

REDUZIERUNG DES DURCH LUFTVERKEHR VERURSACHTEN ATMOSPÄRENSCHADENS DURCH GANZHEITLICHE BETRACHTUNG IM FLUGZEUGVORENTWURF

R. Egelhofer
Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, TU München
Boltzmannstr. 15, D-85747 Garching

ÜBERSICHT

In zahlreichen internationalen Vereinbarungen zur Emissionsreduzierung wird heute dem wachsenden Schaden der Atmosphäre Rechnung getragen. Gemessen an den CO₂-Emissionen spielt der Luftverkehr hier momentan scheinbar eine untergeordnete Rolle. Jedoch machen das verhältnismäßig hohe Wachstum von etwa 4 % pro Jahr sowie der ungewöhnliche Ort dieser Emissionen, nämlich in Reise Flughöhe, eine intensivierte Betrachtung der Umweltproblematik besonders in Bezug auf die Atmosphäre nötig.

Vergangene und gegenwärtige Forschung im Bereich des Flugzeugentwurfs konzentriert sich diesbezüglich zumeist auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch Widerstandsreduzierung in Folge von aerodynamischen Verbesserungen oder leichten Strukturen. Auf Triebwerksseite sucht man eine Reduzierung des spezifischen Verbrauchs oder der Schadstoffemissionen (Emissionsindizes) zu erreichen. Beide Bereiche werden separat betrachtet.

Um den durch den Luftverkehr verursachten Schaden an der Atmosphäre weiter zu reduzieren, ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Systems Flugzeug sinnvoll. Dazu wurde eine Methodik erarbeitet, die die Verknüpfung des Flugzeugentwurfs mit Marktforschung und Atmosphärenwissenschaften erlaubt.

Angesichts der klimapolitischen Entwicklungen (z.B. Kyoto-Protokoll) sind in absehbarer Zeit Umwelt- oder Emissionsabgaben im Luftverkehr zu erwarten. Flugzeughersteller müssen daher beim Flugzeugentwurf unter Berücksichtigung der globalen Auswirkungen ihrer Produkte einer stetig verbesserten Umweltverträglichkeit Rechnung tragen, um sich im globalen Wettbewerb behaupten zu können.

1. EINLEITUNG: EINFLUß VON LUFTVERKEHR AUF DEN KLIMAWANDEL

Umweltverschmutzung rückt in unserer Gesellschaft immer mehr ins Rampenlicht, seit ihre Auswirkungen wissenschaftlich untersucht und nachgewiesen werden. Auch die Luftfahrtindustrie muß sich heute dieser Thematik stellen.

Umweltschutz bei der Produktion oder bei der Wiederverwertung von Flugzeugen wird zumeist nur von Spezialisten thematisiert; der Betrieb von Flugzeugen spielt aber politisch eine große Rolle und wird in der Gesellschaft von Laien und Fachleuten gleichermaßen kontrovers diskutiert.

Primär sind hierbei die Lärm- und Triebwerksabgasemissionen relevant. Bei letzteren unterscheidet man „lokale“ Emissionen im Flughafennahbereich und „globale“ Emis-

sionen im Steig-, Reise- und Sinkflug. Lokale Emissionen wirken sich vor allem auf die Luftqualität am und um den Flughafen und damit auch auf die Gesundheit der Beschäftigten und der Anwohner aus. Globale Emissionen beeinträchtigen die Atmosphäre. Der Fokus dieses Aufsatzes liegt bei den globalen Emissionen.

Die beiden wichtigsten klimatologischen Phänomene in diesem Zusammenhang sind das Ozonloch und die Erwärmung der Atmosphäre durch den Treibhauseffekt. Während der zivile Unterschall-Luftverkehr nach heutigem Kenntnisstand keinen wesentlichen Beitrag zum Abbau des Ozons in der Stratosphäre (Ozonloch) liefert [1][2], wurde der Anteil des Luftverkehrs am anthropogenen Treibhauseffekt für 1992 mit 3,5 % abgeschätzt, wobei der Anteil des anthropogenen CO₂-Ausstoßes aber nur 2 % betrug [3]. Diese Zahlen lassen vermuten, daß der Luftverkehr in der Diskussion um die globale Erwärmung nur eine untergeordnete Rolle spiele. Jedoch machen das hohe Wachstum der Branche sowie die Sonderstellung in Bezug auf den Ort der Emissionen – hoch in der Atmosphäre¹ - eine intensivierte Betrachtung der Thematik nötig.

Neben der Effizienzsteigerung der Luftverkehrskontrolle und der dazu verwendeten Technologien ist das Fluggerät selbst Ansatzpunkt zur Minimierung der durch den Luftverkehr verursachten Umweltschäden. Der heute bereits hohe Grad an umwelttechnischer Effizienz von Flugzeugen und Triebwerken erfordert zur weiteren Verbesserung neue Entwurfsmethoden und -bewertungen. In diesem Aufsatz soll eine ganzheitliche Betrachtungsweise vorgeschlagen werden, die eine umweltmäßige Bewertung von Konzepten und damit neue Möglichkeiten zum atmosphärenfreundlichen Flugzeugentwurf eröffnet.

2. GRUNDLAGEN DER KLIMATOLOGIE

Die luftfahrttechnische Ausbildung schließt die Klimatologie gegenwärtig nicht ein. Daher wird ein kurzer Überblick über die zum Verständnis dieses Aufsatzes nötigen Begriffe der Atmosphärenphysik und -chemie gegeben.

2.1. Erdatmosphäre und Strahlungsantrieb

Die Erdatmosphäre wird je nach Bewertungskriterium (z.B. Temperatur) in mehrere Schichten unterteilt. Für den Luftverkehr relevant sind im besonderen die Troposphäre (vom Erdboden bis durchschnittlich 11 km Höhe) und die darüber liegende Stratosphäre (bis ca. 50 km Höhe). Zwischen beiden Schichten befindet sich die sogenannte

¹ Laut Schumann [4] werden etwa 30 % der Flugzeugabgase in die Stratosphäre emittiert.

Tropopause, eine atmosphärische Trennschicht, deren Höhe zwischen ca. 7 km an den Polen und 17 km in den Tropen variiert. Die Troposphäre enthält im Verhältnis viel Wasserdampf, starke Luftbewegungen sind horizontal und vertikal zu beobachten. Nahezu das gesamte Wettergeschehen spielt sich hier ab. Die Stratosphäre ist im Gegensatz dazu sehr trocken, es gibt starke horizontale Winde. Zwischen Troposphäre und Stratosphäre kommt es zu wenig Stoffaustausch, jedoch wechselwirken die beiden Schichten bezüglich des Strahlungshaushaltes.

Flugzeuge emittieren in beiden Schichten, je nach Missionsabschnitt (Flughöhe) und Ort (Breitengrad). Da die beiden Schichten sehr unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen, müssen auch die Auswirkungen von Flugzeugabgasen differenziert betrachtet werden. Von den entsprechenden Forschungseinrichtungen werden hierzu aufwendige Computermodelle verwendet. Mit ihrer Hilfe kann der sogenannte Strahlungsantrieb einer Störung des thermischen Gleichgewichts der Atmosphäre ermittelt werden. Der Strahlungsantrieb steht für die Bilanz von in die Atmosphäre hineingerichteter und aus ihr herausgehender Strahlung und wird zumeist an der Tropopause abgegriffen. Der Strahlungsantrieb kann für gut durchmischte Gase wie Kohlendioxid mittels eines Klimasensitivitätsparameters linear in eine Temperaturänderung überführt werden [5]. Für inhomogen verteilte Substanzen ist diese Annahme ungenau. Trotzdem wird der Strahlungsantrieb mangels besserer Alternative als objektiver Anhaltswert für die Klimawirkung heute überall in der entsprechenden Fachliteratur verwendet (s. Kap. 4.3).

2.2. Umweltwirkung von Flugzeugabgasen

Im Gegensatz zu anderen Transportmitteln, die ausschließlich in die atmosphärische Grenzschicht nahe dem Erdboden emittieren, bringen Flugzeuge Schadstoffe auf Reiseflughöhe in die Atmosphäre ein. Diese globalen Emissionen müssen gesondert betrachtet werden, da sie sich anders auf die Atmosphäre auswirken als erdnahe Emissionen anderer Emittenten oder lokale Flugzeugemissionen. Obwohl das Hauptaugenmerk dieses Aufsatzes auf den globalen Emissionen liegt, werden die lokalen Emissionen nicht außer Acht gelassen, da eine industrielle Anwendung immer einen Kompromiß verschiedener Entwurfparadigmen voraussetzt und eine zu einseitige Behandlung der Umweltproblematik vermieden werden soll.

