Prof. Dr.-Ing. Ulrich Schumann, Prof. Dr.-Ing. Heinrich B. Weyer* und Dr.-Ing. Dietmar Wurzel**
Institut für Physik der Atmosphäre der DLR, Oberpfaffenhofen
***Institut für Antriebstechnik der DLR, Köln-Porz**
****Bereich Managementdienste der DLR, Köln-Porz**

Schadstoffe in der Luftfahrt

Wirkungen und Präventionen – Ein Verbundprogramm von Forschung und Industrie

Der derzeitige Kenntnisstand läßt keine klare Aussage über die Klimawirksamkeit von Triebwerksemissionen zu. Vor dem Hintergrund eines überproportionalen Wachstums des Weltluftverkehrs und der vor allem in den USA diskutierten möglichen Einführung des Überschallverkehrs gewinnen die Auslotung des Gefährdungspotentials und die Einleitung von Abhilfemaßnahmen an Notwendigkeit und Dringlichkeit.

Einführung

Das von DLR und Industrie initiierte und vom BMFT geförderte Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt" soll helfen, durch zielgerichtete wissenschaftliche Studien im Bereich der Atmosphärenforschung einen urteilsfähigen Wissensstand zu erarbeiten, durch triebwerkstechnologische Studien die Voraussetzungen für die Schadstoffreduktion zu schaffen und Daten für regulatorische Maßnahmen bereitzustellen. Beteiligt sind Partner aus Industrie, Großforschung, der Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft, dem universitären Bereich und weiteren Einrichtungen.

Treibhauseffekt und Ozonloch haben auch den Luftverkehr in die Diskussion gebracht. Es besteht die Sorge, daß die Schadstoffemissionen aus den Triebwerken einen nicht zu vernachlässigenden Anteil hieran haben könnten. Vereinzelt werden bereits drastische Forderungen nach Einschränkungen beim Luftverkehr erhoben. Auch der Deutsche Bundestag befaßt sich derzeit mit dieser Fragestellung. Der heutige Kenntnisstand läßt jedoch keine begründeten quantitativen Aussagen zu. Vor dem Hintergrund des immer weiter wachsenden Luftverkehrs *(Bild 2)* soll das Verbundprogramm Schadstoffe in der Luftfahrt, im Verbund mit weiteren Programmen mit verwandter Zielsetzung, helfen, die Folgen der Schadstoffemissionen abzuschätzen und erforderlichenfalls Maßnahmen zur Begrenzung der Folgen einzuleiten.

Während des Betriebes entstehen im Flugtriebwerk die bekannten Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) und, in geringeren Mengen und daher schwerer zu erfassen, eine Reihe anderer Schadstoffe *(Bild 1)*. Der spezifische Brennstoffverbrauch moderner Triebwerke konnte seit Einführung der Strahltriebwerke in den sechziger Jahren fast auf die Hälfte reduziert werden. Entsprechend sank der Ausstoß von Kohlendioxid und Wasserdampf, auch andere Schadstoffemissionen gingen, bezogen auf den Nennschub, zurück, Der Trend zu höheren Temperaturen und Drücken, um den Wirkungsgrad zu steigern, bewirkte dagegen einen Anstieg des Stickoxidausstoßes (NO_x), *(Bild 3)*.

Heute wird der Brennstoffverbrauch des Weltluftverkehrs auf rund 180 Millionen Tonnen im Jahr geschätzt. Am weltweiten Gesamtenergieverbrauch hat er damit nur einen Anteil von wenigen Prozent *(Bild 4)*. Jedoch nimmt der Flugverkehr stärker zu als andere Verkehrszweige. Die Transportleistung stieg von 920 Milliarden Personenkilometern (Pkm) im Jahr 1978 auf 1900 Milliarden Pkm im Jahr 1990 an und wird sich in den nächsten 10–15 Jahren voraussichtlich

