

LUFTFAHRT

Von Ulrich Schumann

**Ergebnisse eines
erfolgreichen
Verbundprojektes**

Der Luftverkehr wächst derzeit mit etwa fünf bis sieben Prozent pro Jahr. Dabei werden mehr als 130 Millionen Tonnen Treibstoff pro Jahr verbraucht. Doch wie stark beeinflusst der Luftverkehr die Umwelt? Und was kann man tun, damit der auch zukünftig wachsende Luftverkehr umweltverträglich ist? Diese Fragen sind auch aus wissenschaftlicher Sicht sehr interessant.

Der Luftverkehr wächst derzeit mit etwa fünf bis sieben Prozent

Denn über die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre in der Tropopausenregion weiß man vergleichsweise wenig; sie sind aber generell für das Wetter und das Klima wichtig. Das DLR hat die Emissionen des Luftverkehrs und ihre Auswirkungen auf den Zustand der Atmosphäre über mehrere Jahre hinweg intensiv erforscht. Es hat hierzu das Forschungsrepertoire von der Verkehrsforschung, über die Antriebstechnik, Insitu-Messungen mit Forschungsflugzeugen

UND UMWELT

und Messungen an Triebwerksprüfständen bis hin zur Fernerkundung und globalen Modellierung der Physik und Chemie der Atmosphäre ausgebaut und eingesetzt.

Die Forschungen wurden im Rahmen von nationalen und internationalen Verbundprogrammen mit kompetenten Partnern und mit finanzieller Hilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und

Technologie (BMBF) und der Europäischen Union durchgeführt. Neben der Atmosphäre wurde anfänglich auch die Technologie zur Reduktion von Schadstoffen in diesem Programm erforscht. Diese Teile werden jetzt im Luftfahrtforschungsprogramm der Bundesregierung fortgeführt. Ende März 1998 fand das Abschlußkolloquium zum Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“ statt, das von 1992 bis 1997 vom BMBF gefördert wurde.

■ Strahltriebwerke von Flugzeugen verbrennen Kerosin mit Luft. Die Verbrennungsprodukte werden in die Atmosphäre emittiert und verändern deren chemische und klimatische Eigenschaften.

Triebwerke emittieren Schadstoffe in die Atmosphäre

Zu den Emissionen gehören Gase wie Kohlendioxid,

Wasserdampf, Stickoxide, Schwefelverbindungen, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe sowie Rußpartikel. Ein großer Teil der Spurenstoffe wird von Flugzeugen im Reiseflug zwischen neun und zwölf Kilometern Höhe im Bereich der Tropopause freigesetzt, an der Grenze zwischen oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre.

Der Bereich der Tropopause ist durch niedrige Temperaturen und geringe Konzentrationen an Stickoxiden gekennzeichnet. Hier verursachen Flugzeuge die sichtbaren Kondensstreifen. Die Tropopause befindet sich auch nahe der stratosphärischen Ozonschicht, die vor ultravioletter Strahlung schützt. Daher haben Emissionen in diesem Bereich eine größere klimatische Wirkung als vergleichbare Emissionen in Bodennähe.

■ Im Mittelpunkt der Forschung zu den Schadstoffen in der Luftfahrt standen zunächst die Stickoxidemissionen. Stickoxide standen im Verdacht, den beobachteten Ozonverlust in der Stratosphäre zu verstärken.

Messung der Stickoxidemissionen im Reiseflug

Anfangs war nur bekannt, wie viele Stickoxide ein Triebwerk beim Betrieb am Boden emittiert.

