



# Klimawirkungen des Luftverkehrs



100 JAHRE  
Luft- und Raumfahrtforschung  
in Deutschland



**Herausgeber** **Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

**Anschrift** Linder Höhe  
51147 Köln

**Redaktion** Thomas Bürcke, Dr.-Ing. Matthias Meyer

**Gestaltung** ziller design, Mülheim an der Ruhr

**Druck** Buch- und Offsetdruckerei Richard Thierbach GmbH,  
Mülheim an der Ruhr

**Drucklegung** Köln, im September 2007

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung  
nur nach vorheriger Absprache mit dem DLR gestattet

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	4
<b>Klimawirkungen des Luftverkehrs</b> .....	6
<b>Zukunftsweisende Flugzeugkonstruktionen</b> .....	12
<b>Neue Triebwerke – effizienter, leiser, schadstoffärmer</b> .....	14
<b>Raus aus der Warteschleife mit neuem Luftverkehrsmanagement</b> .....	16
<b>Entwicklung des Luftverkehrs in der Zukunft</b> .....	18

# Vorwort

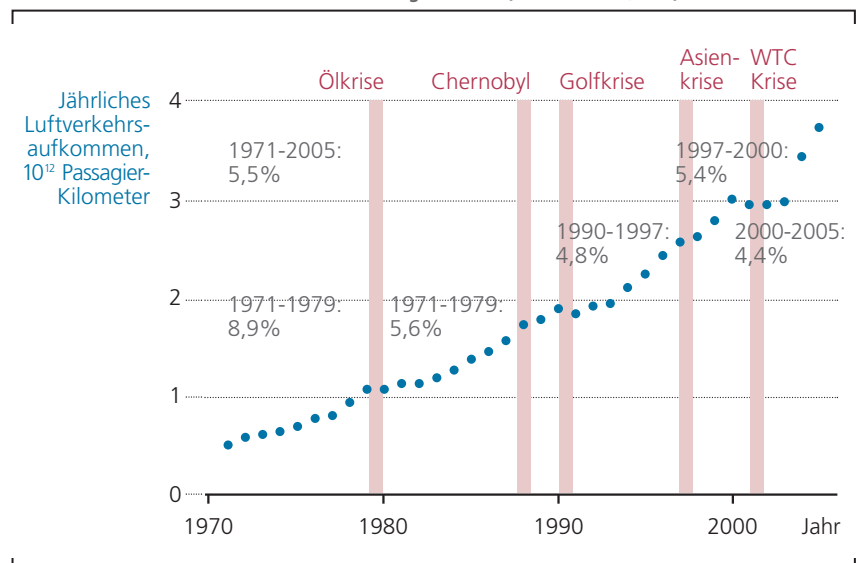
Der kommerzielle Luftverkehr hat in den letzten Jahrzehnten mit wenigen Ausnahmen ein stetiges Wachstum erfahren. Im Vergleich zu den 60er Jahren mit Steigerungsraten von weit über 10 Prozent nahm die Verkehrsleistung im Linienpassagierverkehr zwischen 1995 und 2005 immer noch um durchschnittlich 5,2 Prozent pro Jahr zu.

Dieses wirtschaftlich höchst attraktive Wachstum des Luftverkehrs ist mit der aktuellen Diskussion über den durch Treibhausgase verursachten Klimawandel ins öffentliche Interesse geraten. Die Aussagen über den tatsächlichen Beitrag des Luftverkehrs zum Klimawandel gehen dabei stark auseinander. Auf der Basis von soliden, wissenschaftlichen Erkenntnissen der Atmosphärenforschung und den Kompetenzen im DLR, das komplette Lufttransportsystem zu erforschen, soll die Broschüre eine Informations- und Diskussionsbasis

bieten, die die langfristige Entwicklung des Luftverkehrs und seinen Einfluss auf unser Klima beschreiben.

Getrieben durch die Forderung nach mehr Wirtschaftlichkeit wurde in den letzten 40 Jahren insbesondere der spezifische Kraftstoffverbrauch um rund 50 Prozent vermindert. Hierzu haben unter anderem Technologien zur effizienteren Aerodynamik, zu leichteren Bauweisen und sparsamere Triebwerke erheblich beigetragen. Damit ist es gelungen, den Anstieg der Lufttransportleistung zumindest in Teilen von dem einhergehenden Anstieg des Kraftstoffverbrauchs zu entkoppeln. DLR-Forscherinnen und Forscher haben zu allen Themen bedeutende Beiträge geleistet und die Luftfahrt befindet sich zurzeit bereits auf dem richtigen Weg, Fliegen ökologisch verträglicher zu gestalten. Für die Zukunft ist es allerdings unabdingbar, die besonders für das Klima relevanten Emissionen noch stärker

Entwicklung der Verkehrsleistung im Linienpassagierverkehr von 1971 bis 2005 auf der Basis von Daten der International Civil Aviation Organisation (U. Schumann, DLR).



zu reduzieren, um die sehr hochgesteckten Ziele der von der europäischen Industrie und Forschung vereinbarten Vision 2020 mit einer Reduktion der Kohlendioxide um 50 Prozent und einer Verminderung der Stickoxide um 80 Prozent zu erreichen.

Die Zukunft des Luftverkehrs ist eng verknüpft mit der globalen Wirtschaft, dem industriellen Wachstum, dem Wohlstand und sozialen Bedürfnissen, die den Bedarf an Mobilität bestimmen. Alle Prognosen gehen von einem jährlichen Wachstum von etwa fünf Prozent aus. Das bedeutet eine Verdreifachung der Transportleistung im Luftverkehr innerhalb der nächsten zwei Dekaden. Alle am Lufttransportsystem Beteiligten sind sich deshalb einig: Das Wachstum muss von den Emissionen noch weit stärker entkoppelt werden. Nur so kann auf Dauer eine wirtschaftliche und klimaverträgliche Luftfahrt gewährleistet werden.

Die Forschung muss zukünftig erhebliche Verbesserungen an Flugzeugen identifizieren und sich besonders auch auf das Gesamtsystem mit dem Flughafen und der Luftverkehrsführung konzentrieren, um weitere interdisziplinäre Technologiepotenziale zu heben, die auch kurz- und mittelfristig umsetzbar sind. Das DLR hat sich inhaltlich und organisatorisch auf diese Aufgabe eingestellt und im nationalen und europäischen Rahmen hierfür positioniert.



Prof. Dr. Joachim Szodruich  
Mitglied des Vorstands



# Klimawirkungen des Luftverkehrs

Das Klima der Erdatmosphäre ändert sich seit der letzten Eiszeit derzeit stärker denn je. Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) berichtet, dass es in den letzten hundert Jahren um etwa 0,7 °C wärmer geworden ist und dass diese globale Klimaänderung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einem großen Teil durch die Aktivitäten des Menschen verursacht wurde. Während der letzten 250 Jahre, also seit Beginn der industriellen Revolution, haben die atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen deutlich zugenommen. Der Anteil von Kohlendioxid in der Luft stieg wegen der Verbrennung fossiler Rohstoffe von 280 ppm (Anteile pro eine Million) auf knapp 380 ppm.

