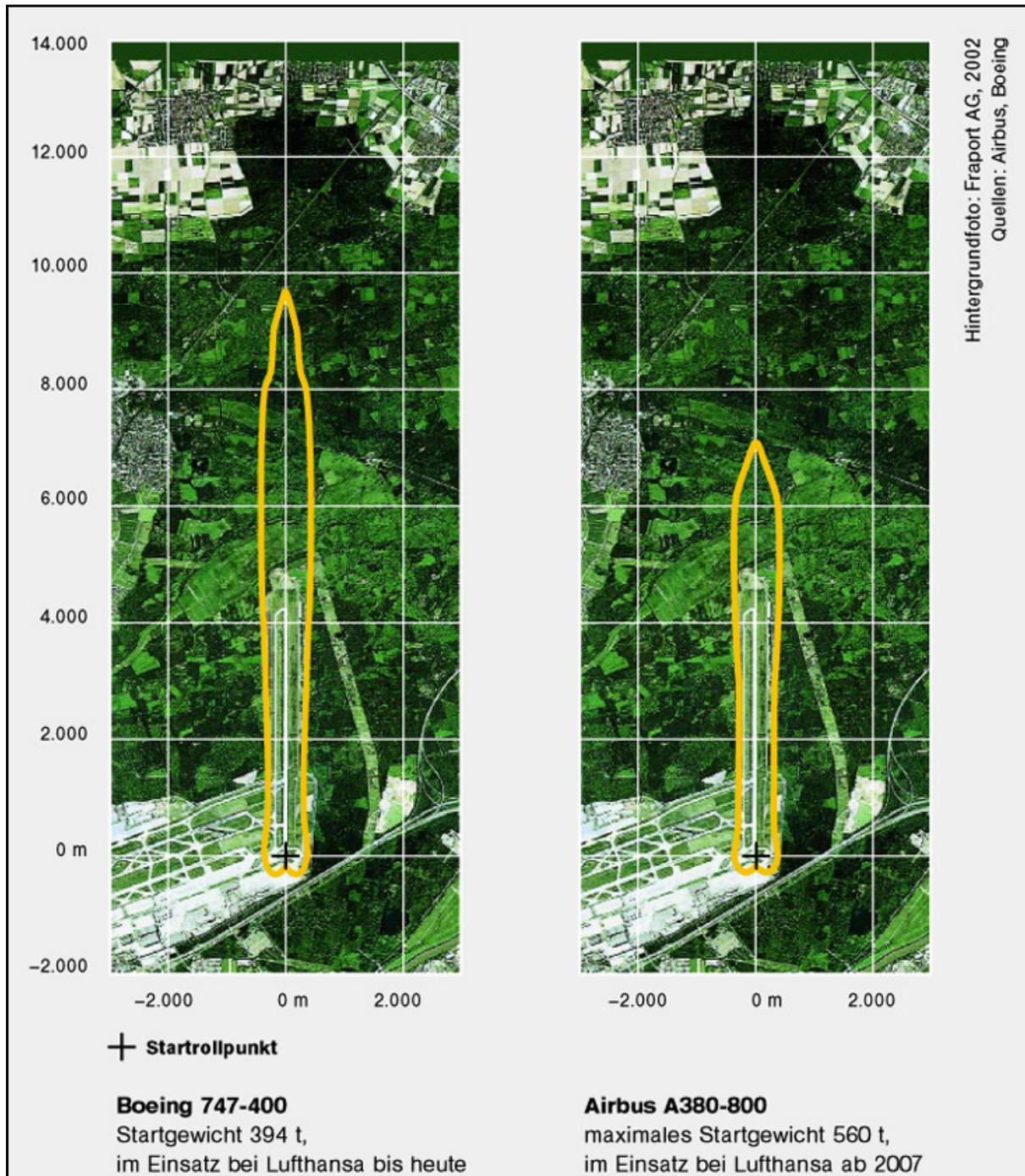


Bild C.3 85 dB Lärmkontur einer 747-400 gegenüber einer A380-800 (ADV 2007b)