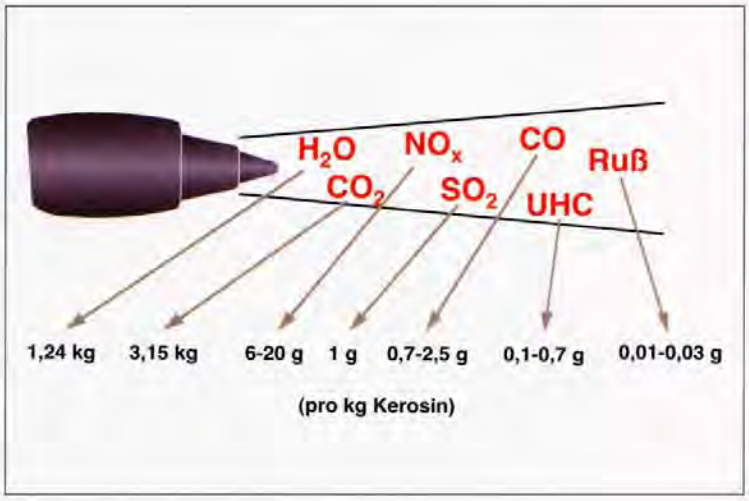
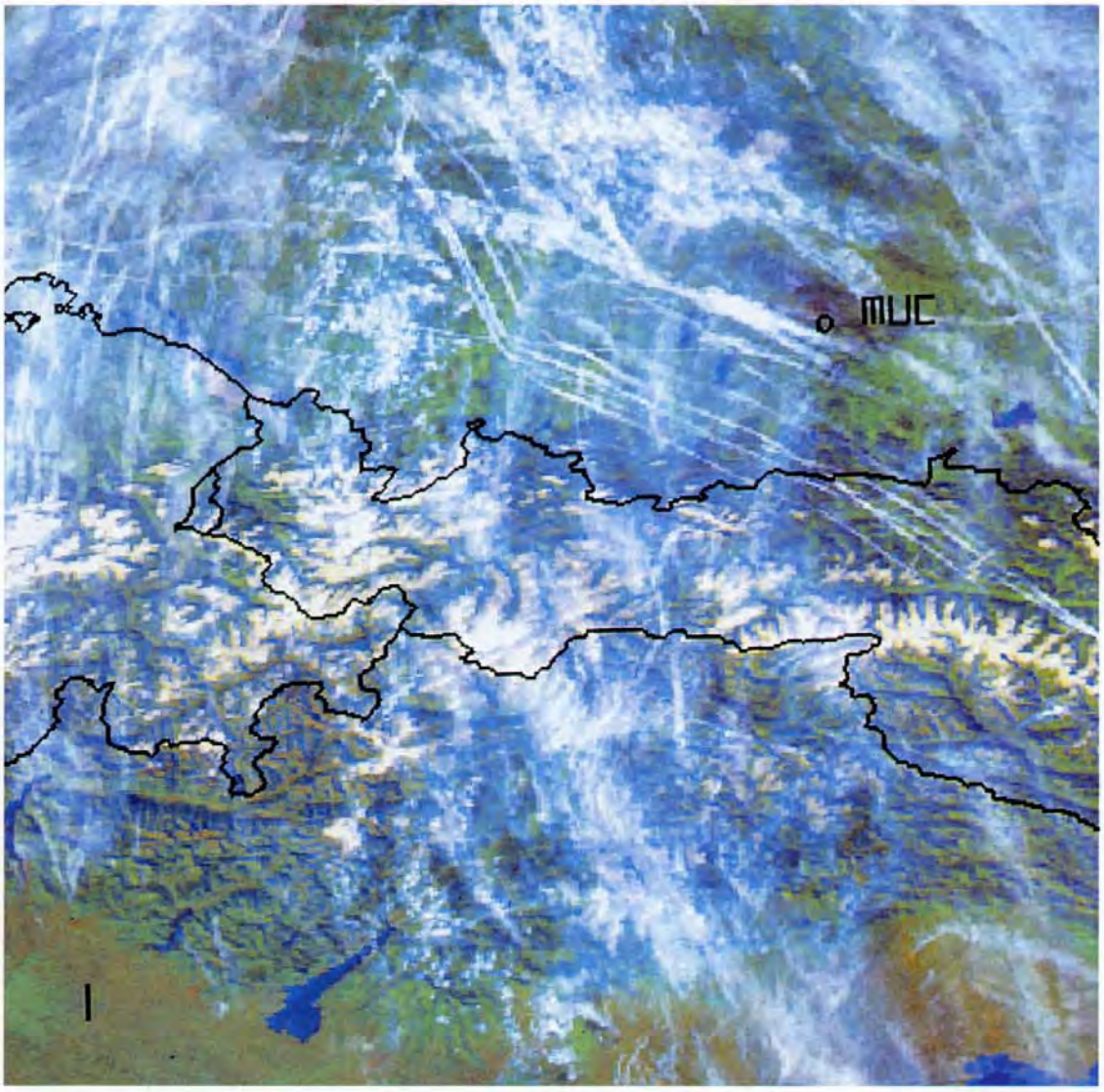