Als primäre Schadstoffe in Flugzeugabgasen sind Kohlendioxid und Stickoxide identifiziert. Des Weiteren sind Kondensstreifen und dadurch verursachte lang anhaltende Zirrenbewölkung einer potentiell hohen Klimawirkung verdächtig.

Kohlendioxid ist allgemeint anerkannt das Treibhausgas Nummer eins. Durch seine lange Verweildauer in der Atmosphäre ist es gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt. Seine Wirkung ist daher unabhängig von seiner Herkunft, (z.B. Wärmeerzeugung, Straßenverkehr, Flugzeugabgas). Luftverkehr verursachte im Jahr 1992 global etwa 2 % aller Kohlendioxidemissionen [3].

Stickoxide spielen eine wichtige Rolle für die Luftqualität im Flughafennahbereich (-> Smog). Im Reiseflug wird ihnen vor allem in großen Höhen (über der Tropopause) durch ihre Wirkung auf die Ozon- und Methankonzentration ein nennenswerter Beitrag zum Treibhauseffekt zugeschrieben (s. BILD 1).

Wasserdampf ist das mengenmäßig zweitwichtigste Triebwerksabgas (~1,2 kg pro kg verbrauchtem Treibstoff). Er ist für rund zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffektes verantwortlich. Wasserdampfemissionen aus dem Luftverkehr spielen gegenüber dem natürlichen Vorkommen in der Troposphäre direkt keine Rolle für den Treibhauseffekt. Ca. 200 Mt aus dem Luftverkehr stehen ca. 525000 Mt allein aus Verdunstung gegenüber [4]. Die Hintergrundkonzentration in der Stratosphäre ist allerdings so gering, daß ihre Erhöhung durch Emissionen aus dem Luftverkehr prozentual gesehen beträchtlich ist und sich auf den Strahlungsantrieb auswirkt. Viel größer noch als der direkte Strahlungsantrieb des Wassers scheint allerdings seine indirekte Wirkung in Form von Kondensstreifen (englisch „condensation trails“ oder kurz „contrails“) und lang anhaltender Cirrusbewölkung zu sein. Die Bildung von Kondensstreifen und Bewölkung wird durch die Emission von Wasserdampf und die Erhöhung der Anzahl der Kondensationskerne durch den Ausstoß von Ruß und Kohlepartikeln (Aerosole) begünstigt.

Die in IPCC² 1999 [3] veröffentlichten Abschätzungen zur Klimawirkung des Luftverkehrs (3,5 % des anthropogenen Strahlungsantriebs für den Verkehr von 1992) wurden mittlerweile mehrfach aktualisiert. Dabei wurden nicht nur neue Erkenntnisse der Atmosphärenmodellierung, sondern auch aktualisierte Luftverkehrsmarktdaten verwendet. Neuere Publikationen [6][7][8] zeigen für 2000 einen im Verhältnis geringeren luftverkehrsbedingten Strahlungsantrieb als IPCC 1999.

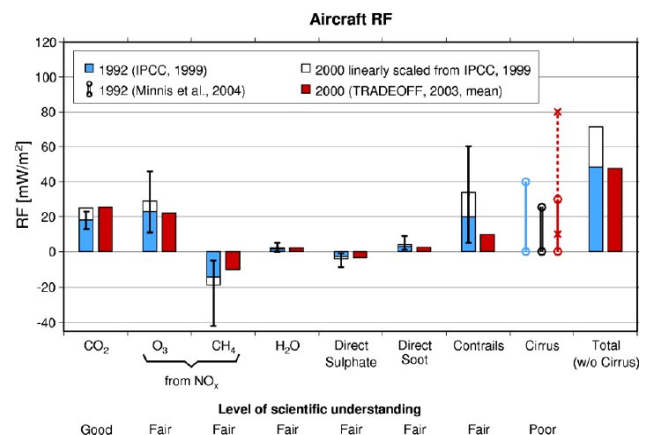


BILD 1. Strahlungsantrieb (RF, siehe 4.3) von Flugzeugen. Vergleich der von IPCC 1999 auf das Jahr 2000 linear hochskalierten Werten mit denen der TRADEOFF-Studie. Graphik aus [7].

In BILD 1 werden die im TRADEOFF-Projekt gewonnenen Werte für den Strahlungsantrieb der einzelnen Komponenten der Flugzeugabgase mit denen in IPCC 1999 veröffentlichten verglichen. Dazu wurden die Werte der Abschätzung von 1999 über den Verkehr von 1992 auf den Verkehr von 2000 linear hochskaliert, da die TRADEOFF-Studie auf Marktdaten für das Jahr 2000 basiert.

Der im Verhältnis geringere Strahlungsantrieb aus der TRADEOFF-Studie ist auf die relative Abnahme der Abschätzung des Strahlungsantriebs von Kondensstreifen (Contrails) zurückzuführen. Allerdings ist hier von der

² IPCC: International Panel of Climate Change. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen als Spezialorganisation der Vereinten Nationen.

Gesamtsumme der Strahlungsantriebe die durch Kondensstreifen verursachte Cirrus-Bewölkung ausgenommen, da ein zuverlässiger Wert für ihren Strahlungsantrieb gegenwärtig nicht ermittelt werden kann. Der Strahlungsantrieb von Contrail-Cirrus ist demnach möglicherweise etwa um eine Größenordnung höher als in IPCC 1999 [3] vermutet, oder ungefähr gleich der Summe der Strahlungsantriebe aller anderen Emissionen. Ein Wert von 50 mW/m² als luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb für das Jahr 2000 ist also als ein relativ wahrscheinlicher³ Minimalwert zu sehen, mit der Option auf eine Erhöhung um bis zu über 100 %.

3. POLITISCHES UMFELD - EMISSIONSREGULARIEN

Im Rahmen des größten diplomatischen Ereignisses des 20. Jahrhunderts⁴, der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro, wurde 1992 das Konzept der „Nachhaltigen Entwicklung“ als internationales Leitbild anerkannt und in der Agenda 21 formalisiert. [9]

Mit dem Kyoto-Protokoll von 1997 wurde der zunächst theoretischen UN-Klimarahmenkonvention eine vertragliche Bindung gegeben, die seit der Ratifizierung des Protokolls 2004 auch in Kraft ist. Der internationale Luftverkehr ist in diesen Rahmen bisher nicht eingebunden. Die Verantwortung zur Emissionsreduzierung im Luftverkehr obliegt weiterhin den Staaten, die diese über die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO wahrnehmen sollen. Der Inlandsluftverkehr ist jedoch in den nationalen Emissionskontingenten und Reduktionszielen eingeschlossen und kann somit in ein Emissionshandelssystem integriert werden.⁵

Derzeit gibt es in der Europäischen Union Diskussionen, Emissionsabgaben auf den Reiseflug einzuführen. Konkrete Informationen, weder zur Höhe dieser Abgaben noch zum Zeitpunkt ihres Inkrafttretens, sind jedoch noch nicht öffentlich verfügbar. Besonders in Großbritannien ist der politische Druck diesbezüglich hoch – der Widerspruch zwischen dem Weißpapier der Regierung zur Förderung des Luftverkehrs und der gleichzeitigen Reduktion von Treibhausgasen wurde erst kürzlich in einem Bericht des Tyndall-Instituts aufgezeigt. Darin wird erklärt, daß bei den aktuellen Annahmen der Wachstumsraten des Luftverkehrs ein Niveau von 550 ppm geschweidenn von 450 ppm CO₂ bis 2050 (gegenwärtig ca. 380 ppm gegenüber 280 ppm im vorindustriellen Zeitalter) nicht gehalten werden kann. [11]

Im Gegensatz zu den sich gegenwärtig noch im Entwurfsstadium befindenden Ansätzen für Reiseflugabgaben sind emissionsbedingte Landegebühren in Schweden, der Schweiz und in London Heathrow längst Wirklichkeit. Diese haben laut eines Berichts des Züricher Flughafens [12] bereits positive Auswirkungen auf das Schadstoffniveau der den Flughafen anfliegenden Flotte gezeigt. Die Luftfahrtämter Schwedens und der Schweiz LFV⁶ und

³ IPCC veröffentlicht nur sehr vorsichtig genaue Werte. Es wird zusätzlich jeweils ein Konfidenzintervall angegeben. An den Berichten sind ca. 2000 Wissenschaftler beteiligt. Jeder Einwand wird berücksichtigt, wodurch das IPCC die momentan glaubwürdigste Quelle bzgl. des Themas ist.