Anhang D

Berechnungsbeispiel:

NO₂-Emissionsbelastung in Zürich (2000)

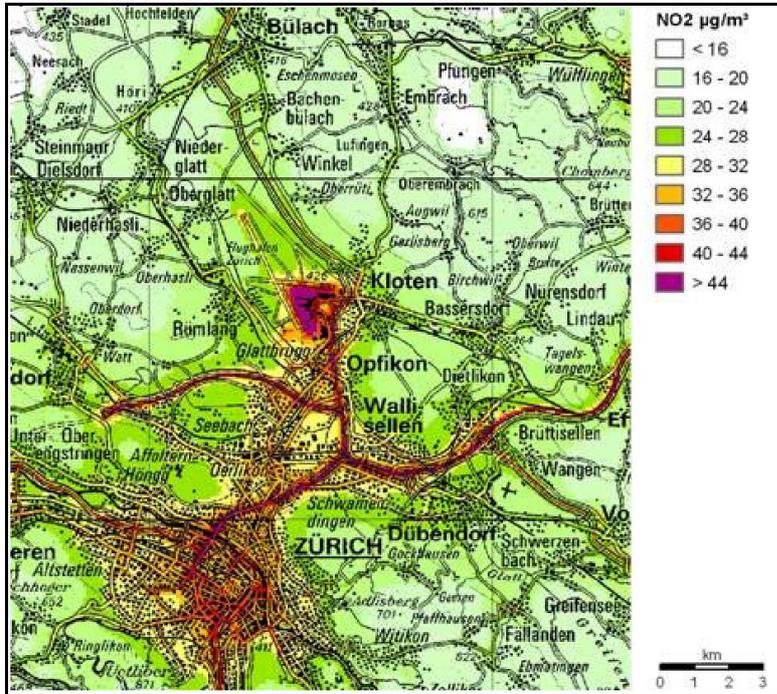


Bild D.1 Gesamtbelastung Region, d.h. inkl. aller Emissionsquellen (Wagner 2004)

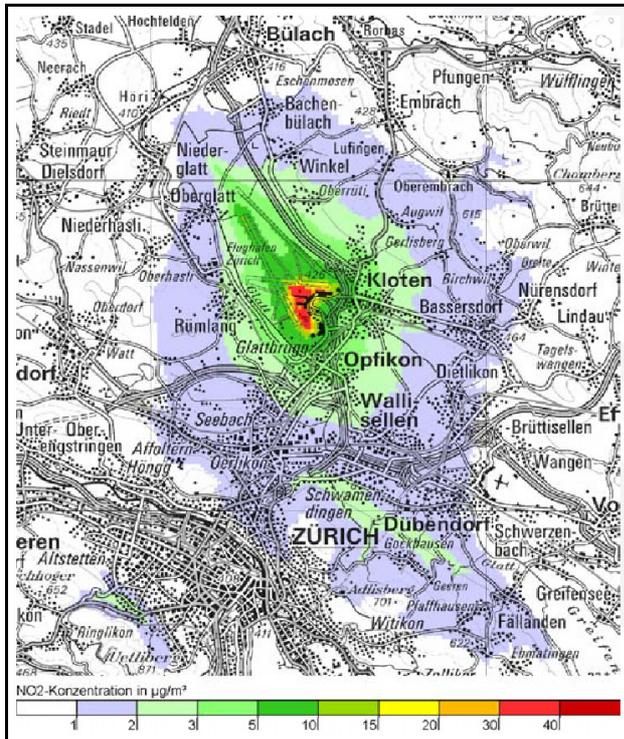


Bild D.2 Zusatzbelastung durch Flughafen (Wagner 2004)