Die Quellstärke der Stickoxide im Reiseflug konnte nur berechnet werden, wobei die Daten zur Prüfung solcher Rechnungen zunächst fehlten. Zusammen mit dem nationalen Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“ wurden im Rahmen des EU-Programms AERONOX

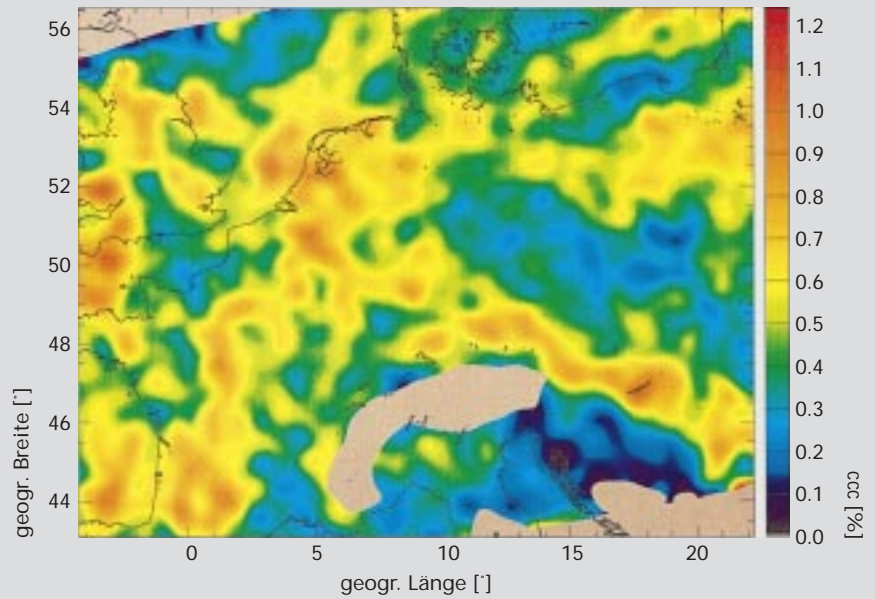
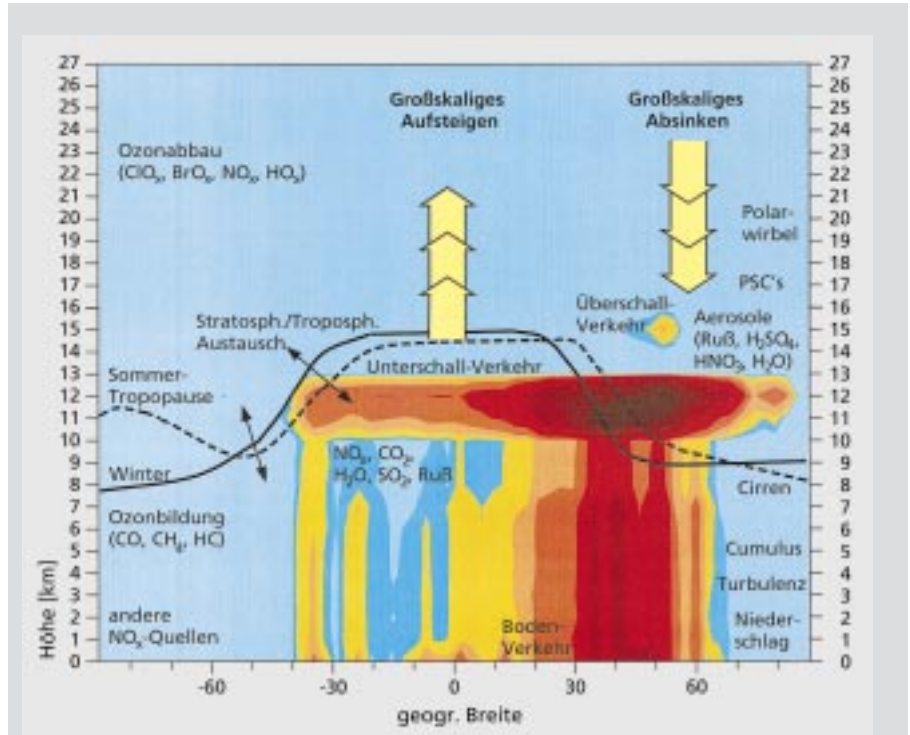


Abb. oben: Mittlere Höhe der Tropopause im Winter und Sommer, Quellverteilung der Stickoxide aus dem Luftverkehr (rot im Bereich maximaler Quellstärke) und relevante Prozesse.