⁴ Teilnahme von 130 Staatschefs

⁵ Eine Studie des CE Delft hat sich 2005 mit dieser Frage auseinander gesetzt: [10]

⁶ LFV: Luftfartsverket

FOCA⁷ haben im Einklang mit ICAO-Richtlinien eine Harmonisierung ihrer Abgabensysteme vorangetrieben. Auf Europäischem Niveau ist diese nun durch die ECAC⁸ - Empfehlung 27-4 zur Berechnung von LTO⁹-Emissionen als Basis einer Abgabenverordnung verwirklicht worden. Seit 2004 wird diese in Schweden und London Heathrow verwendet, 2006 werden auch die Schweizerischen Flughäfen auf das neue System umsteigen. Die deutschen Flughäfen haben bereits Absichten zur Einrichtung des Systems geäußert [13].

Bisher sind Emissionsgebühren im Luftverkehr noch sehr vereinzelt in Kraft. Falls man für diese Gebühren aber von einer ähnlich rasanten Entwicklung ausgeht wie bei den Lärmbeschränkungen und –Gebühren an Flughäfen, könnten Emissionen in Zukunft zu einem entscheidenden Verkaufs- und damit jetzt schon Entwurfskriterium werden.

4. METRIKEN ZUR BEWERTUNG DER UMWELTWIRKUNG EINES FLUGZEUGS

Grundlegendes Problem zur Bewertung des Schadens an der Atmosphäre durch einen Treibhausgasemittenten ist die Verfügbarkeit einer geeigneten Metrik.

4.1. Emissionsberechnung im Luftverkehr

Zunächst bietet sich die Menge an ausgestoßenem Gas als primäre Vergleichsgrundlage an. Z.B beziehen sich die von der internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO festgelegten Maximalwerte für Stickoxide auf die während eines LTO-Zyklus ausgestoßene Menge an Stickoxiden. Dieselben Daten werden auch für die Emissionsabgabeberechnung an den Flughäfen in der Schweiz, Schweden und London Heathrow verwendet.

Für die einzelnen Phasen des Zyklus werden bestimmte Schubhebelstellungen und Dauern („Times in Mode“) definiert. Unter Zuhilfenahme des jeweiligen Emissionsindex¹⁰ kann so der Gesamtschadstoffausstoß eines Triebwerks für einen LTO-Zyklus bestimmt werden.

$$(1) \quad M_{\text{Gas}} = \sum_i \text{TIM}_i \cdot \text{EI}_{\text{Gas},i} \cdot \text{FF}_i$$

	Thrust setting	Time in Mode	E _{IHC}	E _{Ico}	E _{I_{NOx}}	Fuel Flow
	[% of F ₀₀]	[min]	[g/kg fuel]			[kg/sec]
Take-off	100%	0.7	0.05	0.05	26.55	2.453
Climb-out	85%	2.2	0.05	0.04	20.45	1.989
Approach	30%	4	0.12	2.05	12.43	0.651
Idle	7%	26	1.59	19.76	4.68	0.201

TAB 1. Der ICAO LTO-Zyklus zur Zertifizierung von Emissionen von Flugzeugtriebwerken am Beispiel des CF6-80C2A1 (A300-600)¹¹

Für das CF6-80C2A1 ergeben sich aus dieser Formel 11,514 kg Stickoxide pro LTO-Zyklus.

Ein ähnliches Vorgehen ist auch für den Reiseflug mög-

⁷ FOCA: Federal Office of Civil Aviation

⁸ ECAC: European Civil Aviation Conference

⁹ LTO: Landing and Takeoff. Lande- und Startvorgang bis zu einer Höhe von 3000 Fuß über Grund.

¹⁰ Emissionsindices sind für die meisten Triebwerke in der ICAO-Datenbank [14] verfügbar.

¹¹ Daten aus ICAO-Datenbank [14]

lich. Hier wird i.A. mit Schubhebelstellungen um 60% geflogen, so daß der jeweilige Emissionsindex aus den in der ICAO-Datenbank [14] verfügbaren vier Werten interpoliert werden muß. In der weithin verwendeten „Boeing 2“ - Methode [15] wird zudem eine Korrektur zur Berücksichtigung der Flughöhe (-> Druckhöhe) und der Luftfeuchtigkeit verwendet.

Die Qualität derartiger Berechnungen hängt vor allem von der Genauigkeit des verfügbaren Flugprofils ab. Aber auch für den LTO-Zyklus sind für eine genaue Berechnung die realen Zeitspannen und Schubhebelstellungen nötig, da diese nicht selten erheblich vom Zertifizierungsstandard des ICAO LTO-Zyklus abweichen.

Mit oben genannter Methodik können verschiedene Triebwerke hinsichtlich ihrer Emissionsmenge verglichen werden. Das Flugzeug selbst spielt in der Betrachtung lediglich indirekt über die zugehörige Triebwerksklasse eine Rolle. Eine Bewertung des eigentlichen Einflusses auf die Atmosphäre findet nur sehr eingeschränkt statt, da die einzelnen Abgase nur gesamtmassenmäßig betrachtet werden können und zunächst keine Gewichtung¹² vorgenommen wird.

4.2. Global Warming Potential (GWP)

Das Globale Erwärmungspotential (GWP) ist eine Metrik zur grundsätzlichen Bewertung der Klimawirkung eines Schadstoffes. Es errechnet sich als das Verhältnis der Klimawirkung einer bestimmten Masse eines Stoffes im Verhältnis zur selben Masse Kohlendioxid. Da die verschiedenen Schadstoffe jeweils unterschiedliche Verweildauern in der Atmosphäre, also Wirkzeiträume, haben, muß zudem eine zeitliche Referenz angegeben werden. Typisch dafür sind z.B. hundert Jahre.

$$(2) \text{ GWP}_{\text{Schadstoff, 100 Jahre}} = \frac{\int_{100 \text{ Jahre}} \text{Klimawirkung}_{\text{Schadstoff}} dt}{\int_{100 \text{ Jahre}} \text{Klimawirkung}_{\text{CO}_2} dt}$$

Ein Beispiel: Laut IPCC 2001 [16] hat Methan über hundert Jahre ein GWP von 23. Ein Kilogramm Methan wird also in einem Zeitraum von hundert Jahren 23mal so viel Wirkung auf den Treibhauseffekt haben wie ein Kilogramm Kohlendioxid.

Diese Sichtweise setzt voraus, daß ein Schadstoff immer denselben Einfluß auf den Treibhauseffekt hat, egal wo er in der Atmosphäre emittiert wird. Wie wir zuvor gesehen haben, ist die Atmosphäre in dem von Flugzeugen durchflogenen Bereich aber äußerst inhomogen. Sowohl chemisch als auch physikalisch finden lokal sehr unterschiedliche Prozesse statt, so daß eine bestimmte Menge eines Schadstoffes je nach Emissionsort eine andere Wirkung haben kann.

Um das GWP dennoch für Betrachtungen im Luftverkehr zu verwenden, entwickelten Klug et al. [17] eine Art Erweiterung des Geltungsbereichs des GWPs, indem sie GWP-Werte von der Höhe abhängig bestimmten. Abgesehen von der fraglichen Vereinfachung der Atmosphärenvariabilität auf eine Dimension, nämlich die Flughöhe, ist die

¹² Vergleiche dazu den Strahlungsantrieb in BILD 1 von NO_x und CO₂ bei einem gleichzeitigen Massenverhältnis von ca. 1 : 240

Methode nach dem heutigen Kenntnisstand sehr umstritten, wenn nicht widerrufen, weil die Treibhauswirkung mancher Gase (z.B. Stickoxide) sich nicht linear verhält [18]. Außerdem wird die Wirkung von Kondensstreifen nicht berücksichtigt.