Anhang E

Emissionen aus Turbofantriebwerken in Prozent

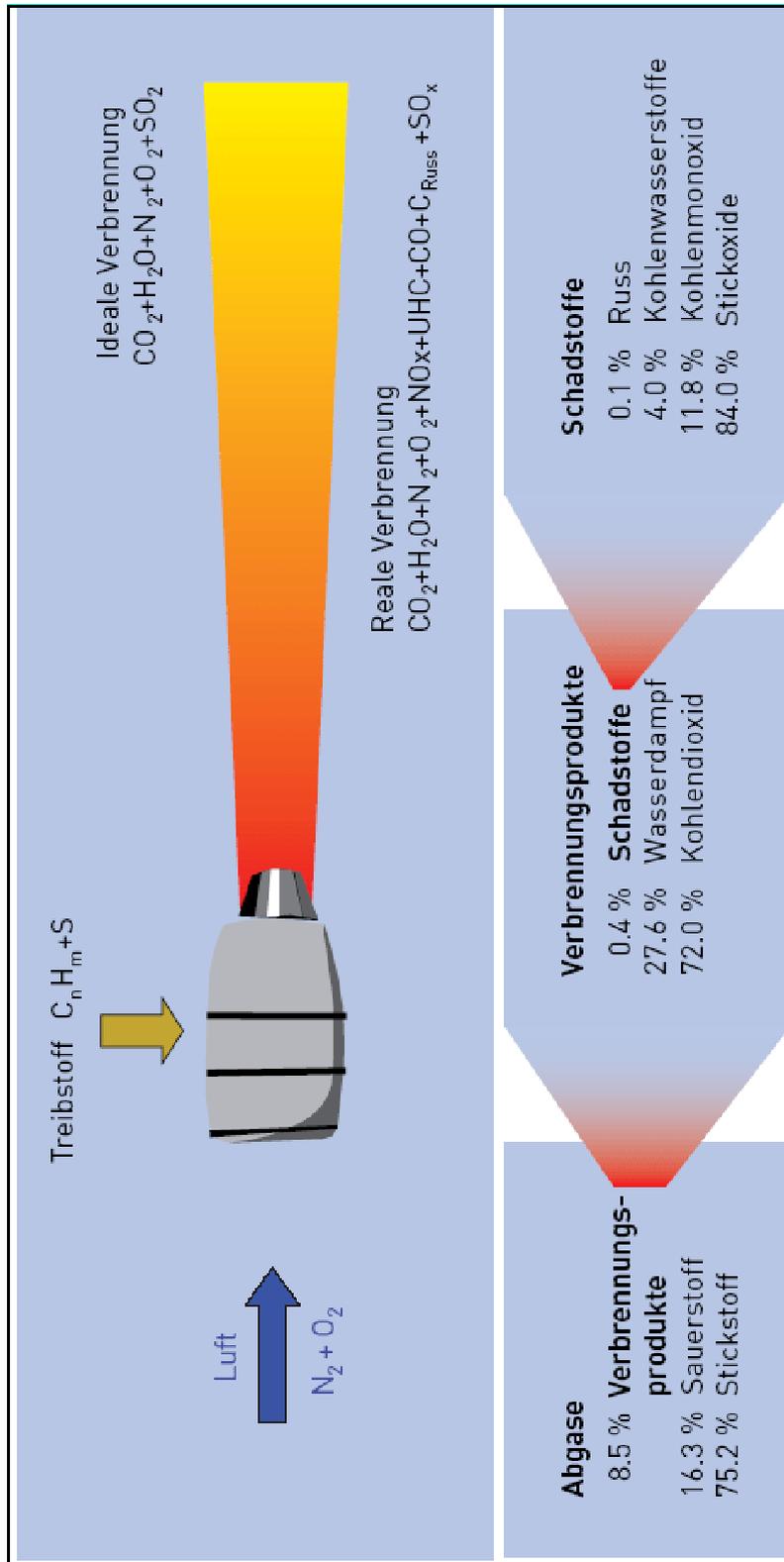


Bild E.1

Emissionen aus Turbofantriebwerken in Prozent (Unique 2007)