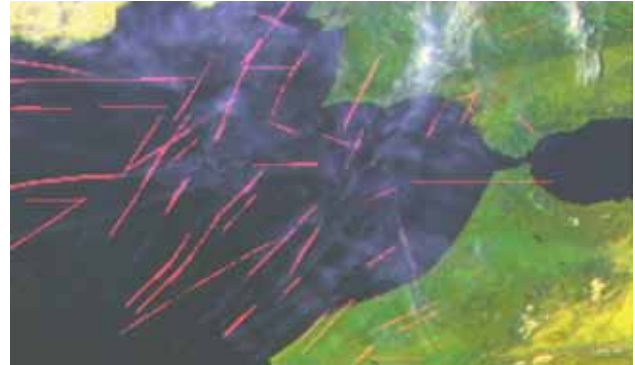
Verkehrsbedingte Emissionen aus den Bereichen Straßenverkehr, Schifffahrt und Luftverkehr tragen einen wesentlichen Teil zum anthropogenen, weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>, 18 Prozent), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>, 37 Prozent) oder Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>, 11 Prozent) bei. Tatsächlich ist der relative Anteil des Verkehrs an der Emission von Treibhausgasen in den letzten Jahren sogar deutlich angestiegen. Etwa 14 Prozent des anthropogenen CO<sub>2</sub> werden weltweit durch den Straßenverkehr emittiert, 2,7 Prozent vom Schiffsverkehr und 2,2 Prozent vom Luftverkehr. Zu den Stickoxidemissionen, die eine wichtige Rolle bei der Entstehung von photochemischem Ozon spielen, tragen vor allem Straßen- und Schiffsverkehr (20 bzw. 15 Prozent) bei. Der Luftverkehr beeinflusst das Klima darüber hinaus durch Kondensstreifen und Veränderungen der Bewölkung.

Der Anteil des Luftverkehrs ist gemessen am gesamten Schadstoffeintrag in die Atmosphäre relativ gering. Dennoch muss er genau beobachtet und analysiert werden, insbesondere wegen seiner dynamischen Entwicklung. Der kommerzielle Luftverkehr wies mit Ausnahme weniger Jahre, in denen politische Ereignisse und Weltwirtschaftskrisen den Trend beeinflussten, ein stetiges Wachstum auf. Im Vergleich zu den 1960er-Jahren mit Wachstumsraten von weit über 10 Prozent nahm die Verkehrsleistung im Linienpassagierverkehr im Zeitraum von 1995 bis 2005 immer noch um durchschnittlich 5,2 Prozent pro Jahr zu. Damit wächst der Luftverkehr derzeit etwa doppelt so schnell wie die Weltwirtschaft. Dazu beigetragen hat unter anderem das Aufkommen der „Billigflieger.“ Weltweit wurden 2006 etwa 2,1 Mrd. Passagiere bei einer Verkehrsleistung von 3914 Mrd. Passagierkilometer befördert. Hinzu kommt der Frachtverkehr.

Die Auswirkungen auf die Umwelt konnten jedoch durch technische Verbesserungen in Grenzen gehalten werden. In den letzten 40 Jahren sank der spezifische Kraftstoffverbrauch der Flugzeuge um rund die Hälfte. Hierzu haben vor allem eine verbesserte Aerodynamik, leichtere Bauweisen und sparsamere Triebwerke beigetragen. Dies hat bewirkt, dass der Treibstoffverbrauch in

Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon während eines Messflugs hinter Verkehrsflugzeugen.





geringerem Maße gestiegen ist als die Transportleistung. Dennoch müssen noch wesentlich mehr Anstrengungen unternommen werden, den spezifischen Kraftstoffverbrauch zu senken, wenn die hochgesteckten Ziele der Vision 2020 erfüllt werden sollen. Diese fordern eine Reduktion des Kohlendioxids um 50 Prozent und der Stickoxide um 80 Prozent im Vergleich zur Technologie des Jahres 2000.

Für die weitere Entwicklung einer klimaverträglichen Luftfahrt sind Kenntnisse über das Klima und mögliche Klimaschutzmaßnahmen wichtig. Das DLR erforscht daher die Klimawirkung des Luftverkehrs als Teil des gesamten Klimasystems. Es nutzt dazu sein gesamtes Instrumentarium, von der Erfassung der Verkehrsströme über die Messungen mit Forschungsflugzeugen und Satelliten, bis hin zur Modellierung der Klimawirkungen.

## Der Strahlungsantrieb

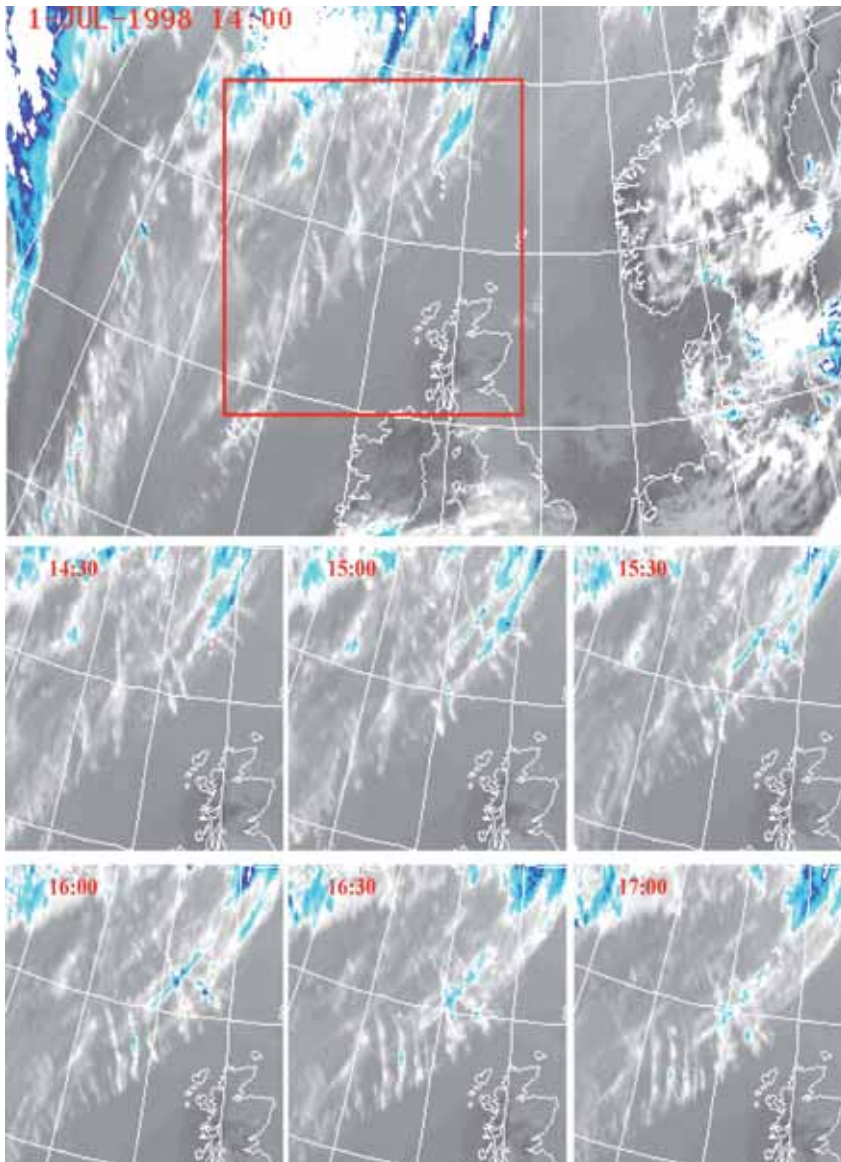
Die Klimawirkung wird häufig durch den Strahlungsantrieb beschrieben. Ein positiver Strahlungsantrieb führt zu einer Erwärmung und ein negativer zu einer Abkühlung. Der Strahlungsantrieb kann mit vergleichsweise einfachen Methoden berechnet werden, berücksichtigt aber