Trotz der Mängel dieser Metrik wurde das GWP im CRYOPLANE – Projekt (wasserstoffgetriebenes Flugzeug) mangels besserer - und ähnlich einfacher - Alternativen verwendet [17]¹³.

4.3. Strahlungsantriebe (Radiative Forcing RF)

Wie kurz in Kapitel 2 erwähnt, wird derzeit im allgemeinen der Strahlungsantrieb (RF) als Metrik für die Wirkung auf den Klimawandel verwendet. Der Strahlungsantrieb der Emission eines Treibhausgases wird als Störung des Strahlungsgleichgewichtes ermittelt, bevor sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Er wird durch Rechenläufe eines Atmosphärenmodells bestimmt, das chemische, physikalische und dynamische Prozesse der Atmosphäre abbildet. Zuweilen wird zwischen dem instantanen, also unmittelbaren, Strahlungsantrieb und dem stratosphären-adjustierten Strahlungsantrieb unterschieden. Letzterer wird berechnet, wenn sich bereits ein Temperaturgleichgewicht in der Stratosphäre eingestellt hat. [19]

Zudem muß der Ort festgelegt werden, an dem die Strahlungsbilanz aufgestellt wird. Zumeist wird er an der Tropopause abgegriffen, prinzipiell sind aber auch andere Höhen denkbar.

Die zeitlich jeweils unterschiedliche Wirkung der einzelnen Schadstoffe ist in dieser Metrik nicht integriert. Der Strahlungsantrieb ist somit nicht eine Metrik für die Treibhauswirkung, sondern eher für das „Potential“ zum Treibhauseffekt. Trotzdem ist er die derzeit wissenschaftlich sauberste Metrik zur Bewertung von Flugzeugemissionen, für den Flugzeugentwerfer aber aufgrund des Bedarfs an einem aufwendigen dreidimensionalen Atmosphärenmodell nicht verwendbar. Außerdem ist die Bestimmung des Strahlungsantriebes von zahlreichen Luftfahrt-Parametern abhängig, die nicht direkt durch die Flugzeugkonfiguration bestimmt sind. Sinnvoll ist die (RF-) Bewertung einer globalen Flotte oder zumindest einer Teilflotte auf einem Streckennetz. Neben den Flugzeugeigenschaften spielen damit der Markt und der Flugbetrieb eine entscheidende Rolle. Trotz seines wissenschaftlich hohen Wertes ist also der Strahlungsantrieb als Metrik zu umwelttechnischen Bewertung eines Flugzeugentwurfes zunächst nur bedingt geeignet.

Wie die Metrik trotzdem sinnvoll im Flugzeugentwurf verwendet werden kann, wird im Kapitel 6 erklärt.

5. BISHERIGE ANSÄTZE ZUR REDUZIERUNG DER UMWELTWIRKUNG VON LUFTVERKEHR

Reduktionspotentiale bieten im Luftverkehr das Fluggerät selbst, sei es die Zelle oder das Triebwerk, aber auch der Flugbetrieb, z.B. über die Effizienzsteigerung der Luftverkehrskontrolle.

¹³ Bezüglich der Kondensstreifen wurde hier angenommen, daß aufgrund der größeren Tröpfchengröße (keine Rußpartikel, also weniger Kondensationskeime) in jedem Fall weniger Kondensstreifen entstehen als bei einer vergleichbaren kerosinbetriebenen Konfiguration.

5.1. Flugzeugzelle

Auf Seite des Flugzeugs können die Aerodynamik und die Struktur zu einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs beitragen.

Flügelprofile sind inzwischen so effizient, daß entscheidende Verbesserungen nicht mehr zu erwarten sind bzw. der Entwicklungsaufwand in einem schlechten Verhältnis zur erwartbaren Effizienzerhöhung steht. Innovative aerodynamische Lösungen wurden und werden jedoch weiterhin untersucht. Dazu gehören z.B.

- eine Reihe von Flügelendbaugruppen wie Wing-Grids [20], Wing Tip Turbine, Winglets oder Spiroids [21]
- Riblets: rillenförmige Oberflächenstruktur ähnlich der Haut von schnellschwimmenden Haifischen, die zur Verringerung des Widerstands auf alle turbulent umströmten Oberflächen eines Flugzeugs aufgebracht werden können [22]
- Wirbelgeneratoren, Turbulenzsensoren, optimierte Bremsklappen (Forschungsprojekt AWIATOR)
- Adaptiver Flügel: Flügel, der sein Profil an den jeweiligen Missionsabschnitt anpassen kann [23]
- Hybrid Laminar Flow Control (HLFC): Die Laminarität der Strömung über den Flügel wird durch Ausblasung so lange wie möglich laminar gehalten, was einen geringeren Widerstand zur Folge hat.

Verbesserungen auf Strukturseite durch Gewichtsreduktion werden durch die Verwendung neuer Materialien (z.B. GLARE[®]) erreicht.

Zudem gibt es Forschung zur Konfiguration eines Flugzeugs, die auf Treibstoffverbrauchsminimierung abzielt. Der Nurflügler zählt zu den vielversprechenden Konzepten und wird auch im Rahmen Europäischer Projekte näher untersucht (z.B. VELA, NACRE).

5.2. Triebwerk

Mit der Reduktion des Treibstoffverbrauchs von modernen Triebwerken geht durch die Erhöhung des Druckverhältnisses und der Brennkammertemperatur prinzipiell eine Erhöhung der Stickoxidemissionen einher. Wie in 2.2 erklärt, sind Stickoxide sowohl auf lokaler als auch auf globaler Ebene unerwünscht. Aus diesem Grunde lag in den letzten Jahren ein Hauptaugenmerk auf der Entwicklung stickoxidarmer Brennkammern.

Stickoxide entstehen hauptsächlich bei stöchiometrischer Verbrennung. Stickoxidarme Brennkammerkonzepte dienen dazu, den Bereich stöchiometrischer Verbrennung zu minimieren. Dies wird erreicht entweder durch

- Vorverdampfung: Lean premixed / prevaporized Konzept (**LPP**) oder
- Mager-Fett-Verbrennung: Rich Burn – Quick Quench – Lean Burn Konzept (**RQL**).

Zudem kann im Treibstoff vorhandener Stickstoff zur Bildung von Stickoxiden bei der Verbrennung beitragen. Da der Stickstoffgehalt in Flugbenzin jedoch relativ gering ist (ca. 0.6%), ist dieser Effekt für den Luftverkehr nicht entscheidend [24].

Des Weiteren gibt es gestufte Brennkammern (z.B. „DAC – double annular combustor“ im CFM56). Ein neues Konzept zieht auch einen Wärmetauscher in Betracht (CLEAN Projekt). [25]

Generell werden immer höhere Nebenstromverhältnisse verwendet, sofern der zusätzliche Widerstand durch die Installation des größeren Triebwerks nicht den geringeren spezifischen Treibstoffverbrauch wieder wettmacht.

Alternative Treibstoffe wurden bisher nur vereinzelt untersucht. Das Europäische Projekt CRYOPLANE entwarf in diesem Zusammenhang ein wasserstoffbetriebenes Flugzeug, dessen Wirkung auf die Atmosphäre aber nur sehr ungenau abgeschätzt wurde [17]. Im Hinblick auf die bereits schwierige Abschätzung der Klimawirkung von klassischen Flugzeugabgasen erscheint hier eine zuverlässige Bewertung mit den aktuell veröffentlichten Methoden nahezu unmöglich. Dies trifft um so mehr für die Abschätzung der Bildung und der Wirkung von Kondensstreifen zu.

Wie im Flugzeugentwurf sind auch bei den Triebwerken Kompromisse zu schließen. Stickoxidarme Brennkammern können geringfügig mehr Treibstoff als klassische Triebwerke verbrauchen und einen erhöhten Wartungsaufwand bedingen, so daß der Nutzen einer solchen Technologie sowohl wirtschaftlich als auch umwelttechnisch abgewogen werden muß.