Abb. unten: Aus Satellitenbildern im Laufe eines Jahres bestimmter mittlerer mittäglicher Bedeckungsgrad in Prozent der bedeckten Erdoberfläche von linienförmigen Kondensstreifen über Mitteleuropa.

daher die Emissionen auf zwei Höhenprüfständen vermessen. Die Daten wurden vom Institut für Antriebstechnik zur Anpassung der freien Parameter in den Rechenverfahren benutzt. Zudem wurden die Emissionen im Reiseflug für eine Vielzahl von Flugzeugen unmittelbar im Nachlauf gemessen. Aus der gleichzeitigen Messung der Zunahme der Konzentration von Kohlendioxid und Stickoxiden im Nachlauf eines Flugzeuges kann auf den Emissionsindex, das heißt auf die Masse des emittierten Stickoxides im Verhältnis zur Masse des verbrannten Treibstoffes geschlossen werden.

Bei einem Vergleich der gemessenen Emissionsindizes für verschiedene Verkehrs- und Forschungsflugzeuge im Reiseflug mit den Rechenergebnissen der Antriebstechniker ist erkennbar, daß Messung und Rechnung bis auf einen Fehler von etwa 15 Prozent übereinstimmen. Der Emissionsindex moderner Großraumflugzeuge ist größer als der älterer oder kleinerer Flugzeuge. Bei modernen Triebwerken wird ein höheres Bypass-Verhältnis verwendet, was den Treibstoffverbrauch senkt, aber höhere Temperaturen und Drucke in den Brennkammern erfordert und so zu mehr Stickoxiden pro Treibstoffmasse führt. Bei gleicher Transportleistung emittieren manche der modernen Flugzeuge durchaus weniger Stickoxide als die alten. Der Emissionsindex des Überschallflugzeuges Concorde, der in die gleiche Größenordnung fällt wie die moderner Unterschallflugzeuge, wurde von amerikanischen Wissenschaftlern gemessen. Erkennbar ist ein Trend zu größeren Emissionen, denen jetzt bei der Entwicklung neuer Triebwerke durch veränderte Brennkammerkonzepte entgegengewirkt wird.

Zur Beurteilung der luftchemischen Wirkung wurden dreidimensionale Atmosphärenmodelle entwickelt, die die Chemie und das Klima der Erdatmosphäre nachbilden. Mit solchen Modellen wurden die Ozonänderungen infolge der Stickoxidemissionen berechnet. Die Mo-

delle stützen sich auf Angaben über die weltweite Emissionsverteilung, die von der Verkehrsforschung aus den Ergebnissen der Antriebstechnik, teils im Rahmen des Programms AERONOX, ermittelt wurden. Der heutige Luftverkehr vergrößert die Konzentration an Ozon in allen seinen Höhenbereichen. Die Ozonänderung wächst in erster Näherung linear mit der Menge an emittierten Stickoxiden an. Die Stickoxide verursachen also keinen Ozonabbau, sondern im Gegenteil eine Ozonzunahme. Die Strahlungsbelastung durch ultraviolette Strahlung am Boden wird dadurch geringfügig kleiner. Auf der anderen Seite ist Ozon wie Kohlendioxid ein Absorber für infrarote Strahlung und verstärkt daher den Treibhauseffekt der Atmosphäre. Rechnungen mit einem Klimamodell zeigen, daß der heutige Luftverkehr durch Ozon die Erdoberfläche global um etwa ein Zehntel Grad erwärmen kann.