nicht die vielfältigen Rückwirkungen im Klimasystem, beispielsweise durch Änderung der Luftfeuchte und Bewölkung bei einer Erwärmung. Wie das Klima auf eine Störung reagiert, muss mit einem komplexen Modell berechnet werden. Auf eine konstante Störung passt sich das Klima erst nach vielen Jahrzehnten an. Derzeitige Modelle sagen für einen Strahlungsantrieb von  $1 \text{ W/m}^2$  eine globale Temperaturerhöhung von  $0,4$  bis  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$  voraus.

Der Luftverkehr wirkt auf unterschiedliche Weise auf das Klima ein. Im Rahmen eines europäischen Verbundprojektes wurden unter Federführung des DLR die Beiträge des Luftverkehrs ermittelt. Diese Werte gingen dann in den jüngsten IPCC-Bericht ein. Am genauesten ließ sich der  $\text{CO}_2$ -Beitrag des Luftverkehrs ermitteln, während mögliche Veränderungen der Bewölkung (vor allem Zirruswolken) durch Kondensstreifen und Partikel aus den Triebwerken noch mit den größten Unsicherheiten behaftet sind. Ohne die Beiträge aus den Zirrusänderungen hat der globale Luftverkehr zum Strahlungsantrieb bis zum Jahr 2000 etwa  $0,05 \text{ W/m}^2$  beigetragen. Das entspricht etwa 3 Prozent des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs von  $1,6 \text{ W/m}^2$ . Im Rahmen der bekannten Unsicherheiten kann der Luftfahrtanteil am Strahlungsantrieb zwischen 2 und 8 Prozent betragen.

Links: Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon misst die Zusammensetzung von Triebwerksemissionen.

Rechts: Kondensstreifen in einem Satellitenbild westlich von Spanien und Nordafrika. Anhand der länglichen Struktur kann ein Teil der Kondensstreifen (rot) mit einem Mustererkennungsverfahren aus den Satellitendaten automatisch erfasst werden. Einige der weiteren Zirren in der Nachbarschaft sind vermutlich auch aus Kondensstreifen entstanden.



Eine Serie von Meteosat-Bildern für die Region des nordatlantischen Flugkorridors nordwestlich Schottlands zeigt Wolken unterschiedlicher Temperatur. Die blaue Farbe charakterisiert Temperaturen unter  $-40^{\circ}\text{C}$ . Die Zeiten beziehen sich auf Weltzeit (UTC). Man erkennt den Übergang von Kondenssstreifen zu Zirren.

## Gas- und partikel-förmige Emissionen aus Triebwerken

Der Luftverkehr beeinflusst das Klima langfristig vor allem durch die Emission von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das im Mittel länger als 60 Jahre in der Atmosphäre verbleibt. Dieses Gas entsteht bei der Verbrennung von Kerosin, wobei pro Kilogramm Kerosin etwa  $3,15 \text{ kg CO}_2$  emittiert werden. Aufgrund von Analysen des Luftverkehrs hat die globale Luftfahrt (zivil und militärisch) im Jahr 2002 176 Millionen Tonnen Kerosin verbraucht, mit einem zivilen Anteil von 156 Millionen Tonnen. Laut der International Energy Agency (IEA) wurden im Jahr 2002 209 Millionen Tonnen Kerosin produziert. Im gleichen Zeitraum wurden aus allen anthropogenen Quellen zusammen global circa 25 600 Millionen Tonnen Kohlendioxid emittiert. Der Weltluftverkehr hat also im Jahr 2002 zwischen 1,9 und 2,6 Prozent aller anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emission beigetragen.

Bei der Kerosinverbrennung entstehen pro Kilogramm Treibstoff zudem durchschnittlich 13 Gramm Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), 3 g Kohlenmonoxid (CO) und 0,4 g Kohlenwasserstoffe. Etwa 40 Prozent der Stickoxidemissionen erfolgt in mittleren nördlichen Breiten oberhalb von 9 Kilometern. Dort besitzen die Moleküle eine Lebensdauer von einigen Wochen und fördern die Bildung von Ozon. Auf diese Weise verstärken sie den Klimaantrieb stärker als gleiche Emission am Boden. Gleichzeitig bauen die Stickoxide über photochemische Reaktionen indirekt Methan ab, das ebenfalls stark zum Treibhauseffekt beiträgt. Dadurch verringert sich der insgesamt positive Strahlungsantrieb der Stickoxide.



## Kondensstreifen und Zirren

Wasserdampf und Partikel aus den Triebwerken verbleiben ebenfalls mehrere Wochen lang in der Atmosphäre. Beispielsweise entstehen pro Kilogramm Treibstoff etwa 0,025 g Rußpartikel und 0,8 g Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), das zu Schwefelsäuretröpfchen weiter reagieren kann. Diese Bestandteile verursachen zwar einen deutlich geringeren direkten Strahlungsantrieb als  $\text{CO}_2$ , aber sie tragen zur Bildung von Kondensstreifen bei. Die Partikel können zudem auch ohne Kondensstreifen die Bewölkung verändern. Kondensstreifen entstehen, wenn hinter den Triebwerken ein Teil des Wasserdampfes aus dem Abgas zu kleinen Wassertropfen kondensiert. In der kalten Umgebungsluft gefrieren die Tropfen rasch zu Eispartikeln. In trockener Luft verdampfen diese Kristalle nach einigen Sekunden, und der Kondensstreifen löst sich wieder auf. In sehr feuchter Luft nehmen die Eispartikel aber weiter Wasserdampf aus der Umgebung auf und werden größer. Dann breiten sich die Kondensstreifen aus und können mehrere Stunden lang am Himmel verbleiben.

Unter bestimmten Bedingungen können sich aus Kondensstreifen allmählich künstliche Zirruswolken entwickeln. Zirren vermindern die am Boden ankommende Sonnenstrahlung und die in den Weltraum emittierte Strahlung von der Erdoberfläche. Die Klimawirkung von Zirren ist jedoch nicht eindeutig: Nachts wärmen sie, während sie tagsüber je nach Bedingungen wärmen oder kühlen können. Nach bisherigen Untersuchungen überwiegt die Erwärmung auch am Tag.