Anhang F

Potential der Materialtechnologie und verbundwerkstoffgerechte Konstruktion

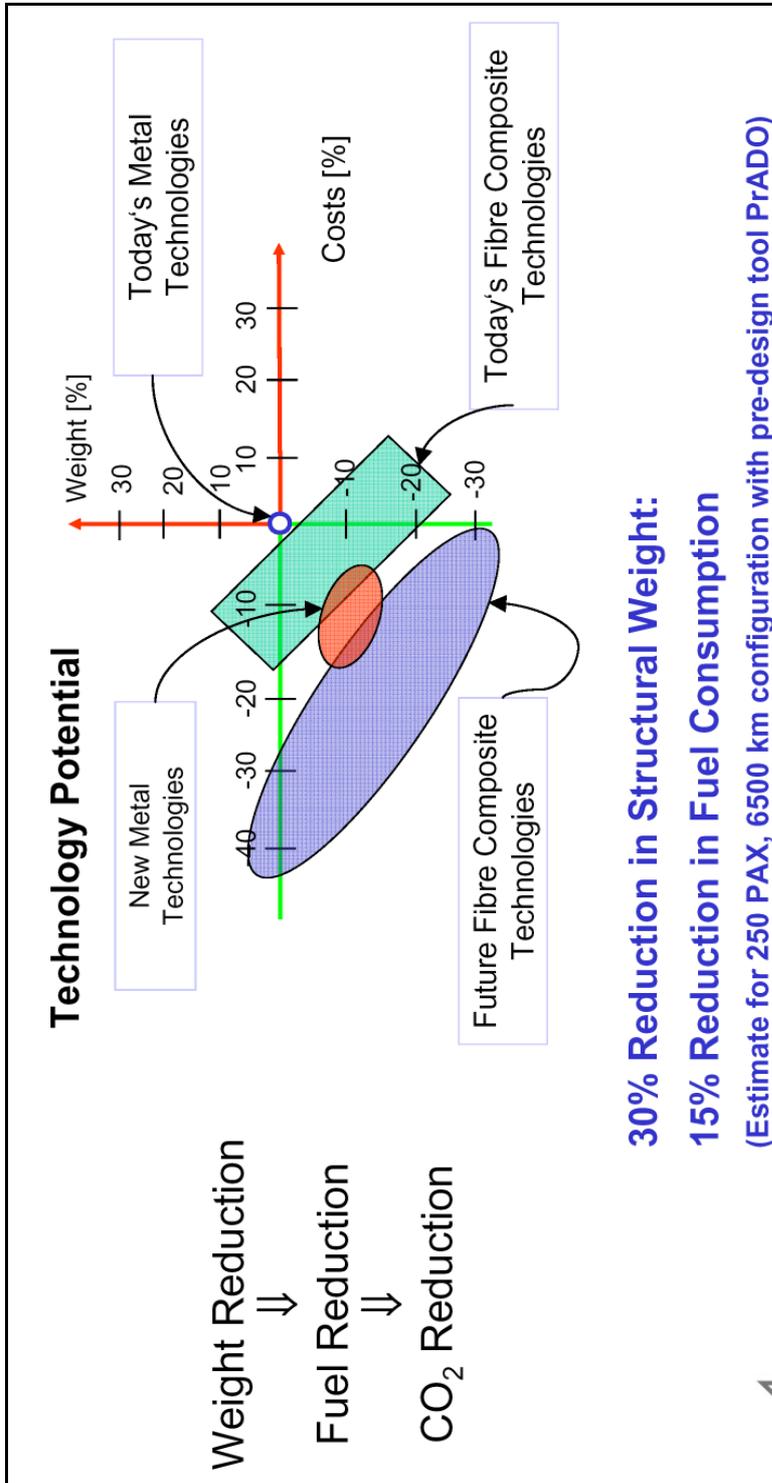
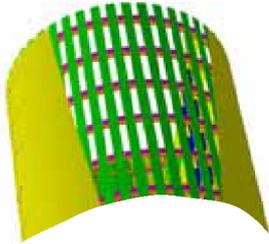