5.3. Flugbetrieb

Neben dem Flugzeug und dem Triebwerk birgt auch der Flugbetrieb sowohl am Flughafen als auch im Reiseflug zahlreiche Treibstoffeinsparmöglichkeiten. IATA geht von einem Treibstoffreduktionspotential von bis acht bis 18 Prozent durch eine Optimierung des Air Traffic Managements aus [26]. Dazu gehören z.B.:

- „Single European Sky“: Vereinheitlichung des europäischen Luftraums zur Verringerung von Verspätungen (in Vorbereitung)
- Reduced Vertical Separation Minima (RVSM): Vertikale Staffelung von tausend Fuß über Flugfläche 290
- Emissionsarme Start- und Landeprozeduren, z.B. CDAs (Continuous Descent Approach): Anstatt bestimmte Abschnitte des Anflugs auf einer Flughöhe zu fliegen, wird der Abstieg von Reiseflughöhe auf den Gleitpfad kontinuierlich vollzogen. Auch wenn das primäre Ziel dieser Anflugsart in der Lärmreduktion liegt, geht in manchen Fällen auch eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs einher.

Unabhängig von der Verminderung des Treibstoffverbrauchs sind derzeit auch Vorschläge im Gespräch, Luftverkehr um Gebiete mit hohem Kondensstreifenbildungspotential herumzuleiten [27]. Dazu müssen entsprechende Meßinstrumente entwickelt werden und der Nutzen mit dem dann höheren Treibstoffverbrauch (durch längere Strecken bzw. zusätzliche Steig- und Sinksegmente) abgewogen werden.

Am Flughafen selbst sind erhebliche Abgasreduktionen durch landseitige Verbesserungen z.B. durch die Erneuerung von Bodengeräten zu verwirklichen. Flugzeugseitig wird derzeit z.B. das sogenannte „Reduced Engine Taxiing“ untersucht [28] bzw. teilweise auch schon praktiziert (z.B. Delta Air Lines).

Wie auch im Flugzeugentwurf ist eine weitere Integration der an der Lenkung des Luftverkehrs beteiligten Instanzen im Sinne einer Effizienzsteigerung erforderlich. Zusammen mit den Treibstoffeinsparungen wird damit auch die Atmosphärenwirkung verringert.

5.4. Aktuelle Flugzeugentwurfssystematik

Die Minimierung des Umwelteinflusses von Flugzeugabgasen wurde bisher wie beschrieben mit der Minimierung des Treibstoffverbrauchs gleichgesetzt.¹⁴ Diese Sicht spiegelt sich auch in der anforderungsorientierten Systematik des klassischen Flugzeugentwurfs wider.

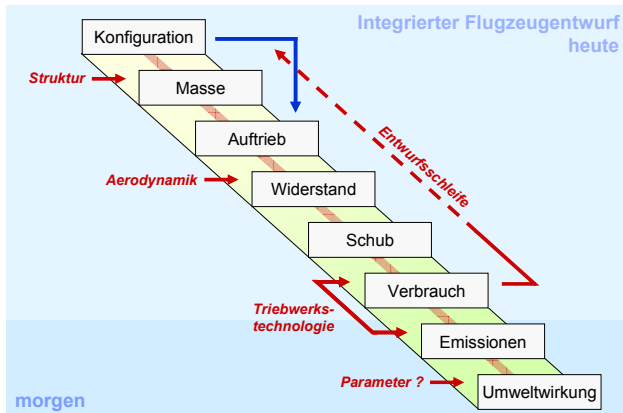


BILD 2. Klassische Flugzeugentwurflogik

Ausgehend von einer Konfiguration wird über die zu deren Verwirklichung notwendige Struktur die Masse des Fluggeräts abgeschätzt. Der unter anderem durch die Konfiguration bestimmte Auftrieb muß die zuvor bestimmte Masse in allen Missionsabschnitten und Fluglagen in der Luft halten. Die Größe des Widerstands wird dann durch die aerodynamische Effizienz der Konfiguration in Abhängigkeit des Auftriebs bestimmt. Der Widerstand bestimmt den Schubbedarf. Der Verbrauch des Flugzeugs hängt durch die Triebwerkstechnologie beeinflusst vom bereitzustellenden Schub ab. Flugzeuge werden heute kostenoptimiert entworfen. Da Treibstoffkosten einen erheblichen Anteil an den direkten Betriebskosten eines Flugzeugs darstellen, zieht die Kostenminimierung eines Entwurfs tendenziell immer auch eine Verbrauchsreduktion oder sogar – minimierung voraus.

Bis hierhin sind die einzelnen Entwurfsgebiete bereits in einer Entwurfsschleife integriert. Nachgeschaltet werden dann Emissionen bewertet. Der Zertifizierungsstandard nach ICAO sieht dazu die Berechnung der Gesamtmenge an NO_x-Emissionen während eines ICAO-LTO-Zyklus in Abhängigkeit der jeweiligen Schubklasse und des Gesamtdruckverhältnisses des verwendeten Triebwerks vor. Nach dem gegenwärtigen Standard „CAEP/4“¹⁵ berechnet sich dieser Maximalwert für Triebwerke mit einem Stand Schub über 89 kN und einem Gesamtdruckverhältnis zwischen 30 und 62,5 zu

$$(3) \quad D_p / F_{00} = 7 + 2,0 \cdot \Pi_{00} \quad [30]$$

Für das in Kapitel 4.1 erwähnte Triebwerk sind das maximal 68,06 [g/kN]. Das Triebwerk erreicht aber nur 44,73 g/kN. Es hat also eine Marge von 34%, wenn von der Korrektur für statistische Ungenauigkeiten durch eine geringe Anzahl von getesteten Triebwerken abgesehen

¹⁴ Lediglich N. Antoine stellte 2004 eine Dissertation zur parallelen Optimierung von LTO-NO_x, Verbrauch und DOC mit entsprechenden Lärmkriterien vor. [29]

¹⁵ CAEP: Committee on Aviation Environmental Protection, Umweltausschuß der ICAO

wird (s. [30]).

Diese Systematik ist zwar objektiv, hat aber keine wirklich physikalisch-technische Bedeutung. Daher ist sie auch als Maßzahl für die umwelttechnische Optimierung ungeeignet.

Die Wirkung von Flugzeugemissionen auf die Atmosphäre wird derzeit nicht von Herstellern, sondern von Atmosphärenspezialisten untersucht und ist von dem zuvor erklärten Entwurfsprozeß völlig entkoppelt. Um die Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Atmosphäre wirklich verringern zu wollen, müssen eine Atmosphärenmetrik und die entsprechenden Marktdaten in die Flugzeugentwurfsschleife integriert werden.

Natürlich wird die hier angewandte symbolische Betrachtungsweise der Komplexität eines realen Entwurfsproblems nicht gerecht. Diese Vereinfachung ist aber zunächst nötig, um sich auf ein derart hohes Systemniveau begeben zu können.

6. FLUGZEUGENTWURF MIT BERÜCKSICHTIGUNG DER ATMOSPÄRE

Es soll nun eine Methodik vorgeschlagen werden, die einerseits den globalen Luftverkehrsmarkt, andererseits die Physik und Chemie der Atmosphäre mit dem klassischen Flugzeugentwurf verknüpft. Damit soll die durch den Luftverkehr verursachte Schädigung der Atmosphäre quantifiziert und anschließend unter ökonomisch sinnvollen Randbedingungen minimiert werden.

6.1. Systematik

Das folgende Schaubild stellt dazu eine mögliche Systematik vor, die die beteiligten Bereiche verknüpft.

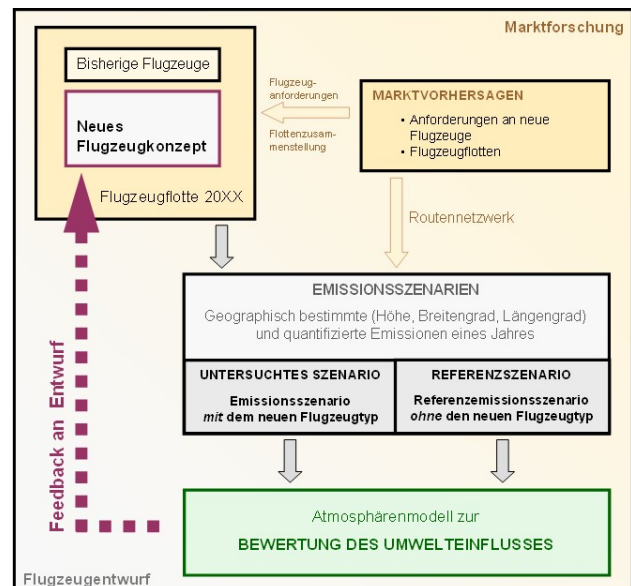


BILD 3. Systemschaubild des integrierten Flugzeugentwurfs für minimalen Atmosphärenschaden

Die in BILD 3 dargestellten Felder werden nun einzeln erläutert, und zwar ausgehend vom „neuen Flugzeugkonzept“.