Auf Satellitenbildern erkennt man, wie sich aus Kondensstreifen allmählich künstliche Zirruswolken entwickeln, die

längliche Strukturen besitzen. Diese Wolken bedecken über Mitteleuropa etwa 0,5 Prozent des Himmels. Jedoch ist der Strahlungsantrieb durch diese linearen Kondensstreifen etwa dreimal kleiner als in einer ersten Schätzung erwartet, da die Kondensstreifen optisch dünner sind als früher angenommen und daher weniger erwärmen. Auch erste Ergebnisse, wonach die aus Kondensstreifen entstehenden Zirren einen zehnfachen höheren Bedeckungsgrad bewirken, erwiesen sich als nicht stichhaltig. Schätzungen gehen heute von einem Strahlungsantrieb um  $30 \text{ mW/m}^2$  aus, wobei Werte bis zu  $80 \text{ mW/m}^2$  nicht auszuschließen sind.

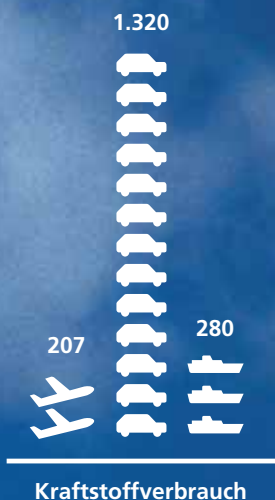
## Beitrag des Luftverkehrs zur globalen Erwärmung

Der Luftverkehr hat zur globalen Erwärmung der Erdoberfläche von circa  $0,7^\circ\text{C}$  mit  $0,02$  bis  $0,03^\circ\text{C}$  beigetragen, wie Klimamodellrechnungen belegen. Da das System Atmosphäre-Ozean sehr träge ist, folgt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche dem Strahlungsantrieb mit einer Verzögerung von etwa 40 Jahren. Für einen konstanten Strahlungsantrieb von  $50 \text{ mW/m}^2$  wäre langfristig mit einer Zunahme der Temperatur an der Erdoberfläche von  $0,04^\circ\text{C}$  im globalen Mittel zu rechnen. Da die Emissionen aus der Luftfahrt im Wesentlichen in den letzten 30 Jahren erfolgten, ist das Atmosphäre-Ozean-System noch lange nicht in einem neuen thermischen Gleichgewicht. Daher ist die bisherige Erwärmung kleiner als im Gleichgewicht. Die globale Erwärmung wird deshalb auch in Zukunft selbst bei konstanter Emission weiter zunehmen.

Kondensstreifen hinter einem Strahlflugzeug über dem Nordatlantik.

Verbrauch/Emmission des Luft-, Straßen- und Schiffsverkehrs in Jahr/Mio. Tonnen

(Q: Eyring et al., 2005)



Im Zusammenhang mit einem möglichen Emissionshandel wurde vorgeschlagen, die CO<sub>2</sub>-Emission des Luftverkehrs mit einem konstanten Faktor zu multiplizieren, um so die gesamte Treibhauswirkung der Emissionen des Luftverkehrs zu erfassen. Ein Faktor 3 wird mit dem Ergebnis des IPCC von 1999 begründet. Dieser Faktor ist jedoch stark vom betrachteten Zeitraum abhängig. Bei Ozon und den Kondensstreifen folgt der Strahlungsantrieb den Emissionen in wenigen Tagen oder Wochen und daher praktisch unmittelbar. Dagegen folgt der Strahlungsantrieb bei CO<sub>2</sub> der über viele Jahrzehnte hinweg emittierten Menge. Zudem verzögert sich die Erwärmung der Erde wegen der Trägheit des Atmosphäre-Ozean-Systems um Jahrzehnte. Man kann daher den Beitrag der verschiedenen Emissionen nicht mit einem konstanten Faktor bewerten.

## Trends und Maßnahmen

Während die Transportleistung im Weltluftverkehr zwischen 1990 und 2004 um 5,4 Prozent pro Jahr gewachsen ist, hat der Treibstoffverbrauch des globalen Luftverkehrs (und damit die CO<sub>2</sub>-Emission) nur um 2 bis 3 Prozent pro Jahr zugenommen. Der Luftfahrt ist damit eine wesentliche Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs (pro Sitz und Kilometer) gelungen. Die absoluten Emissionen sind aber deutlich gewachsen. Die Stickoxidemissionen stiegen um 4 bis 5 Prozent pro Jahr und damit etwas rascher als der Treibstoffverbrauch. Bei den gegenwärtigen Trends könnte sich der Anteil des Luftverkehrs an den gesamten weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 verdoppeln. Wie ließe sich dieser Trend aufhalten?



Technisch machbar erscheint es, die spezifischen Stickoxidemissionen zu verringern. Die Bildung von Kondensstreifen lässt sich nicht durch bessere Triebwerke vermeiden. Im Gegenteil, neue Antriebe, mit größerem Wirkungsgrad, nutzen den Treibstoff effektiver und verursachen einen kälteren Abgasstrahl und dadurch Kondensstreifen in einem größeren Höhenbereich. Das DLR untersucht daher zusammen mit externen Partnern neue Flugverfahren, bei denen der Luftverkehr je nach Wetterlage um zirrusträchtige Gebiete herumgeführt wird. Auch ein Wechsel der Flughöhe um einige hundert Meter könnte die Bildung von Kondensstreifen-Zirren vermeiden. Dies erfordert jedoch sehr genaue Vorhersagen des Wetters, der Bewölkung und der Luftchemie, wenn man Umwege mit mehr Treibstoffverbrauch oder mehr Ozonbildung vermeiden will.



Das Klima entwickelt sich global. DLR-Forschungsflugzeuge sind daher auch im ewigen Eis unterwegs.

Gegenwärtig wächst die Nachfrage nach Mobilität schneller, als man durch bessere Technologie die Emissionen reduzieren kann. Daher ist die beschleunigte Entwicklung treibstoffsparender Technologien mit geringeren CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen vordringlich. Hierzu gehören auch neue Verfahren der Flugführung, mit besserer Ausnutzung von Rückenwinden und geringerer Bildung von Kondensstreifen-Zirren. Die weitere Forschung im DLR ist darauf ausgerichtet, die bestehenden Unsicherheiten in der Bewertung der Klimawirkungen des Luftverkehrs und alternativer Verkehrsformen genauer zu quantifizieren und zu reduzieren.

**Der Strahlungsantrieb durch die Luftfahrt in mW/m<sup>2</sup> für das Jahr 2000**

Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	25
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) durch Ozonbildung (O <sub>3</sub> )	22
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) durch Methanabbau (CH <sub>4</sub> )	-10
Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	2
Sulfatpartikel	-3,5
Rußpartikel	2,5
Kondensstreifen	10
Zirren (Wolkenänderungen)	0 bis 80
Summe (ohne Zirren)	48

**Autoren:**

Prof. Dr. habil. Ulrich Schumann, Institutsdirektor, Institut für Physik der Atmosphäre; Prof. Dr. Robert Sausen, Institut für Physik der Atmosphäre; Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick, Forschungsgruppe für das Lufttransportkonzept und Technologiebewertung.

**Kondensstreifen hinter einem zweimotorigen Strahlflugzeug.**



# Zukunftsweisende Flugzeugkonstruktionen

Rechts: Laminarseitenleitwerk im Windkanal der französischen Partnerorganisation ONERA.