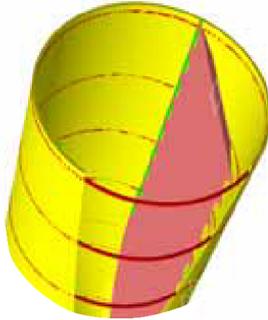
Bild F.1 Potential der Metalltechnologie (Rossow 2007)

Laminate Skin-Stringer



- Advantages
 - Damage Resistance, Inspection, Repair
 - Interface to systems, parts
 - Tailored Properties
- Challenges
 - Fabrication Costs
 - Tooling & Capital Equipment

Honeycomb



- Advantages
 - Structurally Efficient, Lightweight,
 - Ease of Repair
 - Rapid fabrication, lower manufacturing cost
- Challenges
 - Damage Resistance, moisture, inspection
 - More difficult to integrate point loads, interfaces

Anisogrid



- Advantages
 - Structural Efficiency, Reduced Fabrication Costs
 - Lightest of all
- Challenges
 - Damage Resistance, Repair
 - Analysis Methods, Material Allowables
 - Cut-outs and internal attachments

Bild F.2

Beispiele für die verbundwerkstoffgerechte Konstruktion (Montgomery 2007)

Anhang G

Ansätze und Konfigurationen der Zukunft

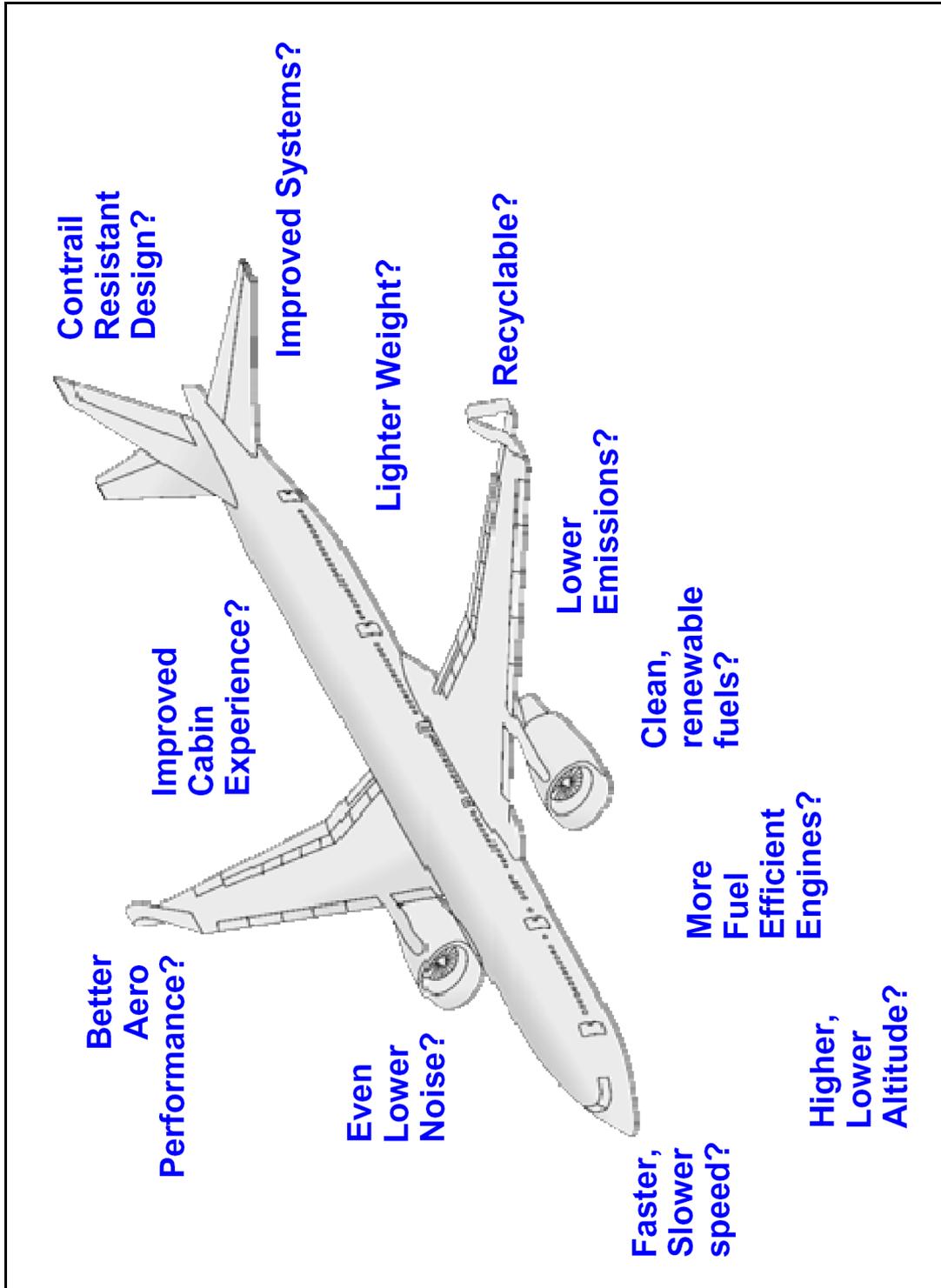


Bild G.1

Mind Map mit Lösungsansätzen und Fragestellungen (Stoker 2007)