Messungen aus dem Forschungsflugzeug Falcon des DLR über dem Nordatlantik haben gezeigt, daß die Stickoxiderhöhung durch den Luftverkehr nachweisbar ist. Es wurden aber auch deutliche Verschmutzungen in Form von Schwefeldioxid, Azeton und Salpetersäure gefunden, die aus Bodenquellen stammen und zur Partikel- und Ozonbildung beitragen. Der relative Anteil des Luftverkehrs zum Ozon und zu den Aerosolen in der oberen Troposphäre im Vergleich zu den Emissionen aus Industrie, Hausbrand und Kraftfahrzeugen ist daher kleiner als bisher angenommen. Eine Veränderung der Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre aufgrund des Luftverkehrs ist bisher meßtechnisch nicht nachweisbar. Die natürlichen Konzentrationsschwankungen und Änderungen infolge der Emissionen aus anderen Quellen am Boden, durch Vulkane und durch den chlorbedingten Ozonabbau in der Stratosphäre überdecken bisher den Anteil des Luftverkehrs. Aufgrund der Wachstumspektiven der Luftfahrt kommt es dennoch in Zukunft darauf an, möglichst bald neue Flugzeuge mit neuen Triebwerken zu entwickeln und zum Einsatz zu bringen, die sowohl weniger Treibstoff verbrauchen als auch weniger Stickoxide freisetzen.

■ Die Verbrennungsprodukte enthalten auch Wasserdampf, der grundsätzlich ebenso ein Treibhausgas ist. Die vom heutigen Luftverkehr emittierten Mengen sind jedoch zu klein, um als Treibhausgas eine wesentliche direkte Klimawirkung zu entfalten. Allerdings kondensiert der Wasserdampf auf Partikeln im Abgasstrahl und bildet so die häufig sichtbaren Kondensstreifen.

Kondensstreifenbildung durch Wasserdampf

In trockener Umgebungsluft bilden sich kurzlebige Kondensstreifen, die sich nach wenigen Minuten auflösen; sie haben keine nennenswerte Auswirkung auf das Klima. Oft ist die Atmosphäre aber sehr feucht. Die Feuchte kann die Eissättigung übersteigen, ohne daß sich bereits Eispartikel und Cirruswolken bilden. Erst wenn hier ein Flugzeug lokal die Luft auch für flüssiges Wasser übersättigt, entstehen kleine Wassertropfen, die rasch gefrieren und die Bildung von Cirruswolken auslösen. Dadurch verursacht der Luftverkehr eine zusätzliche Bewölkung. Die Wolken sind in der Regel sehr dünn und lassen daher das meiste Sonnenlicht nahezu ungehindert auf den Boden gelangen; sie vermindern aber schon recht wirksam die Abstrahlung von Erdwärme in den Weltraum. Der Luftverkehr vergrößert also durch die zusätzlichen Wolken den Treibhauseffekt.

Dieser Effekt ist im Prinzip seit langem bekannt; nur war das quantitative Ausmaß noch offen. Um die zusätzliche Bewölkung zu messen, wurden daher Satellitendaten ausgewertet und mit Modellen die Klimawirkung berechnet. Die Untersuchungen zeigten, daß Kondensstreifen, soweit man sie an ihrer linienförmigen Struktur von natürlichen Cirren unterscheiden kann, über Mitteleuropa im Jahresmittel mindestens 0,5 Prozent der Erdoberfläche bedecken.

Aufgrund der Temperatur- und Feuchteverteilung in der oberen Troposphäre und der globalen Verteilung des Luftverkehrs wird global ein mittlerer Bedeckungsgrad durch Kondensstreifen von etwa 0,1 Prozent erwartet. Dies ist jedoch nur ein unterer Wert für die tatsächliche Bewölkung, da der Luftverkehr auch Wolken bildet, die im Satellitenbild nicht mehr als linienförmige Kondensstreifen erscheinen. Inzwischen gibt es aufgrund von Satellitendaten und Bodenbeobachtungen Anzeichen, wonach der Anteil hoher Bewölkung in den Regionen des Luftverkehrs um mehr als ein Prozent zugenommen hat. Es gibt jedoch mehrere Möglichkeiten, diese Änderungen zu erklären.