Die Auswirkungen der Luftfahrt auf das Klima lassen sich verringern, wenn man die Effizienz von Flugzeugen erhöht. Diese wichtige Größe berechnet sich aus dem Kraftstoffverbrauch pro Passagier pro 100 Kilometer. Flugzeuge erzielen dann eine hohe Effizienz, wenn sie über eine hohe aerodynamische Güte verfügen, möglichst viel Nutzlast bei geringer Leermasse transportieren und die Triebwerke wenig Treibstoff verbrauchen. Antriebe, Aerodynamik und Leichtbau sind deswegen zentrale Forschungsschwerpunkte des DLR.

Die aerodynamische Güte von Flugzeugen lässt sich auf vielfältige Weise verbessern, zum Beispiel, indem man den Reibungswiderstand senkt. Reibung mit der Luft tritt insbesondere dort auf, wo die Strömung turbulent wird. Aus diesem Grunde suchen Ingenieure schon seit langem nach Möglichkeiten, diese Turbulenzen zu verhindern und die Luft gleichmäßig oder wie man sagt laminar das Flugzeug umströmen zu lassen. Eine solche Laminarhaltung kann den Gesamtwiderstand eines Verkehrsflugzeugs um bis zu 20 Prozent senken. Eine deutliche Verringerung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen wären die Folge.

Aerodynamiker des DLR haben in Zusammenarbeit mit europäischen Partnern bereits in zahlreichen Untersuchungen bis hin zu Flugversuchen die grundsätzliche Machbarkeit der Laminarhaltung von Tragflügeln, Triebwerksgondeln und Leitwerken an Flugzeugen nachgewiesen. Die Wirksamkeit der Technologie muss

jedoch unter allen Betriebsbedingungen und über die gesamte Lebensdauer eines Flugzeuges gewährleistet bleiben. Hier bestehen nach wie vor Wissens- und Erfahrungslücken, die es durch gezielte Forschungsarbeiten zu füllen gilt.



Ein weiterer Ansatz, den Luftwiderstand zu verringern, besteht in der Verwendung von Mikrostrukturen auf der Oberfläche. So lässt sich beispielsweise durch Aufbringen von sogenannten Riblets, eine Struktur, die der Haifischhaut nachempfunden ist, der Reibungswiderstand von Flugzeugrümpfen weiter senken. Allerdings ist dies nur in deutlich geringerem Maße möglich als mit der Laminarhaltung von Flügeln.

Eine weitere Steigerung der aerodynamischen Güte versprechen deformierbare Flügel, die sich den unterschiedlichen Gegebenheiten im Flug anpassen. Moderne Verkehrsflugzeuge sollen im Reiseflug effizient schnell fliegen können, aber auch bei Start und Landung bei geringer Geschwindigkeit sicher sein. Gegenwärtig passt man die Flügelstruktur mit Hochauftriebssystemen wie Krüger- und Fowler-Klappen den unterschiedlichen Bedingungen an. Bei adaptiven Flügeln würden im Innern angebrachte Aktuatoren Teile des Flügels stufenlos verformen und dadurch die Flugeigenschaften optimieren. An solchen adaptiven Flügeln forschen Ingenieure des DLR.

Beispiel für unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen.





Zukunftsweisende Flugzeugkonstruktionen mit neuen Materialien

Modell eines Nurflügelflugzeugs.



Der zweite entscheidende Beitrag zur Effizienzsteigerung von Flugzeugen ist die Gewichtsreduzierung. Durch einen intelligenten Leichtbau, beispielsweise an Tragflügeln, Leitwerken und Rumpf, könnte eine Treibstoffreduzierungen von 5 Prozent erreicht werden. Auch hier hat es entscheidende Fortschritte gegeben, wobei vor allem der Einsatz neuer Werkstoffe, wie kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK), optimierte Bauweisen und rationelle Fertigungsverfahren die größten Beiträge geleistet haben. Jüngste Beispiele für diesen Technologiesprung sind der Airbus A 350 und der „Dreamliner“ Boeing 787. Bei diesen neuen Hochleistungsstrukturen spielen die Entwurfsmethoden eine entscheidende Rolle. Die rasante Entwicklung der Computerleistung ermöglichte es, immer präzisere Modelle der Flugzeuge zu entwickeln. Damit ließ sich deren Gewicht ohne Sicherheitseinbußen verringern.

Einige dieser Konzepte befinden sich noch in der Erprobungsphase, können aber in zukünftige konventionelle Flug-

zeugentwürfe Eingang finden. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Energieeinsparungen durch optimierte Bordsysteme. Hierzu zählt zum Beispiel der Ersatz der Hilfsgasturbine durch eine Brennstoffzelle. Ein derartiges System soll in Kürze im Testflugzeug ATRA des DLR erprobt werden. Weiteres Potenzial zur Minimierung von Emissionen bieten letztlich auch unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen wie Nurflügel- oder Dreiflächenflugzeuge. Auch an diesen Entwicklungen ist das DLR beteiligt.

**Autoren:**

Arne Seitz, Dr.-Ing. Martin Hepperle, beide Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik; Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik.

Links: Laminaflügelkonzept im Flugversuch am DLR-Forschungsflugzeug ATTAS.

Rechts: Fertigung einer Leichtbaustruktur aus CFK für Flugzeugrümpfe.

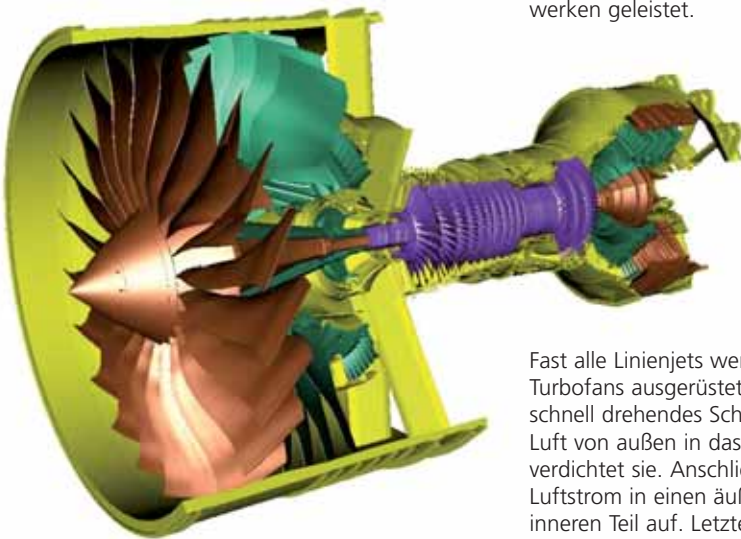
# Neue Triebwerke – effizienter, leiser, schadstoffärmer

Die Flugzeugtriebwerke stehen seit jeher im Zentrum neuer technologischer Entwicklungen. Sparsamer Verbrauch, geringer Schadstoffausstoß, abnehmende Lärmbelastigung bei optimaler Sicherheit und Leistung. So lauten die Anforderungen, denen sich die Ingenieure stellen müssen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden in diesem Bereich bereits große Fortschritte erzielt. So ist der Ausstoß an Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Ruß erheblich zurückgegangen. Gemeinsam mit Partnern in der Flugzeugindustrie und europäischen Instituten hat das DLR bedeutende Beiträge zur Weiterentwicklung von Triebwerken geleistet.