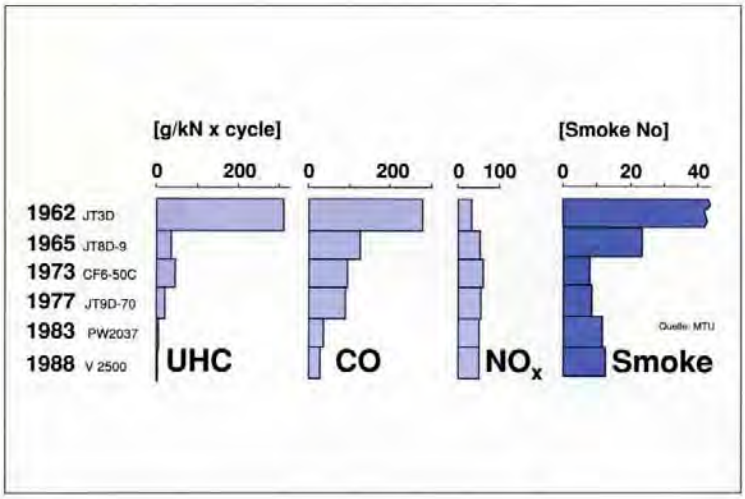
Bild 1: Kerosin-Verbrennungsprodukte (abhängig von den Betriebsbedingungen und der Reiseflughöhe).

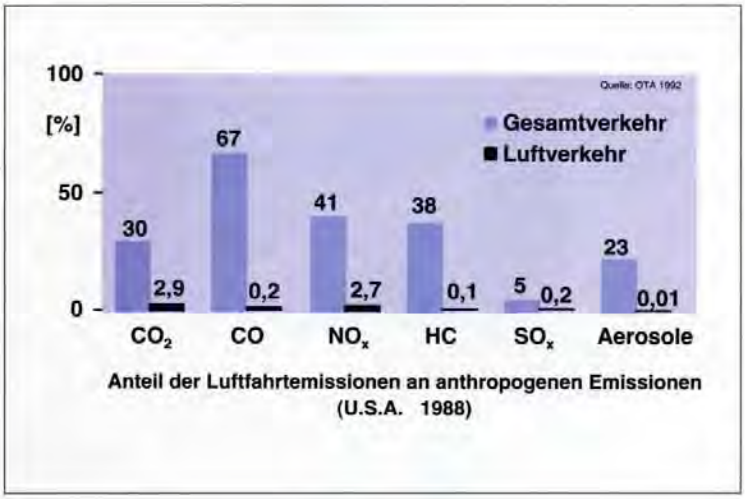
nochmals verdoppeln. Damit steigt auch der Brennstoffverbrauch an, wenn auch in geringerem Umfang infolge des sinkenden Treibstoffverbrauchs moderner Strahltriebwerke. Zusätzliche Maßnahmen sind erforderlich, um auch den Stickoxidausstoß zu reduzieren und damit die Belastung der Atmosphäre durch die Luftfahrt zu verringern *(Bild 5)*.

Aus der Troposphäre, der Zone des Wettergeschehens mit ausgeprägter vertikaler Durchmischung, werden Schadstoffe vom Regen innerhalb kurzer Zeiten ausgewaschen. In den höheren Regionen, oberhalb der Tropopause, haben sie sehr lange Verweilzeiten und könnn sich akkumulieren. Infolge der geringen Hintergrundkonzentrationen verstärkt sich dort ihre Wirkung. Da der Klimawirkungsgrad eines Treibhausgases in den kältesten Luftschichten ein Maximum erreicht, ist er am stärksten im Bereich der Tropopause ausgeprägt, wo die Temperatur ein erstes Minimum erreicht. In mittleren Breiten befindet sich die Tropopause in 10 bis 12 km Höhe. Dort spielt sich ein maßgeblicher Anteil des Luftverkehrs ab. Die Aussage, der Luftverkehr trage nur in sehr geringem Maß zu der Emission von Schadstoffen in die Atmosphäre bei, ist daher relativ zu sehen. In der unteren Troposphäre überwiegen bei weitem Schadstoffe aus bodennahen Quellen. In der oberen Troposphäre, der Tropopause und der unteren Stratosphäre ist der Flugverkehr der einzige unmittelbare Emittent anthropogener Schadstoffe, von wenig häufigen Raumfahrtereignissen abgesehen.
Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Atmosphäre kommt den Stickoxiden

Bild 2: Kondensstreifen im Satellitenbild. NOAA-Aufnahme der Region zwischen Frankfurt und Venedig.