6.1.1. Flugzeugkonzept und Weltflotte

Ein Flugzeug wird nach den üblichen Entwurfsanforderungen wie Größe, Reichweite, Geschwindigkeit usw. konzipiert. Da ein Flugzeugentwurf nicht allein auf Basis seiner technischen Parameter in Bezug auf seine Atmosphärenwirkung bewertet werden kann, wird das neue Konzept in eine Weltflotte eingebettet. Sinnvollerweise sollte dafür eine Flotte verwendet werden, die dem zeitlichen Rahmen des Flugzeugprojekts entspricht. Die hier vorgeschlagene Systematik ist auf den Vorentwurf zugeschnitten. Ein maßgeblicher Marktanteil des neuen Flugzeugs kann also erst etwa 15-20 Jahre später erwartet werden. Daher sollte auch die verwendete Weltflotte in etwa auf diesen Zeitrahmen zugeschnitten sein.

6.1.2. Marktvorhersage

Daten über die Zusammensetzung der Weltflotte sowie die Anforderungen an das Konzept werden durch eine detaillierte Marktvorhersage bereitgestellt. Zudem werden genaue Informationen über das globale Streckennetz benötigt. Diese enthalten zumindest die Aufteilung von Kapazitätssegmenten auf einzelne Routen, im Optimalfall sogar die Benutzung einzelner Flugzeugtypen pro Strecke. In der Marktvorhersage von Firmen wird zunächst nur die Anzahl von Flügen pro Jahr auf einer Strecke ermittelt. Um später wirklich eine detaillierte Analyse aller Bewegungen mit einem dreidimensionalen Atmosphärenmodell durchführen zu können, wäre eine zeitliche Auflösung der Flüge bis hinab zu Tageszeiten wünschenswert. Diese Präzision ist aber, vor allem für zukünftige Flotten, mangels zuverlässiger Daten nicht erreichbar und wäre für die Zukunft höchst spekulativ. Außerdem würde die dann verwendete Datenmenge den hier angestrebten (kurzen) Rahmen für die Rechenzeit sprengen. Für eine Studie außerhalb des Flugzeugentwurfs wäre ein derartiger Detaillierungsgrad aber wünschenswert und wurde z.B. in der AERO2K-Studie auch schon umgesetzt.

6.1.3. Emissionsszenarien

Mit Hilfe einer Abschätzung der Flugleistungsdaten der im Dienst befindlichen Flugzeuge und des zu untersuchenden Konzepts sowie der in 6.1.2 beschriebenen Marktdaten werden Emissionsszenarien erstellt. Dazu wird für jeden Flugzeugtyp auf jeder seiner durchflogenen Routen ein vereinfachtes Missionsprofil berechnet, das den jeweiligen Treibstofffluß ausweist. Die „Boeing 2-Methode“ [15] erlaubt dann eine relativ einfache Berechnung der jeweiligen Emissionsindizes für jeden Flugabschnitt. Zuletzt werden die einzelnen Profile auf den Erdglobus „gelegt“, die berechneten Emissionen geographisch verteilt und schließlich über die Weltflotte summiert. Der Datensatz des Szenarios enthält dann die Menge des jeweiligen Schadstoffes (NO_x , CO, UHC etc.) pro „Atmosphärenwürfel“, der ein bestimmtes variables Volumen hat:

$$(4) \quad \Delta V = \Delta \text{Breitengrad} \cdot \Delta \text{Längengrad} \cdot \Delta \text{Höhe}$$

Eine mögliche Auflösung hierbei ist z.B. ein Grad Breite, ein Grad Länge mal tausend Fuß Höhe bis zur Flugfläche 500. Bereits in diesem eingeschränkten Bereich mit scheinbar geringer Auflösung ergibt sich damit ein Datensatz von 3,24 Mio. „Würfeln“ multipliziert mit der Anzahl der zu betrachtenden Schadstoffe. Die Schwierigkeit der Erstellung solcher globalen Emissionsszenarien besteht

also nicht unbedingt in der Berechnungsmethode selbst, sondern in der korrekten und konsistenten Verwaltung der riesigen Datenmengen.

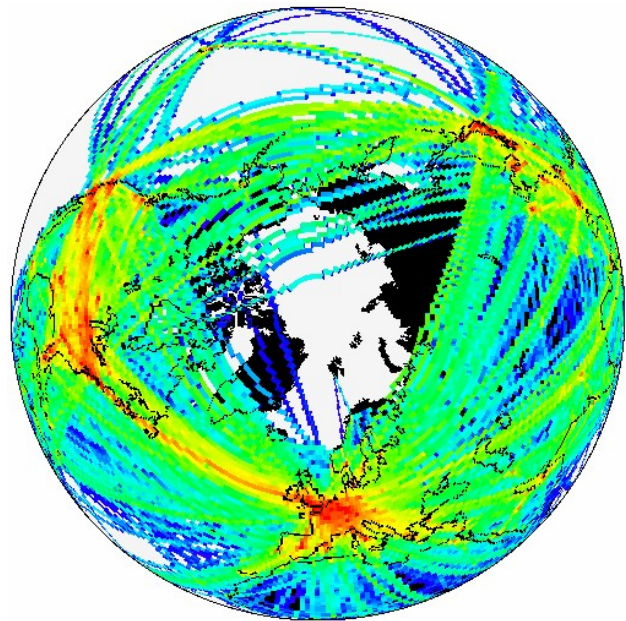


BILD 4. Globale Emissionen aus dem Luftverkehr von zivilen Flugzeugen über 100 Sitze, Draufsicht auf den Erdball aus Norden.

Wird der durch Emissionsszenarien ermittelte Gesamtverbrauch der Weltflotte dann mit dem tatsächlichen Verbrauch verglichen, kann es zu erheblichen Diskrepanzen kommen. Schumann gibt als Beispiel für den Verkehr des Jahres 1992 130 Mt aus Berechnungen und 170 Mt produzierten Treibstoffes laut Internationaler Energiebehörde an [4]. Für diese Diskrepanzen gibt es mehrere Ursachen: Verwendung optimaler Flugprofile für die Szenarien, Verwendung von Großkreisen anstatt realer Flugrouten, Vernachlässigung von altersbedingten Leistungsabnahmen des Flugzeugs, Vernachlässigung von Warteschleifen usw. Trotz dieser Ungenauigkeiten auf absolutem Niveau stellen solche Emissionsszenarien ein geographisch detailliertes Bild weltweiter Luftverkehrsemissionen dar, die gegebenenfalls auch proportional auf Werte anderer Quellen skaliert werden können. Außerdem wird der anfangs als neues Konzept in die Flotte eingebettete Flugzeugtyp in einer komparativen Studie bewertet. Es wird ein Referenzszenario ohne den neuen Typ erstellt und anschließend das zu untersuchende Szenario, in dem ein Teil der Flotte durch das neue Konzept ersetzt wird. Die Absolutfehler werden damit relativiert. Die Vorgehensweise hat somit durchaus eine gute Aussagekraft.

6.1.4. Atmosphärenwirkung

Mit Erstellung der Emissionsszenarien wird ein detailliertes Bild der Verteilung von Emissionen auf dem Globus gegeben. Der wirkliche Einfluß auf das Klima, beziehungsweise den Treibhauseffekt, ist davon aber noch nicht direkt ableitbar. Im Gegensatz zu anderen Emissionsquellen, deren Einfluß auf die globale Erwärmung mit der Anwendung des GWP relativ einfach zu ermitteln ist, müssen für eine sinnvolle Bewertung der Umweltwirkung von Luftverkehr etwas aufwendigere Maßnahmen ergriffen werden.