Charakteristisch für einen Turbofan ist ein großes Verhältnis der Luftmengen vom äußeren Luftstrom zum inneren, der durch die Gasturbine strömt. Dieses Nebenstromverhältnis wurde in der Vergangenheit immer mehr vergrößert. Triebwerke wurden also so konstruiert, dass mehr Luft an der Antriebsturbine vorbeiströmt. Dies senkt den Treibstoffverbrauch. Zusammen mit weiteren technischen Maßnahmen ließen sich auf diese Weise Brennstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen um 15 Prozent reduzieren. Mit weiteren Fortschritten in der Brennkammertechnologie konnte der Ausstoß von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Ruß sogar um 80 bis 90 Prozent gesenkt werden.

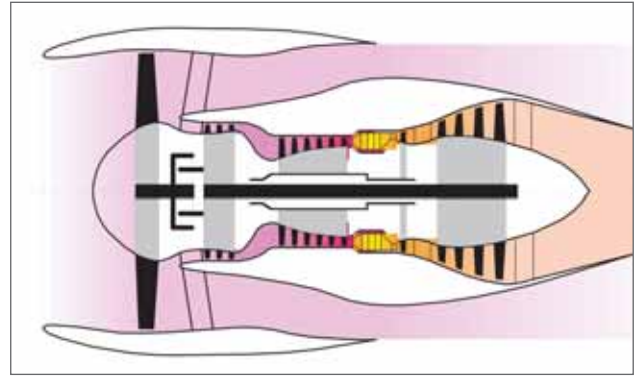
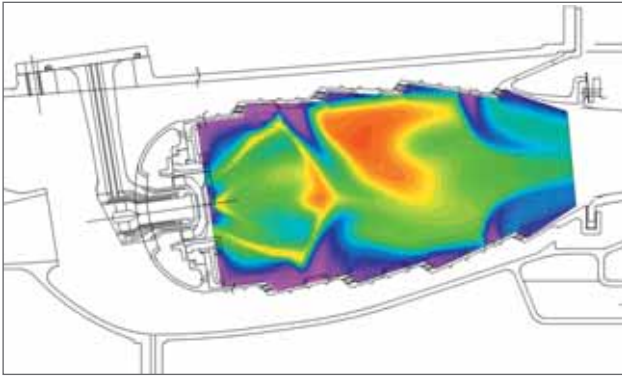
Allerdings führte die Erhöhung der Effizienz notwendigerweise zu höheren Temperaturen und Drücken in der Brennkammer mit der Folge, dass sich die Emission von Stickoxiden im gleichen Zeitraum nicht verringern ließ. Daher widmet die internationale Luftfahrtorganisation ICAO dem Stickoxidgrenzwert für Triebwerke besondere Aufmerksamkeit. Der von ihr aufgestellte international gültige Zertifizierungswert begrenzt die emittierte Menge an Stickoxiden bei einem Standardzyklus im Flughafenbereich. Zwischen 1986 und 2004 wurde er um insgesamt 36 Prozent gesenkt, im Jahr 2008 wird er nochmals um 12 Prozent verringert.

Da sich auch zukünftig die Effizienz der Triebwerke nur steigern lässt, indem man gleichzeitig Temperatur und Druck in der Brennkammer erhöht, wird die Einhaltung des Stickoxidgrenzwertes die Brennkammerforschung vor enorme Herausforderungen stellen. Aller Wahrscheinlichkeit nach werden die neuen Grenzwerte der Stickoxidemissionen nicht mehr mit heute üblichen Verbrennungstechniken erreicht werden können. Eine aussichtsreiche Möglichkeit bieten



Gegenläufiges Ultrahochbypass-Triebwerk (die braunen Komponenten drehen entgegengesetzt zu den grünen Komponenten (Bild: GE).

Fast alle Linienjets werden heute mit Turbofans ausgerüstet. Hierin saugt ein schnell drehendes Schaufelrad, der Fan, Luft von außen in das Triebwerk ein und verdichtet sie. Anschließend teilt sich der Luftstrom in einen äußeren und einen inneren Teil auf. Letzterer wird in einem Turbokompressor weiter verdichtet. In der anschließenden Brennkammer wird der Treibstoff eingespritzt und diese Mischung dann verbrannt. Dabei erhöhen sich Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Gases, das eine dahinter folgende Turbine als Antrieb für den Turbokompressor und den Fan treibt. Anschließend werden sowohl der innere Luftstrom aus der Turbine als auch der außen vorbeigeleitete Luftstrom aus dem Fan in einer Düse beschleunigt ausgestoßen. Hierbei entsteht der Rückstoß, der das Flugzeug antreibt.



Magervormischnbrenner. Diese benötigen aus Sicherheits- und Stabilitätsgründen einen Pilotbrenner, der entweder separat oder im Hauptbrenner integriert arbeitet. Das DLR untersucht gemeinsam mit der Triebwerksindustrie ein solches Konzept.

Darüber hinaus stoßen die Optimierung einzelner Triebwerkskomponenten und die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses bei den konventionellen Triebwerkstechniken mittlerweile an Machbarkeitsgrenzen und verlangen neue Konzepte. In naher Zukunft werden dies voraussichtlich Ultrahochbypass-Triebwerke sein. Diese sind entweder mit einem Getriebe ausgestattet, das Fan, Verdichter und Turbine mit ihren jeweils optimalen Drehgeschwindigkeiten betreibt, oder sie weisen zwei gegenläufige Fans auf. Erste Ergebnisse zeigen, dass diese neuartigen Triebwerke das Potenzial haben, den Brennstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf typischen Flügen um 16 Prozent zu senken.

Neben Weiterentwicklungen am Triebwerk werden im Zuge knapper werdender Erdölvorkommen zunehmend auch alternative Brennstoffe, beispielsweise aus Braunkohle, Steinkohle oder Biomasse untersucht. Diese haben den Vorteil, dass sie sich den Anforderungen entsprechend designen lassen. Die in der Luftfahrt verwendeten Treibstoffe unterliegen jedoch

restriktiven Spezifikationen für viele Eigenschaften wie Flammpunkt oder Zündpunkt. Diese Richtlinien müssen auch alternative Brennstoffe einhalten. In der Praxis wird bereits aus Kohle ein absolut schwefelfreier Treibstoff produziert. Biomasse und organische Abfälle sind dagegen in ihrer Zusammensetzung relativ uneinheitlich, was die Herstellung von Flugtreibstoffen erschwert und die Kosten deutlich erhöht. Alternative Brennstoffe sind auch im DLR ein wichtiges Forschungsthema.

Die Entwicklung zukünftiger Antriebskonzepte erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, in dem Triebwerk, Flugzeug und Flugverlauf gemeinsam betrachtet werden. Eine solche Vorgehensweise ist nötig, um Vor- und Nachteile der Triebwerke erfassen zu können. Auch dies ist ein weiteres Zukunftsthema, dem sich das DLR intensiv widmet.

**Autor:**  
Dr.-Ing. Andreas Döpelheuer, Institut für Antriebstechnik;  
Dr.-Ing. Peter Gerlinger, Institut für Verbrennungstechnik.

Links: Moderne Brennkammer mit konventionellem Luftzerstäuberbrenner (Bild: Rolls-Royce).