Anteil der Luftfahrtemissionen an anthropogenen Emissionen (U.S.A. 1988)

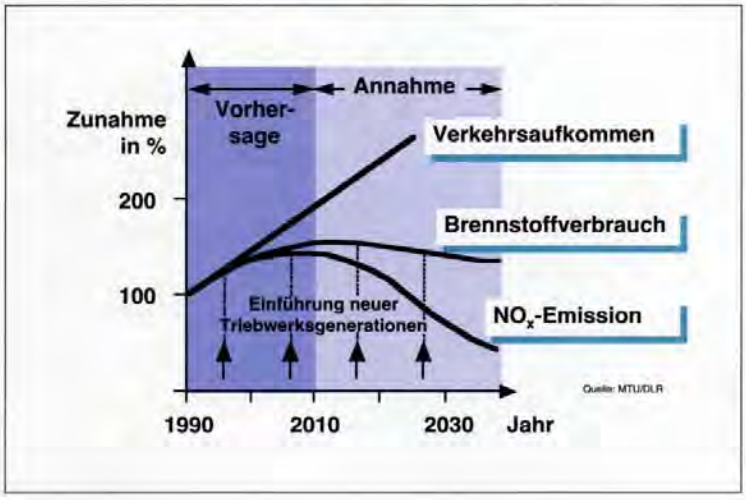


Bild 3 – 5: Oben: Entwicklung des Schadstoffausstoßes von Flugtriebwerken. Mitte: Anteil der Luftfahrtemissionen an den gesamten anthropogenen Emissionen (USA, 1989). Unten: Entwicklungstrends bei Brennstoffverbrauch und Schadstoffausstoß.

und dem Wasserdampf besondere Bedeutung zu. Noch ungewiß ist die Rolle anderer Spurengase. Stickoxide beeinflussen den Ozongehalt der Lufthülle *(Bild 6)*. In der Stratosphäre tragen sie als Katalysator zum Ozonabbau bei und machen damit die Atmosphäre durchlässiger für schädigende Solarstrahlung. In der Troposphäre und niedrigen Stratosphäre fördern sie dagegen die Bildung von Ozon. Ozon absorbiert langwellige Strahlung von der Erde und trägt daher zu deren Aufheizung bei. In geringeren Höhen wirkt es sich schädigend auf die Biosphäre aus. In Regionen der nördlichen Halbkugel ist nach Modellrechnungen ein beträchtlicher Anteil der Stickoxidkonzentration auf Flugbewegungen zurückzuführen *(Bild 7)*. Damit ist der Flugverkehr schon teilweise an der Ozonzunahme in der oberen Troposphäre beteiligt.

In der Reiseflughöhe liegt die natürliche Wasserdampfkonzentration nur noch bei einem Tausendstel des bodennahen Wertes. Der hier von Flugzeugen eingetragene Wasserdampf stellt eine kräftige Störquelle dar. In der Form von Kondensstreifen ist diese häufig auch sichtbar. Regional können sie zu ausgeprägten Bedeckungsgraden führen. Satellitendaten zeigen, daß Kondensstreifen Ausdehnungen von einigen Kilometern in der Breite und mehreren hundert Kilometern in der Länge erreichen können. Sie begünstigen über Eispartikelbildung die Zunahme dünner Cirrusbewölkung.

Das Programm „Schadstoffe in der Luftfahrt

„Schadstoffe in der Luftfahrt" ist ein 1991 vorgestelltes Verbundprogramm, in dem Forschung, Industrie und Hochschulen interdisziplinär in den Bereichen Atmosphärenforschung und Triebwerkstechnologie zusammenarbeiten. Das Programm soll helfen, die gegenwärtigen Unsicherheiten hinsichtlich der Verteilung und Wirkung von luftfahrtinduzierten Schadstoffen zu verringern, durch triebwerkstechnologische Studien die Voraussetzungen für schadstoffärmere

Triebwerke zu schaffen und dem Gesetzgeber Entscheidungshilfen bei der Festlegung von Schadstoffgrenzwerten und Hinweise auf das technisch Machbare geben. Den Aufbau des Verbundprogramms zeigt *Bild 8.*

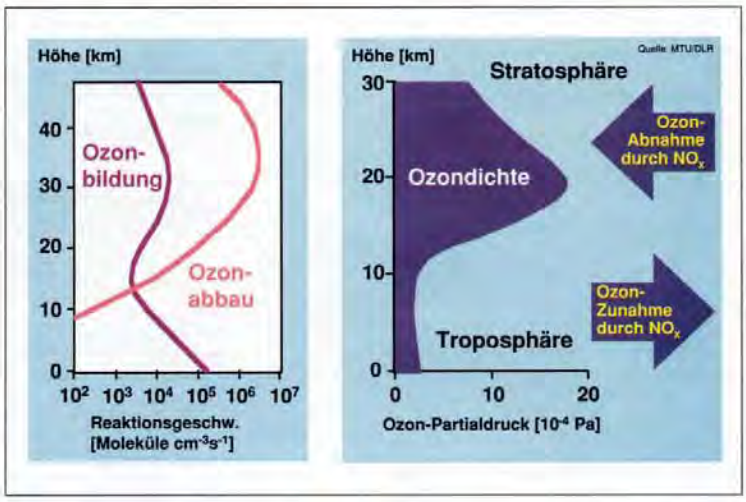
Beziehung zwischen den Teilverbundprogrammen