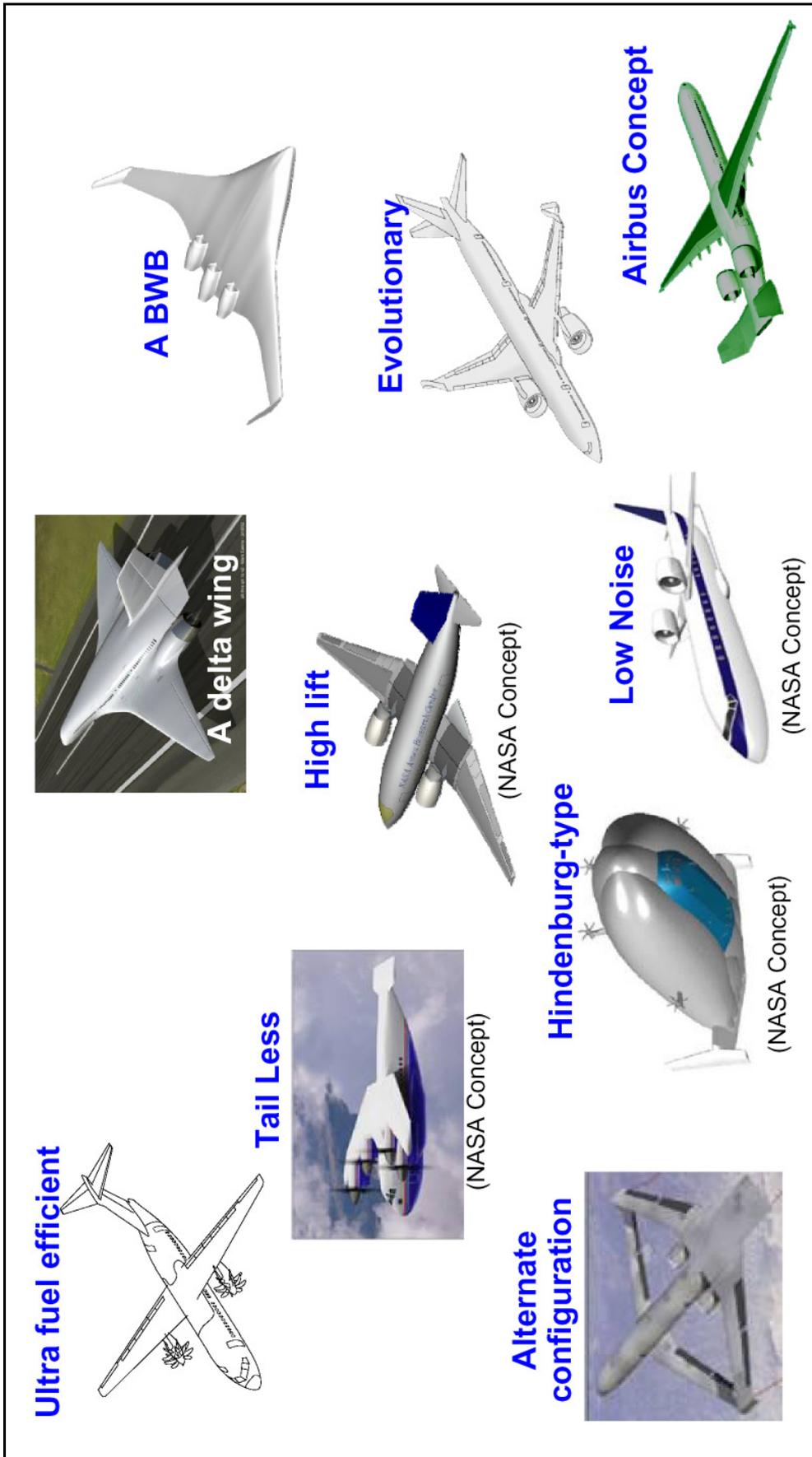


Bild G.2 Mögliche zukünftige Flugzeugkonfiguration (Stoker 2007)

Anhang H

Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics of 2002

<p>NASA Goals and Objectives</p> <p>Safety</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accident rate reduced 90% in 25 years <p>Capacity</p> <ul style="list-style-type: none"> • Triple the capacity of the air transportation system in 25 years <p>Mobility</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduce intercity door-to-door transportation time by 67% in 25 years • Reduce long-haul transcontinental travel time by 50% in 25 years <p>Technology innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Revolutionary technologies to enable fundamentally new system capabilities <p>Engineering innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Advanced tools, processes and culture to enable rapid, high-confidence, and cost-efficient design of revolutionary systems 	<p>National R&D Plan</p> <p>Safety and security</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risk management • Prevention of accidents and incidents • Reduction of injuries when accidents occur • Reduction of casualties, system disruption, and damage when incidents occur 	<p>2050 Vision</p> <p>Safety and security</p> <ul style="list-style-type: none"> • No fatalities or injuries • Human-centered systems to compensate for human error • Education and training for operators and users (lifetime learning) • A accident prevention • Reduction of injuries when accidents occur • Prevention of incidents: reduction of casualties when incidents occur without disrupting normal operations 	<p>Next Generation Air Transportation System</p> <p>Safety and security</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decentralized air transportation system to improve safety in case of system failure, human error, or terrorist attack 	<p>NASA Aeronautics Blueprint</p> <p>Safety and security</p> <ul style="list-style-type: none"> • Improved situational awareness in all weather • Aircraft health monitoring systems, self-healing systems, and adaptive fault-tolerant controls to respond to system failures and human error • Aircraft hardening to withstand explosions • Improved monitoring of projected flight paths to prevent aircraft collisions and detect unauthorized diversions • Prevention of malicious or ill-advised pilot actions from causing an accident • Automated passenger identification and threat assessment 	<p>European Aeronautics: A Vision for 2020</p> <p>Safety</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduce accident rate by 80% • Aircraft systems that lighten the burdens on the crew, help them make correct decisions, and reduce the impact of human error • Higher standards of training • Monitoring systems that react to technical problems as they occur