Rechts: Schema eines Ultrahochbypass-Triebwerkes mit Getriebe zwischen Fan und Verdichter.

Modernes Zweikreistriebwerk (Bild: Rolls-Royce).



# Raus aus der Warteschleife mit neuem Luftverkehrsmanagement

In Anbetracht des prognostizierten Wachstums des Luftverkehrs mit einer Verdoppelung bis 2020 haben die Europäische Kommission und Eurocontrol die Initiative SESAR (Single European Sky ATM Research Programme) ins Leben gerufen. Einer der vier Schwerpunkte dieses Projekts betrifft die Reduzierung der Gesamtemissionen des Luftverkehrs pro Flug. Hier werden also neben den Emissionen während des Fluges auch alle anderen Aktivitäten auf den Flughäfen in die Bilanz mit einbezogen. Diese Gesamtemission soll von 2005 bis 2020 um 10 Prozent pro Flug reduziert werden.

Dass ein ausgefeilteres Luftverkehrsmanagement dringend nötig ist, belegen Zahlen der Lufthansa. Sie gibt für 2006 einen Gesamtverbrauch für Warteschleifen vor der Landung und Abweichungen vom geplanten Flugverlauf von 142.000 Tonnen Treibstoff an, was etwa 2 Prozent des Gesamtverbrauchs entspricht. Mit Hilfe von 4D-Trajektorien sollen Planungssysteme am Boden die Flugzeuge besser koordinieren und Wartesituationen frühzeitig erkennen. Wohlgeordnete Verkehrsströme sollen Staus am Himmel und vor der Startbahn verhindern, noch ehe sie entstehen.



**Schleppen ist effizienter als Rollen mit dem eigenen Antrieb.**

Viele Großflughäfen sind schon heute an ihre Kapazitätsgrenzen angelangt. Die Folgen: Warteschlangen in der Luft und am Boden. In der Klimastudie des IPCC von 1999 sollten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbesserungen des Flugverkehrsmanagements um bis zu 12 Prozent verringern lassen. Voraussetzung hierfür ist ein flexibel handhabbares Luftverkehrsmanagement. So sollen moderne Flugzeuge zukünftig ihren Flugverlauf räumlich und zeitlich exakt berechnen können. Einen solchen Flugverlauf nennt man 4D-Trajektorie.

Mithilfe von 4D-Trajektorien ließe sich der Luftverkehr zeitlich besser planen und steuern. Gleichzeitig wird im Rahmen von SESAR darüber nachgedacht, dieses neue Werkzeug als sogenannte Business Trajectory zu gestalten. Dann hat ein Pilot die Möglichkeit, seine bevorzugte Flugbahn mitzuteilen, woraufhin die Flugsicherung versucht, diese möglichst ungestört umzusetzen. Mit Hilfe der Business Trajectory ließen sich Routen und Höhen von Flügen optimieren. Darüber hinaus böte sich die Möglichkeit, möglichst spät und mit Triebwerken in Leerlaufstellung zu sinken. All diese Maßnahmen würden Treibstoffverbrauch und Schadstoffemission verringern.

Am meisten einsparen ließe sich durch das Vermeiden von Umwegen. Allein 2006 hatten Umwege im Luftverkehr über Europa einen zusätzlichen Ausstoß von 4,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> zur Folge – etwa 5 Prozent der gesamten Emissionen. Unnötige Flugverlängerungen ergeben sich aus dem heutigen Luftstraßensystem, das nur selten die kürzeste Verbindung zwischen Start- und Zielflughafen anbietet. Bei einem Flug von Hamburg nach Toulouse ließe sich die Distanz im Vergleich zu heute auf der direkten Strecke um etwa 100 Kilometer verkürzen, wodurch man beispielsweise mit einem Airbus A330-300 2.470 Kilogramm CO<sub>2</sub>



eingespart würde. Dies entspricht etwas mehr als 6 Prozent der Emissionen auf der gesamten Strecke.

Dabei wären heute zu lange Routen gar nicht mehr nötig. Moderne Flugzeuge können mit Hilfe der Satellitentechnik sehr präzise navigieren und sind eigentlich nicht mehr auf Luftstraßen angewiesen. In Kombination mit dem Business Trajectory soll diese Fähigkeit in SESAR genutzt werden, um die Flugzeuge auf direktem Weg sicher zum Ziel zu führen.

Allerdings können die Fluglotsen die Einhaltung der komplizierten Trajektorien, insbesondere deren zeitlichen Ablauf, nur noch mit Unterstützung automatischer Systeme überwachen. Wie die Rolle der Lotsen in Zukunft gestaltet werden sollte und wie die hierfür benötigten Unterstützungssysteme aussehen können, ist Gegenstand der heutigen Forschung. Eine Möglichkeit könnte darin bestehen, die Wahl der Flugroute an den Piloten zu delegieren. Unterstützt durch entsprechende Techniken an Bord könnte er selbst für einen sicheren Abstand zu anderen Flugzeugen sorgen.

Der Hauptanteil der Flugzeugemissionen entsteht zwar bei den Langstreckenflügen, aber insbesondere bei den Zubringerflügen zu den großen Drehkreuzen fällt der Treibstoffverbrauch durch Verzögerungen beim Start und das Rollen am Boden zum Teil erheblich ins Gewicht. Reduziert sich die Wartezeit vor dem Start jeweils um 5 bis 8 Minuten, so könnten beispielsweise in Frankfurt bis zu 30.000 Tonnen Kerosin pro Jahr eingespart werden. Simulationen und Experimente des DLR haben gezeigt, dass dieses Ziel erreichbar ist, wenn computergestützte Optimierungsverfahren die Lotsen unterstützen.

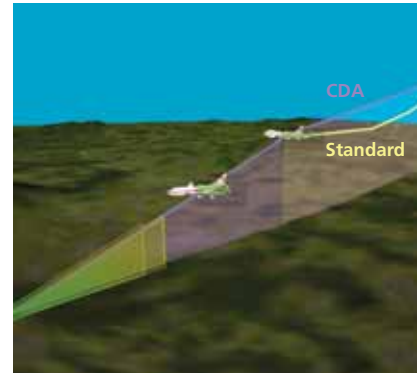
Außerdem bahnt sich beim Bodenverkehr auf den Flughäfen derzeit eine drastische Änderung an. Die Fluglinie Virgin Atlantic testet in Zusammenarbeit mit

Boeing, ob das Schleppen von Großraumjets anstelle des Rollens aus eigener Kraft zwischen Terminal und Kurzparkplätzen an der Startbahn praktikabel ist. Dieses Operational Towing könnte beim Rollen mindestens die Hälfte an Treibstoff sparen. Abhängig von der erforderlichen Aufwärmdauer der Turbinen sind sogar mehr als 90 Prozent möglich. Bei einem mittleren Treibstoffeinsatz fürs Rollen von 2,5 Litern pro Passagier und pro Flug ergibt sich für Kurzstreckenflüge von einigen hundert Kilometern eine Treibstoffersparnis von 5 bis 10 Prozent. An einem Flughafen wie Frankfurt mit 500.000 Flugbewegungen pro Jahr summiert sich dies auf bis zu 60.000 Tonnen Kerosin, entsprechend etwa 180.000 Tonnen weniger CO<sub>2</sub>.