Die Teilverbundprogramme Atmosphärenforschung und Triebwerkstechnologie sind über eine Reihe wichtiger Informationen voneinander abhängig. Um mit ihren Simulationsmodellen zu wirklichkeitsnahen Ergebnissen zu kommen, müssen den Atmosphärenforschern Art und Umfang der Triebwerksemissionen bei jedem Betriebszustand als Eingabewerte zur Verfügung stehen. Dieses erfordert die kontinuierliche Einbindung der Triebwerksseite, die auch die Atmosphärenforschung bei der Behandlung schneller und heißer Abläufe im flugzeugnahen Nachlauf unterstützen muß. Umgekehrt ist die Triebwerksindustrie auf belegbare Anhaltspunkte aus der Atmosphärenforschung zum Gefährdungspotential der Schadstoffe angewiesen, um Studien und Technologieprogramme zum Aufbau fachlicher Kompetenz ansetzen und Lösungen aufzeigen zu können *(Bild 9).*

Diese Wechselwirkungen machen es erforderlich, die Arbeiten in beiden Teilprogrammen zeitlich und fachlich eng zu verknüpfen. Die notwendige Koordination wird durch die Programmorganisation sichergestellt.

Programmorganisation

Das Verbundprogramm wird durch das BMFT gefördert, in dessen Händen auch die Programmdurchführung liegt *(Bild 10).* Es ist dort eingebettet in die Aufgaben Luftfahrtforschung und -technik (Referat 513) einerseits und Klima- und Atmosphärenforschung (Referat 521) andererseits. Das BMFT wird bei der Abwicklung des Teilverbundprogramms Atmosphärentechnik durch den Projektträger Umweltsystemforschung der DLR unterstützt, bei dem Teilverbundvorha-



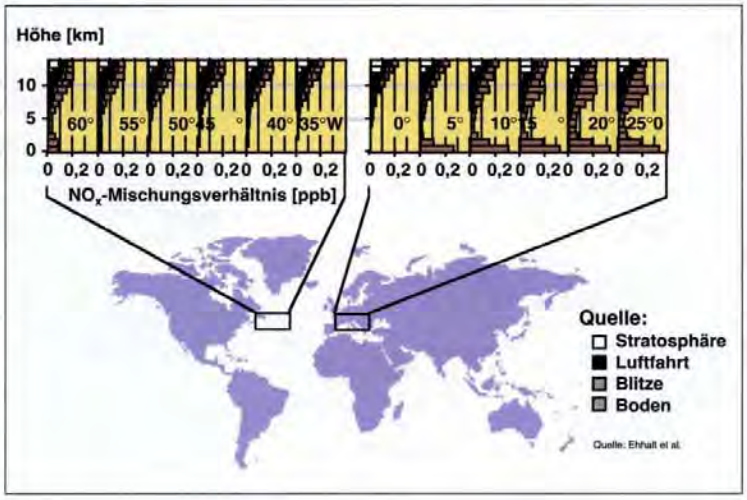
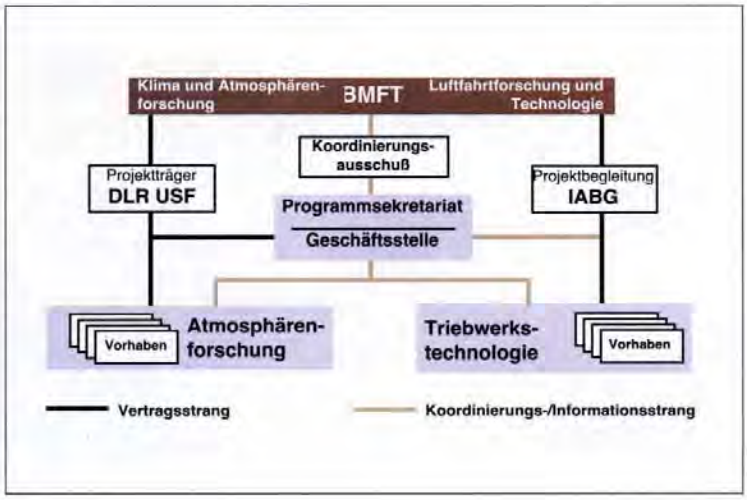
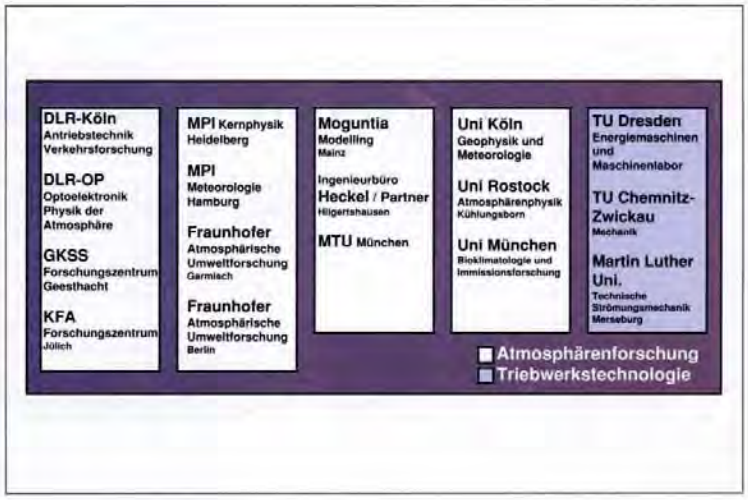