<p>National Airspace System</p> <ul style="list-style-type: none"> • Improve system capacity, capabilities, cost-effectiveness, and services • Architecture definition and evolution • Architecture implementation • Improving air traffic operations • Involving air traffic controllers in developing new systems and associated training • Human factors research for controller operations, system maintenance, and improved weather services • Developing breakthrough technologies to meet growing demand 	<p>Efficiency</p> <ul style="list-style-type: none"> • Automated management of the airports and airspace for all types of aircraft, day and night, in all weather conditions • Cultural and institutional changes • Radically new air transportation management systems • System definition tools 	<p>Efficiency</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrated • Intermodal <p>Advanced technology</p> <ul style="list-style-type: none"> • Improved transportation system definition tools and vehicle design tools and methods • Optimized vehicle and system operations • New classes of super-efficient, intelligent, reliable, and environmentally friendly vehicles 	<p>National Airspace System</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weather • Reduced impact of low visibility • Better observation and prediction of adverse weather and vortices • Traffic optimization • Automated, distributed air traffic management • High-capacity airports • Integrated arrival, departure, and surface decision-support tools • Synthetic vision systems for aircraft • Airport design and operation models • Smart nontowered airports • CNS • Satellite-based CNS systems • Active and passive precision navigation/surveillance systems <p>Revolutionary vehicles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Global range • Supersonic speed • Vertical lift and extremely short takeoff and landing • Long-duration uninhabited aircraft • Nanotechnology, variable aerodynamic shapes, and advanced propulsion and power systems 	<p>National Airspace System</p> <ul style="list-style-type: none"> • System capacity increased • 200% in all weather conditions • Sophisticated ground- and satellite-based CNS systems • Free flight • Airports freed of noise-related operating restrictions • Air transportation integrated into an efficient multimodal transportation system • Integrated ATM system that is so effective it becomes the de facto world standard <p>Educational policies to provide skilled aeronautics workforce</p> <p>Aircraft design and production</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrated design, manufacturing, and maintenance systems • Large-capacity aircraft (~1,200 passengers) • Supersonic speed • Innovative vertical takeoff and landing 	<p>Air transportation system</p> <ul style="list-style-type: none"> • System capacity increased • 200% in all weather conditions • Sophisticated ground- and satellite-based CNS systems • Free flight • Airports freed of noise-related operating restrictions • Air transportation integrated into an efficient multimodal transportation system • Integrated ATM system that is so effective it becomes the de facto world standard <p>Educational policies to provide skilled aeronautics workforce</p> <p>Aircraft design and production</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrated design, manufacturing, and maintenance systems • Large-capacity aircraft (~1,200 passengers) • Supersonic speed • Innovative vertical takeoff and landing