Die vom Luftverkehr verursachte zusätzliche Bewölkung in Form dünner Cirren wärmt die Troposphäre, was inzwischen durch Modellrechnungen gesichert ist. Zudem vermindert sie die Differenz des Tagesganges der Temperatur. Unter Cirren wird es tags nicht ganz so warm und nachts nicht ganz so kalt wie unter klarem Himmel. Die Wirkung der Kondensstreifen hängt außer vom Flächenanteil auch von ihrer Dicke ab. Je dicker sie sind, um so mehr erwärmen sie die Atmosphäre. Um Kondensstreifen zu vermeiden, müßte man ober- oder unterhalb der kalten und feuchten Regionen der oberen Troposphäre fliegen oder dafür sorgen, daß sich in den Kondensstreifen möglichst wenig Eispartikel bilden.

■ Die Bildung von Partikeln wird wesentlich von den Abgasen der Flugzeuge beeinflusst. Die Triebwerke emittieren Rußpartikel und partikelbildende Gase wie

Freisetzung von Rußpartikeln und Gasen

Schwefeltrioxid, Schwefelsäure und Salpetersäure. Messungen des MPI

Heidelberg und des DLR haben erstmals gezeigt, daß einige Prozent des Schwefels aus den Treibstoffen in Schwefelsäure umgewandelt werden. Die Messungen und Modellrechnungen mit Nukleationsmodellen zeigten, daß pro Kilogramm

Treibstoff etwa 10^{15} Rußpartikel emittiert werden und mehr als 10^{16} Partikel neu aus den Gasen entstehen. Die Partikel können die Chemie und das Klima in komplexer Weise modifizieren. An der Oberfläche von Ruß wird Ozon abgebaut, und Stickoxide werden in eine chemisch stärker reaktive Form überführt. In der Stratosphäre können Schwefelsäuretropfen anorganische Chlorverbindungen zu Chloroxid aktivieren, was den Ozonabbau prinzipiell verstärkt. Die Partikel eignen sich zudem als Kondensationskeime für Wolkentropfen und als Gefrierkerne für Eispartikel. Diese Vorgänge sind noch keineswegs ausreichend verstanden, daher kann deren Wirkungen auf das Ozon und das Klima noch nicht abschließend beurteilt werden. Es ist jedoch sicher empfehlenswert, die Partikelbildung, soweit mit angemessenem Aufwand machbar, zu reduzieren.

Desweiteren emittiert der Luftverkehr Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und verschiedene Kohlenwasserstoffe. Von zwei emittierten Kohlendioxidmolekülen kann eines auch nach 100 Jahren noch in der Atmosphäre wirksam sein. Dem Kohlendioxid bleibt daher viel Zeit, sich gleichmäßig über die Atmosphäre zu verteilen, und verursacht den Treibhauseffekt unabhängig davon, ob es am Boden oder im Reiseflug emittiert wird. Der Luftverkehr emittiert zur Zeit etwa 1,7 Prozent der durch menschliche Aktivitäten bedingten Freisetzung von Kohlendioxid, weniger als noch vor kurzem geschätzt wurde. Der Anteil wächst jedoch absolut und relativ stärker als andere anthropogene Kohlendioxidemissionen. Ohne Reduktion der Emissionen wird die Konzentration an Kohlendioxid in der Atmosphäre weiter stark ansteigen. Ebenfalls im Flug gemessen wurden Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, deren freigesetzte Menge stark vom Lastzustand der Triebwerke abhängt. Es gibt Anzeichen, daß einige Kohlenwasserstoffe kondensieren und so die Partikelmasse im Nachlauf von Flugzeugen vergrößern können. Für die Luftchemie sind diese Abgase anscheinend weniger relevant.