Bild 6–8: Oben: Auswirkung von NO_x auf die Ozondichte. Mitte: NO_x in der Atmosphäre. Unten: Aufbau des Verbundprogramms.

Bild 9 – 11: Oben: Wechselwirkung zwischen Atmosphärenforschung und Triebwerkstechnologie. Mitte: Programmorganisation. Unten: Am Verbundprogramm beteiligte Partner.





ben Triebwerkstechnologie ist es die Projektbegleitung Luftfahrtforschung der IABG.

Ein vom BMFT geplanter Koordinierungsausschuß empfiehlt die forschungs- und umweltpolitische Ausrichtung des Verbundprogramms, erarbeitet fachliche Prioritäten und erstellt Richtlinien für die Darstellung des Programms in der Öffentlichkeit. Ihm gehören an Vertreter der Ministerien für Umwelt, Verkehr, Verteidigung und Wirtschaft; gleichfalls vertreten sind Forschung, Lufthansa, DLR und die beteiligten Triebwerksfirmen.

Bei der DLR wurde ein Programmsekretariat eingerichtet, in dem die beiden Teilverbundprogramme durch ihren Leiter und je einen Hochschulvertreter repräsentiert sind. Es ist verantwortlich für die Einhaltung der wissenschaftlichen Zielsetzung und der zeitlichen und finanziellen Vorgaben. Die Geschäftsstelle ist Bestandteil des Programmsekretariats und zuständig für alle organisatorischen Maßnahmen und den Informationsaustausch. Das Programmsekretariat ist das Bindeglied zwischen den beiden Arbeitskreisen, denen die fachliche Koordination innerhalb der Teilverbundprogramme obliegt. Das Teilverbundprogramm Atmosphärentechnik wird von der DLR koordiniert, MTU-München koordiniert das Teilverbundprogramm Triebwerkstechnik.

Förderstatus

Im Teilprogramm Atmosphärenforschung werden seit Mitte 1992 vom BMFT über 20 Vorhaben gefördert. Insgesamt wurden 12 Millionen DM für einen Zeitraum von drei Jahren (Phase 1) bewilligt. Zusätzlich bringen die an dem Vorhaben beteiligten Partner eigene Ressourcen in etwa gleicher Höhe auf. Die Arbeiten im Teilprogramm Triebwerkstechnologie wurden eingeleitet durch die Förderung fünf grundlagenorientierter Vorhaben zur Brennkammertechnologie an Hochschulen in den neuen Bundesländern. Für einen Zeitraum von dreieinhalb Jahren stehen im Rahmen des BMFT-Luftfahrtforschungsprogramms hierfür rund 3 Millionen DM zur Verfügung. Ein Anstieg der Förde-

rung wird derzeit ab 1995 erwartet, ohne die das eigentliche Ziel des Verbundvorhabens, die Einleitung präventiver Maßnahmen, nicht zu verwirklichen wäre. Die derzeit mit Fördervorhaben an dem Programm Beteiligten sind in *Bild 11* aufgeführt. Speziell mit der Ausweitung der Förderung triebwerksbezogener Aktivitäten wird auch die Zahl der Teilnehmer am Verbundprogramm anwachsen.

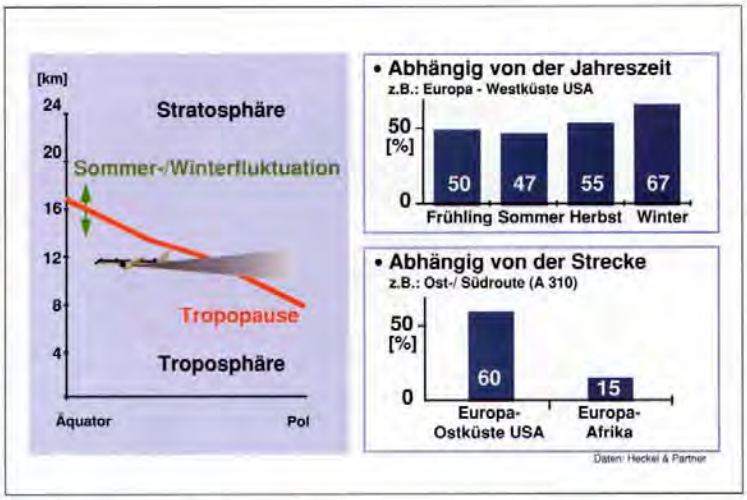
Teilverbundprogramm Atmosphärenforschung