Tab. H.1 Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics (2002) (NASA 2007)

<p>Noise</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perceived noise of new aircraft reduced 75% in 25 years <p>Emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> • NO_x of new aircraft reduced 80% in 25 years • CO₂ of new aircraft reduced 50% in 25 years 	<p>Noise Emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduce emissions of NO_x and other pollutants that affect local air quality • Reduce emissions that affect global climate or stratospheric ozone 	<p>Compatibility with the environment</p> <ul style="list-style-type: none"> • Noise • Land-management techniques • Noxious emissions and greenhouse gases • Energy-efficient air transportation system • Non-carbon-based fuels 	<p>Compatibility with the environment</p>	<p>Educated workforce</p> <ul style="list-style-type: none"> • Motivating the next generation to work in aviation • Lifetime learning for the existing workforce • Multidisciplinary research using virtual laboratories 	<p>Noise</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elimination of noise as a nuisance outside airport boundaries through reduction of perceived noise by 50%; better land planning and use, and systematic use of noise reduction procedures <p>Emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> • CO₂ and NO_x emissions per passenger kilometer reduced by 50% and 80%, respectively, for new aircraft • Lower fuel use through drag reduction (using conventional and novel shapes), fuel additives, and better airframe/engine integration
					<p>Quality and affordability of air transportation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Choice of routes and schedules • 99% on-time departures and arrivals in all weather • Quick airport check-in • Comfortable aircraft accommodations • Reduced costs for operators, passengers, and freight
					<p>Primacy of the European aeronautics industry</p> <ul style="list-style-type: none"> • New framework for companies to work together • Synergies between civil and military research • New standards of quality and effectiveness • Time to market cut in half

Tab. H.2 Comparison of Future Goals and Visions for Civil Aeronautics (2002) (NASA 2007)