Das DLR-Projekt GRAiCE (Green Airport Control Center) wird demnächst die absehbaren Entwicklungen zur Emissionsreduzierung und Kapazitätserhöhung im Flughafenumfeld aufgreifen. Aus heutiger Sicht scheint es durchaus möglich, mit der SESAR-Initiative die angestrebte Treibstoffeinsparung von 10 Prozent zu erreichen. Gleichzeitig gewinnt auch der Blick auf alternative Verkehrsmittel, insbesondere die Bahn, immer mehr an Bedeutung. Jüngstes Beispiel sind die neuen Verbindungen von Frankfurt und Stuttgart nach Paris. Aus diesem Grund werden beim DLR neben dem Luftverkehr auch die anderen Verkehrsträger in die Forschungsarbeiten mit einbezogen.

#### Autoren:

Dr. phil. nat. Norbert Fürstenau, Ralf Kohrs, Alexander Kuenz, und Meilin Schaper, Institut für Flugführung.



Unterschied zwischen einem Anflug auf einen Flughafen, bei dem die Triebwerke früh in Leerlaufstellung gehen (CDA – violette Linie) und einem Standardanflug (gelbe Linie). Der CDA-Anflug spart Treibstoff, verringert die Schadstoffemissionen und ist leiser.



Arbeitsplatz eines Radarlotsen.

Warten auf die Start-erlaubnis. Ein Departure-Manager-System kann solche Situationen entschärfen.

# Entwicklung des Luftverkehrs in der Zukunft

Ein leistungsfähiger Luftverkehr ist eine Grundvoraussetzung für die Mobilität der Gesellschaft und die Funktionsfähigkeit der globalen Wirtschaft. Auch in Zukunft wird der Luftverkehr eine tragende Rolle im Transportwesen spielen. Die Interessenslagen bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Luftverkehrs sind jedoch keineswegs einheitlich: während Flughäfen beispielsweise den Großteil ihres Profits durch Geschäfte und Dienstleistungen im Terminal erwirtschaften und sich daher über möglichst lange Verweilzeiten der Passagiere freuen, besteht bei der Mehrzahl der Passagiere der Wunsch, Umsteige- und Wartezeiten möglichst kurz zu halten. In ähnlicher Weise bestehen zwischen allen Beteiligten – Passagiere, Hersteller, Betreiber, Flughäfen, Flugsicherung, um nur die wichtigsten zu nennen – zahlreiche Zielkonflikte, die eine für alle Beteiligten interessensmaximierte Gestaltung des Lufttransportsystems unerreichbar machen.

Einige Entwicklungstendenzen zeichnen sich bereits heute ab: Vor dem Hintergrund, dass Umweltfragen zunehmend die gesellschaftliche Diskussion und politische Agenda bestimmen, wird die Akzeptanz des Luftverkehrs erheblich mehr als bisher von seiner Effizienz und Umweltverträglichkeit abhängen. Ab 2011 wird der Luftverkehr zudem in den Emissionshandel mit einbezogen. Dadurch wächst der Druck auf die Hersteller, umweltfreundliche und damit konkurrenzfähige Systeme anzubieten. Gleichzeitig nimmt die Erwartungshaltung der Passagiere zu: höhere Flugfrequenzen, häufigere Direktflüge und besserer Komfort und Unterhaltung werden gefordert. Dabei ist das Lufttransportsystem in seiner heutigen Form schon sehr weit

entwickelt. Entsprechend können solche gegensätzlichen Forderungen nur durch Technologiesprünge und systemübergreifende Optimierung erfüllt werden.

Um Ideen für revolutionäre Technologien zu identifizieren, werden zurzeit alle bisher verwendeten Materialien, Verfahren, Prozesse, Betriebsabläufe und Anforderungskataloge auf den Prüfstein gestellt. In dem Zusammenhang ist unter anderem festgestellt worden, dass eine verbesserte Wettervorhersage ein erhebliches Einsparpotenzial birgt und veränderte Flughöhen oder geringere Geschwindigkeiten einen positiven Effekt auf die Klimawirkbarkeit bzw. den Treibstoffverbrauch haben können. Ebenso könnte ein effizienteres Luftverkehrssystem im Jahr 2050, wie schon in vorherigen Kapiteln angedeutet, Nurflügelflugzeuge mit Wasserstoffantrieb ohne Piloten an Bord umfassen, die im Formationsflug zur Widerstandsreduktion große Teilstrecken eng gestaffelt zurücklegen. Zweifelsfrei ist auch die Abfertigung der Passagiere im Terminal nicht optimal. Lange Warte-

So könnte der zukünftige Arbeitsplatz von Fluglotsen aussehen.



In ferner Zukunft könnten Flugzeuge auch mit Wasserstoff fliegen.

zeiten am Check-In und bei der Sicherheitskontrolle sind die Regel, und nicht selten verzögert sich der Abflug, weil auf einzelne Passagiere gewartet werden muss. Neue Technologien zur Identifikation und Lokalisierung von Personen können helfen, diese Verzögerungen im Betriebsablauf, die zwangsläufig zu Mehrkosten und erhöhtem Energieverbrauch führen, zukünftig zu vermeiden. Vorbildfunktion haben hier die vollständig optimierten Frachttransportsysteme der Logistikfirmen.

Bei allen Überlegungen zu einem zukünftigen Lufttransportsystem gilt, dass jedes Prozent Einsparung umso wichtiger ist, je rascher es in der betrieblichen Praxis realisiert werden kann. Um das Potenzial im Gesamtsystem auch tatsächlich auszuschöpfen wird die Forschung und Entwicklung zudem einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen müssen. Entsprechend bedarf es eines Systementwurfs unter Beteiligung aller Disziplinen, gekoppelter Systemsimulationen und Optimierungsläufen sowie einer begleitenden Technologiebewertung.

Vorhersagen bergen natürlich immer Unsicherheiten. Das gilt auch für die zukünftige Entwicklung des Luftverkehrs. Als gute Handlungsgrundlage für die Forschung und Entwicklung dient da die Maxime von Alan Kay:

**„The best way to predict the future is to invent it“.**

In diesem Sinn ist das DLR mit seinen Einrichtungen bestens für die Zukunft aufgestellt und leistet seinen Beitrag, Spitzentechnologie für den Lufttransport von morgen zu entwickeln und Wege zu einem klimaverträglichen, integrierten Lufttransportsystem aufzuzeigen.

**Autoren:**

Dr.-Ing. Eike Stumpf und Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick, Forschungsgruppe für das Lufttransportkonzept und Technologiebewertung;  
Prof. Dr. habil. Ulrich Schumann, Institutsdirektor, Institut für Physik der Atmosphäre.



Konzept eines Großflughafens.

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig. Das DLR fungiert als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In 28 Instituten und Einrichtungen an den acht Standorten Köln-Porz (Sitz des Vorstandes), Berlin-Adlershof, Bonn-Oberkassel, Braunschweig, Göttingen, Lampoldshausen, Oberpfaffenhofen und Stuttgart beschäftigt das DLR ca. 5.300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Außenbüros in Brüssel, Paris und Washington, D.C.



DLR

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Linder Höhe  
51147 Köln

[www.DLR.de](http://www.DLR.de)