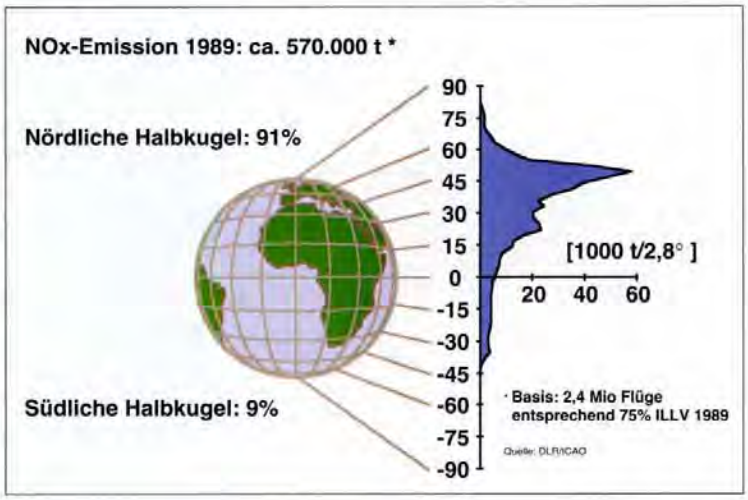
Die Ermittlung der Schadstoffemissionen und ihre Ausbreitung und Wirkung sind die Themen, mit denen sich die Atmosphärenforscher im Rahmen des Verbundprogramms beschäftigen, um als Ergebnis der Phase 1 bis etwa 1995 das Gefährdungspotential deutlich sicherer einschätzen und belastbarere Aussagen machen zu können, als es heute möglich ist.

Im einzelnen muß eine Datenbank erstellt werden, in der die Emissionen der einzelnen Triebwerke bei jedem Betriebszustand und die Bewegungsabläufe der globalen Luftfahrt erfaßt und miteinander verknüpft sind. Die luftchemischen Prozesse sind komplex und vielfältig. Die dominanten Vorgänge und Wechselwirkungen bei Schadstoffeintrag und -transport müssen vor dem Hintergrund natürlicher Emissionen und Konzentrationen in ihren Größenordnungen identifiziert und beschrieben werden. Atmosphärische Rechenmodelle müssen gegenüber heutigen Ansätzen ausgebaut und verfeinert werden (u.a. dreidimensional statt zweidimensional und mit verkleinerten Maschenweiten). Durch in-situ Messungen in relevanten Flughöhen müssen die Rechenverfahren überprüft und weiterentwickelt werden, um Veränderungen der Spurengaszusammensetzung und die Ausbreitung der Schadstoffe wirklichkeitsnäher erfassen und ihre Wirkung auf den Strahlungshaushalt der Erde quantifizieren zu können.