Dazu gibt es mehrere Alternativen, die sich durch ihre Komplexität und ihre Dimensionalität unterscheiden. Optimalerweise wird ein dreidimensionales Atmosphärenmodell (z.B. das „ECHAM“-Modell des DLR) auf das Emissionsszenario angewendet. Dieses Vorgehen führt gegenwärtig zum besten Ergebnis. Nachteil ist, daß dafür sehr viel Rechenzeit und vor allem fundierte Kenntnisse in der Klimatologie und in der Anwendung solcher Modelle nötig sind. Ein solches Modell kann nicht von einem Flugzeugingenieur im Vorentwurf betrieben werden, sondern bedarf dafür ausgebildeter Spezialisten.

Etwas weniger rechenintensiv sind zweidimensionale Modelle, die Höhe und Breitengrad, nicht aber den Längengrad auflösen. Auch kann die Chemie, Physik und Dynamik in dem Modell vereinfacht werden, natürlich mit gleichzeitiger Abnahme der Präzision. Das Kompetenzproblem ist mit der Verwendung solcher vereinfachten Modelle nicht gelöst, aber doch abgeschwächt.

Wirklich in den Flugzeugentwurf und die Konzeptoptimierung integrieren ließe sich schließlich ein eindimensionaler Atmosphärenparameter. Wie wir in Kapitel 4.2 gesehen haben, eignet sich das aktuelle GWP nicht. Seitens der Atmosphärenwissenschaften sind daher zahlreiche Aktivitäten zur Entwicklung besserer Metriken im Gange, z.B. im Rahmen des Europäischen Projektes „METRIC“ oder des vom britischen Department of Trade and Industry (DTI) geförderten „LEEA“-Projekts. Neuere Metriken sollen dann auch den Strahlungsantrieb durch Kondensstreifen berücksichtigen.

Atmosphärenmodelle	
Modell	Anwendung
1-dim. Parameter	Optimierung
2-dim. vereinfachtes Modell	Entwurfsbewertung
3-dim. komplexes Modell	Kalibrierung der einfacheren Modelle und Kontrolle

TAB 2. Verwendung von Atmosphärenmetriken für unterschiedliche Präzisionsniveaus im Flugzeugentwurf

Es sollte also je nach geforderter Präzision die Verwendung des Atmosphärenmodells überprüft und angepaßt werden. TAB 2 zeigt eine Staffelung der jeweiligen Modellpräzision in Abhängigkeit der spezifischen Anwendung im Flugzeugentwurf auf.

6.1.5. Geschlossene Entwurfsschleife

Wie im vorigen Abschnitt deutlich wurde, sind gegenwärtig die Unsicherheiten der Atmosphärenmetrik noch zu groß, um eine zuverlässige Aussage zur Qualität eines Flugzeugentwurfs bezüglich der Minimierung des durch Luftverkehr verursachten Treibhauseffektes in einer Entwurfs-optimierungsschleife zu erlauben.

Die Verwendung eines komplizierten Modells erlaubt aber die Bewertung eines Entwurfs außerhalb seines Optimierungsprozesses und eingebettet in eine Flotte. Insofern kann mit der hier vorgestellten Methodik auch jetzt schon mit dem aktuellen Kenntnisstand eine wertvolle Rückmeldung an die Konzeptentwerfer erfolgen. Man kann also noch nicht von einer Optimierung, doch aber von einer guten Quantifizierung der Atmosphärenschädlichkeit eines

Konzepts durch die Verwendung der hier vorgestellten Methodik ausgehen.

6.2. Interdisziplinäre Integration

Die hier vorgestellte Methodik schließt über den klassischen Flugzeugentwurf hinausgehend den Luftverkehrsmarkt und vor allem die Wirkung des Luftverkehrs auf die Atmosphäre in die Überlegungen des Flugzeugentwurfs mit ein.

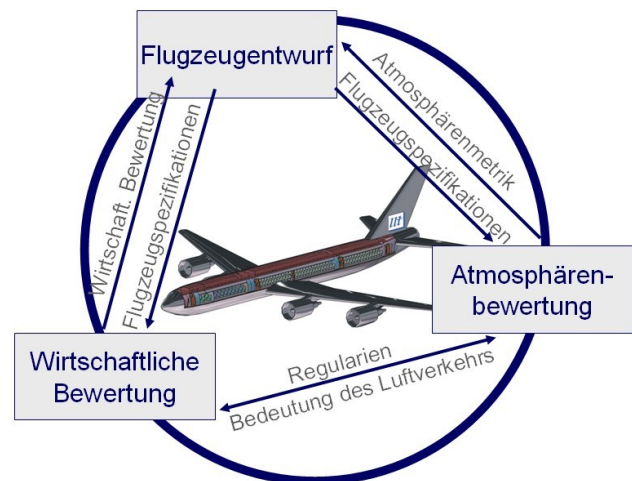


BILD 5. Verknüpfung von Flugzeugentwurf, Markt und Umweltbetrachtungen

Im Dreigestirn Flugzeugentwurf, Markt und Atmosphärenwirkung werden somit die Wechselwirkungen zwischen den Bereichen vereinfacht modelliert.

Für den Flugzeugentwerfer ist der Markt sowie die Reaktion der Atmosphäre auf die Einbringung von Flugzeugemissionen „gegeben“. Darauf kann er keinen direkten Einfluß nehmen. Indirekt ist die Einflußnahme auf die Atmosphärenwirkung durch Veränderung des Konzepts im Rahmen der hier vorgestellten Kopplung dann aber möglich.

7. DISKUSSION DER METHODIK

Eine prinzipielle Schwierigkeit liegt in der Interdisziplinarität der Methodik. Während der Flugzeugentwerfer relativ genaue Informationen zu den Leistungen seines Entwurfs ermitteln kann, fehlen ihm genaue Marktdaten (vor allem für die Zukunft) und die Kompetenz zur Untersuchung der Atmosphäre. Seitens der Atmosphärenwissenschaften sind die meteorologischen Kompetenzen optimal, das Wissen um die operationellen oder technischen Zusammenhänge meist aber unzureichend. Genausowenig können Marktforscher technisch-physikalische Implikationen bewerten. Die Anwendung der hier erklärten Methodik erfordert also sowohl ein gewisses Grundwissen in allen Bereichen als auch die Zuhilfenahme entsprechenden Expertenwissens.

Des weiteren muß das Präzisionsniveau der einzelnen Disziplinen aufeinander abgeglichen werden. Es ist z.B. wenig sinnvoll, die Emissionsszenarien dreidimensional zu erstellen, wenn später nur ein zwei- oder gar eindimensionales Atmosphärenmodell verwendet wird. Auch die Auflösung der jeweiligen Flugprofile sollte mit der der Szenarien und des Atmosphärenmodells schon bei der Berechnung abgestimmt werden.

Schließlich stellt sich die Frage, inwieweit eine Vereinfachung der Teildisziplinen zulässig ist, ohne die Ergebnisse potentiell zu falsifizieren. Es muß, z.B. über externe Kontrollrechnungen mit höherer Präzision, sichergestellt werden, daß die gewonnenen Ergebnisse auch plausibel und, in der erwarteten Genauigkeit, richtig sind.

Für eine industriell sinnvolle Anwendung der hier vorgestellten Methodik wäre die Verwendung von realen Missionsdaten, wie sie z.B. bei der Luftverkehrskontrolle aufgezeichnet werden, interessant. Wie zuvor erwähnt, ginge damit aber auch eine Erhöhung der Datenkomplexität einher.

Der Komplexität des Themas muß also mit einer systematisch sauberen Vorgehensweise begegnet werden. Eine für die reale Welt sinnvolle Bearbeitung der Problematik verlangt aber die Verknüpfung der Flugzeugtechnik, des Marktes und der Atmosphärenforschung. Diese Integration wird in der hier vorgestellten Methodik zu erreichen gesucht.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Luftverkehr ist momentan für einen verhältnismäßig geringen Anteil des Treibhauseffekts verantwortlich. Dieses Verhältnis wird sich aber ändern, da sich die Luftfahrtbranche auch nach den jüngsten Krisen eines kontinuierlich hohen Wachstums erfreut. Dazu kommt, daß andere Emittenten (z.B. Automobile, produzierendes Gewerbe) immer mehr unter Druck stehen, atmosphärenschrädliche Emissionen zu reduzieren. Dabei ist ein im Verhältnis zum Luftverkehr sehr großes Potential an Einsparungen vorhanden. Langfristig werden also auch andere Industriezweige ihre Treibhauswirkung verringern, wodurch die Belastung durch den Luftverkehr offensichtlicher zu Tage treten wird.