Obwohl grundsätzlich sehr schwierig und mit vielen Fehler belastet, kann berechnet werden, wie groß die Temperaturänderungen im globalen Mittel an der Erdoberfläche aufgrund der verschiedenen Emissionen des Luftverkehrs sind. Die bisherigen Luftfahrtemissionen haben die

Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre um etwa 1 bis 1.5 ppmv erhöht, was knapp zwei Prozent des seit 1800 beobachteten Anstiegs ausmacht. Dieser Anstieg hat die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bis heute um ca. 0,005 Grad Celsius erhöht – ein sicher sehr kleiner Wert. Der berechnete Klimaeffekt des Ozons ist größer; genauer läßt sich dies zur Zeit nicht sagen. Der Beitrag der Kondensstreifen ist im globalen Mittel ebenfalls etwas größer als der aus den Kohlendioxidemissionen, ist aber am wenigsten genau bestimmt. Eine Temperaturänderung am Boden infolge des Luftverkehrs ist bisher nicht durch Messungen nachweisbar. Der Beitrag ist klein im Verhältnis zu natürlichen Temperaturschwankungen. Dennoch ist er vorhanden und wächst. Nach vorliegenden Modellrechnungen ist nicht auszuschließen, daß die Temperaturänderung infolge des Luftverkehrs bis zum Jahr 2050 im globalen Mittel 0,2 Grad oder sogar noch mehr erreichen kann. Hier sind aber deutlich die Grenzen der Möglichkeiten der Klimavorhersage erreicht.

■ Im Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“ wurden insgesamt 25 einzelne Forschungsprojekte durchgeführt, die vom BMBF mit etwa 23 Millionen DM

Umfangreiche Forschung zu den Auswirkungen auf die Atmosphäre

gefördert wurden. Beteiligt an diesen Projekten waren die Universitäten

in Köln, München und Rostock, die Max-Planck-Institute für Chemie in Mainz, Meteorologie in Hamburg und Kernphysik in Heidelberg, das Forschungszentrum Jülich, das GKSS Forschungszentrum Geesthacht, die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihrem Institut für Umweltforschung in Garmisch-Partenkirchen sowie die Industrie mit der MTU-Dasa und der Firma Heckel und Partner. Die Lufthansa hat zu

den Messungen Prüfstände bereitgestellt und Messungen hinter einem Airbus ermöglicht.

Gleichzeitig hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Grundlagen der Auswirkungen der Luft- und Raumfahrt auf die Atmosphäre“ 28 Einzelvorhaben, vorwiegend an den Universitäten, gefördert. Die Europäische Kommission hat das verwandte Forschungsvorhaben AERONOX von 1992 bis 1994 gefördert und anschließend eine Reihe weiterer Forschungsvorhaben wie POLINAT, MOZAIC, AERO-CHEM, AEROCONTRAIL, AEROTRACE und AEROJET. Viele dieser Programme wurden vom DLR koordiniert. Später hat auch die amerikanische Raumfahrtagentur NASA umfangreiche Forschungsprogramme zu diesem Thema initiiert, die noch bis zum Jahr 2001 andauern werden.

Es ist offensichtlich, daß das Thema sowohl für die Industrie als auch für den Schutz der Erdatmosphäre von internationaler Bedeutung ist. Gegenwärtig erstellt ein internationales Expertengremium für das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) eine Bewertung des Wissensstandes, woran die Partner der hier beschriebenen Forschung maßgeblich beteiligt sind. Das Ergebnis dieser Studie soll 1999 veröffentlicht werden.