Maßgabe für die am Luftverkehr beteiligten Instanzen, also Luftverkehrsgesellschaften, Hersteller, Flughäfen usw., sind aufgrund des großen finanziellen Drucks in der Branche nicht physikalisch-technische Überlegungen, sondern die entsprechenden Regularien. Dabei ist unabhängig, evtl. Regularien einfach und v.a. einheitlich zu gestalten, um Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden. Konsequenz solcher Regularien soll eine Verringerung der Atmosphärenwirkung des Luftverkehrs sein. Ihre Einführung setzt daher ausreichend zuverlässiges Wissen der Vorgänge in der Atmosphäre voraus. Dieses ist heute in manchen Teilbereichen, v.a. bezüglich der Kondensstreifen, noch nicht gegeben. Zuverlässige Atmosphärenmetriken müssen von Atmosphärenwissenschaftlern entwickelt werden – eine Aufgabe, die Flugzeughersteller nicht bewältigen können. Sobald diese Metriken verfügbar sind, können Flugzeughersteller ihre Verantwortung für den Treibhauseffekt wahrnehmen und die Atmosphärenwirkung zukünftiger Flugzeuge minimieren. Die hier vorgestellte Methode stellt dazu ein mögliches Werkzeug dar.

9. LITERATUR

[1] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Konzept Luftverkehr und Umwelt, Konzeptpapier**, abgerufen auf www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/luftver.pdf am 14.12.2005, S.7.

[2] **Baughcum, S.L., I.C. Plumb und P.F. Vohralik**: „Stratospheric Ozone Sensitivity to Aircraft Cruise Altitudes and NO_x Emissions“, In: Sausen, R., C. Fichter und G. Amanatidis (Hrsg.): *Proceedings of European Conference on Aviation, Atmosphere and Climate (AAC)*, Friedrichshafen, 2003, Air pollution research report 83 of the European Commission, 2003, S. 145-150.

[3] **International Panel of Climate Change (IPCC): Aviation and the Global Atmosphere**, Special Report of IPCC Working Groups I and III, J.E. Penner et al. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, 1999, S.8.

[4] **Schumann, U.**: „Aircraft Emissions“, herausgegeben von I. Douglas, In: *Encyclopedia of Global Environmental Change*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2002, S.178-186.

[5] **Marquardt, S.**: *Klimawirkung von Kondensstreifen: Untersuchungen mit einem globalen atmosphärischen Zirkulationsmodell*, Dissertation der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, DLR-Forschungsbericht 2003-16, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, 2003, S.21-22.

[6] **Sausen, R.**: „Luftverkehr und Klima“, *Promet*, Jahrg. 30, Nr. 4, (2004), S. 181-187.

[7] **Sausen, R. et al.**: „Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999)“, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 14, Nr. 4, (2005), S. 555-561.

[8] **Schumann, U.**: „Formation, properties and climatic effects of contrails“, *Comptes Rendues physiques*, im Druck, 2005.

[9] **Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Umweltgipfel in Rio**, Internetbeitrag abgerufen auf www.bmz.de/de/the men/umwelt/hintergrund/umweltpolitik/rio_1992.html am 15.12.2005.

[10] **Wit, R. et al.**: *Giving wings to emission trading, Inclusion of Aviation under the European emission trading system (ETS): design and impacts*, Report for the European Commission, DG Environment, CE Delft, Delft, 2005.

[11] **Bows, A., P. Upham, K. Anderson**: *Growth scenarios for EU & UK Aviation: contradictions with climate policy*, Report for Friends of the Earth Trust Ltd, Tyndall Centre for Climate Change (North), The University of Manchester, Manchester, 2005.

[12] **Unique (Flughafen Zürich AG): Emission charges Zurich Airport Review 2003**, Unique (Flughafen Zürich AG), Zürich, 2003.

[13] **Sjölin, K.**: Vortrag bei ANERS – Aircraft Noise and Emission Reduction Symposium, Monterey, 2005.

[14] **International Civil Aviation Organisation (ICAO): ICAO Aircraft Engine Emissions Databank**, 14. Ausgabe, abgerufen auf www.caa.co.uk/default.aspx?categoryid=702&pagetype=90 am 15.12.2005.

[15] **Baughcum, S. et al.**: *Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis*, NASA Contract Report 4700, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, 1996, Appendix D.

[16] **International Panel of Climate Change (IPCC): Climate Change 2001: The Scientific Basis**, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, J.T. Houghton et al. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, 2001, S.386 ff.

[17] **Svensson, F., A. Hasslrof, J. Moldanova**: „Reduced environmental impact by lowered cruise altitude for li-

quid hydrogen-fuelled aircraft“, *Aerospace Science and Technology*, Nr. 8, (2004), S. 307-320.

- [18] **International Panel of Climate Change (IPCC):** *Aviation and the Global Atmosphere*, Special Report of IPCC Working Groups I and III, J.E. Penner et al. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, 1999, Kap. 6.2.2.
- [19] **Stuber, N.:** *Ursachen der Variabilität des Klimasensitivitätsparameters für räumlich inhomogene Ozonstörungen*, Dissertation der Universität Hamburg, DLR-Forschungsbericht 2003-03, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, 2003.
- [20] **La Roche, U., S. Palfy:** „WING-GRID, a Novel Device for Reduction of Induced Drag on Wings“, *Proceedings of ICAS 1996*, Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) 1996, Sorrent, Italien, 1996, abgerufen auf <http://www.allstar.fiu.edu/aero/winggrid6.html> am 15.12.2005.
- [21] **Aviation Partners, Inc.:** *The Spiroid-Tipped Wing*, Internetbeitrag, (US-Patent 5102068), abgerufen auf <http://www.aviationpartners.com/otherprograms/concepts.html> am 15.12.2005
- [22] **Renger, K.:** “ Airframe Technology Contribution to Local Air Quality Improvements”, *Luftverkehr und lokale Luftqualität Workshop*, München, 2004, abgerufen auf http://www.llt.mw.tum.de/lehrstuhl/veranstaltung/Vortraege_pdfs/06_Renger.pdf am 15.12.2005, S.18.
- [23] **Richter, K., D. Strohmeyer, H. Rosemann:** „Numerische Untersuchungen an transsonischen Profilen mit flexibler Hinterkante und Konturbeule“, In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2000*, Leipzig, 2000, Band III, DGLR-JT2000-021.
- [24] **Hennecke, D.K. and K. Wörlein:** Flugantriebe und Gasturbinen, 2. Ausg., Vorlesungsskript, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Gasturbinen und Flugantriebe, Darmstadt, 2000.
- [25] **Scheugenpflug, H., G. Wilfert, B. Simon:** „Erfüllung zukünftiger Umweltaforderungen durch den Einsatz eines Wärmetauschertriebwerks“, In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2001*, Hamburg, 2001, Band III, DGLR-JT2001-039.
- [26] **International Air Transport Association (IATA):** *Environmental Review 2004*. IATA, 2004, abgerufen auf <http://www.iata.org/ps/publications/9486.htm> am 15.12.2005, S. 31.
- [27] **Doyle, A.:** “Eurocontrol looks to cut contrails with rerouting”, *Flight International*, 28 Sept. – 4 Oct. 2004, S. 21.
- [28] **Niehuis, R. et al.:** “Reduction of Engine Exhaust Emissions and Fuel Savings by Single or Reduced Engine Taxiing on Airports”, *Luftverkehr und lokale Luftqualität Workshop*, München, 2004, abgerufen auf http://www.llt.mw.tum.de/lehrstuhl/veranstaltung/Vortraege_pdfs/04_Niehuis.pdf am 15.12.2005.
- [29] **Antoine, N.:** *Aircraft Optimization for Minimal Environmental Impact*, PhD Thesis, Stanford University, Palo Alto, 2004.
- [30] **Civil Aviation Authority (CAA), UK:** *Background information for the ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*, Einführung zur ICAO Triebwerksdatenbank, abgerufen auf <http://www.caa.co.uk/docs/702/introduction-05102004.pdf> am 15.12.2005.