■ Trotz der umfangreichen internationalen Forschungen sind eine Reihe von wichtigen Fragen bisher nicht beantwortet. Beispielsweise untersucht das DLR

Unbeantwortete Fragen

wegen und den Niederlanden sowie anderen deutschen Gruppen derzeit den Anteil von Stickoxiden, der infolge von Blitzen in Gewittern entsteht. Offen ist auch, wie viele Stickoxide zusammen mit anderen Gasen aus den bodennahen Luftschichten in Gewittern oder an Wet-

im Rahmen des EU-Forschungsvorhabens EULINOX mit Partnern aus Frankreich, Nor-

terfronten in die obere Troposphäre gelangen und dort Ozon bilden. Die Messungen im angelaufenen Programm haben gezeigt, daß sehr viel häufiger als bisher vermutet verschmutzte Luftmassen aus der bodennahen Atmosphäre in die obere Tropopause transportiert werden. Weitgehend unverstanden ist zudem die Entstehung von Schwefeltrioxid und Schwefelsäure auf dem Weg von der Brennkammer bis in die Kondensstreifen.

Es gibt Anzeichen, wonach diese Prozesse stark von Triebwerk zu Triebwerk variieren. Wenn es richtig ist, daß der Luftverkehr durch Kondensstreifen und Partikel die Bewölkung verändert, dann müßte dies schließlich in Messungen nachweisbar sein. Das DLR will daher nach möglichen Unterschieden in der Bewölkung zwischen sauberen und verschmutzten Luftmassen suchen, zum Beispiel durch Vergleich der Nord- und Südhemisphäre der Erde. Hierfür sollen insbesondere Satellitendaten genutzt werden.

■ In den sechs Jahren erfolgreicher Forschung zum Thema „Wirkung von Emissionen der Luftfahrt“ haben auch die Ingenieure die Grundlagen für die Entwicklung

Technische Herausforderung der Zukunft

Brennkammerkonzepte entworfen, die deutlich weniger Stickoxide entstehen lassen. Die Konzepte wurden im Labor erfolgreich getestet. Die Umsetzung in einsatzfähige und sichere Triebwerke steht noch aus. Zur Minderung von Kohlendioxid und Ruß gibt es bisher außer Effizienzsteigerung des Antriebs keine erfolgversprechenden Konzepte. Die Idee, hierfür Wasserstoffantriebe einzusetzen, scheidet bisher an der ungesicherten Versorgung mit flüssigem Wasserstoff.

Verkehrsexperten rechnen in den nächsten 50 Jahren mit einer Steigerung des Weltluftverkehrs um das Zehnfache, was aufgrund der langen Entwicklungszeiten neuer Flugzeugtechnologien durchaus eine relevante Zeitspanne ist. Es ist also eine Technik zu entwickeln, die in 50 Jahren möglichst mit einer geringeren Klimabelastung als heute einen erheblich größeren Verkehrsbedarf befriedigt. Dazu

müssen die spezifischen Emissionen je Verkehrsleistung um einen entsprechenden Faktor reduziert werden. Dies ist eine enorme technische Herausforderung.

Der Weg dahin wird Kompromisse erfordern, möglicherweise auch Abstriche beim Klimaschutz oder Änderungen im Verkehrssystem. Die Klimawirkungen der verschiedenen freigesetzten Gase und Partikel werden gegeneinander abzuwägen sein. Hierbei ist nicht nur der Luftverkehr, sondern das gesamte Verkehrssystem einschließlich der Kraftfahrzeuge und immaterieller Transportsysteme (Kommunikation) zu betrachten. Das DLR wird daher in Zukunft die Umweltauswirkungen aller Verkehrssysteme in ihrer Gesamtheit untersuchen. Für die Wettbewerbsfähigkeit der exportorientierten deutschen Verkehrsindustrie ist es wichtig, daß sie auf diesem Gebiet auch in Zukunft über das neueste Wissen verfügt und optimal beraten wird. Das ist eine Aufgabe, der sich das DLR weiterhin stellt.

Prof. Dr. Ing. habil. Ulrich Schumann ist Direktor des Institutes für Physik der Atmosphäre des DLR in Oberpfaffenhofen. ¹³