Ergebnisse

Nach Aufnahme der Förderung liefen in den meisten Vorhaben die Arbeiten





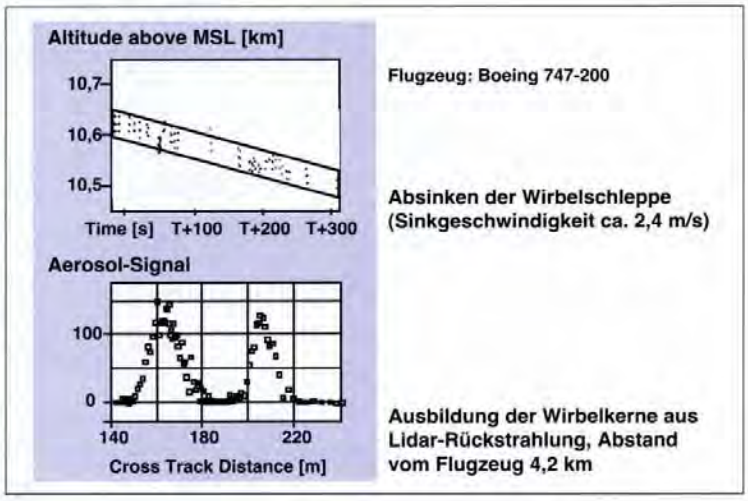
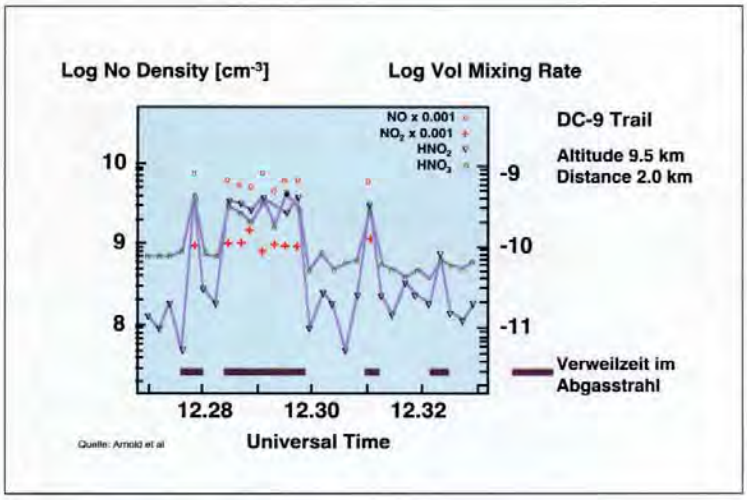
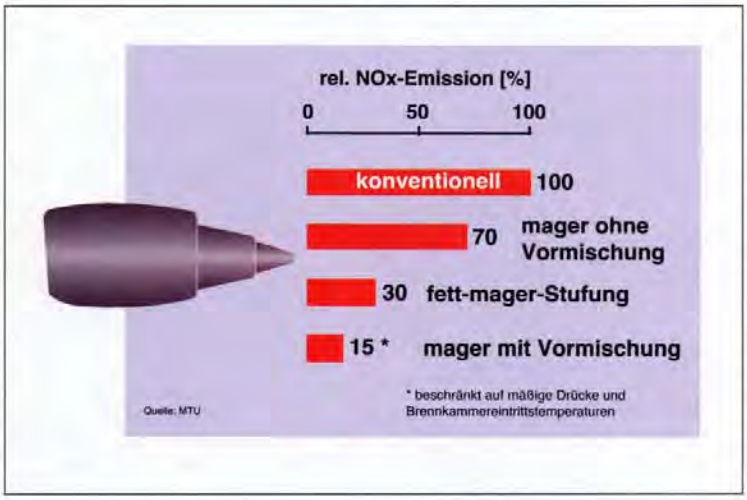
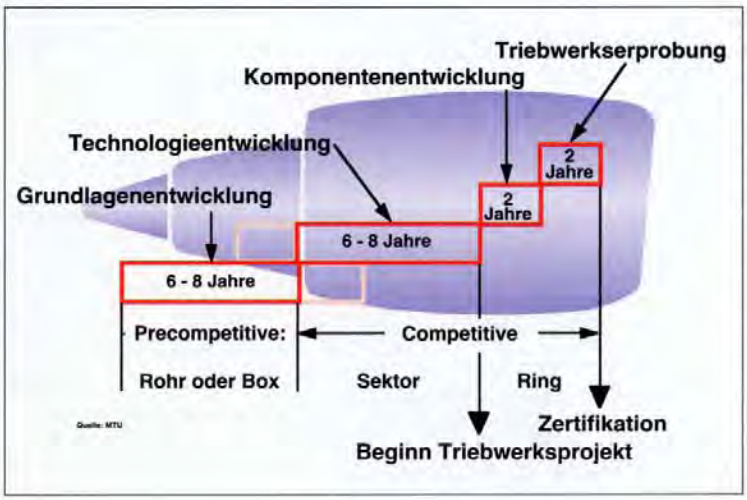


Bild 12 – 14: Oben: Schadstoffeintrag in die Stratosphäre. Mitte: Belastung der Breitengrade mit NO_x. Unten: Vermessung des Abgasstrahls.







während des zweiten Halbjahres 1992 an. Das Vorbereiten der Instrumente, Durchführen der Versuche, Erfassen und Auswerten der Daten und das Erstellen und Arbeiten mit Simulationsmodellen ist komplex und zeitaufwendig. Dennoch wurden inzwischen erste Teilergebnisse vorgelegt. Unter anderem wurden zur Berechnung der Emissionsverteilung und Trends in einem Vorhaben die Abgasemissionen von Verkehrsflugzeugen statistisch erfaßt. Dazu wurden etwa 2000 Computerflugpläne verschiedener Luftfahrtgesellschaften mit unterschiedlichem Fluggerät ausgewertet und der Anteil der in der Stratosphäre produzierten Schadstoffe bestimmt. Die geographische Streckenführung hat danach die größte Auswirkung auf den Anteil der in die Stratosphäre entlassenen Schadstoffe *(Bild 12)*.

Südlich 26°N war kein Eindringen in die Stratosphäre mehr zu verzeichnen. Auch die jahreszeitlichen Schwankungen in der Tropopausenhöhe beeinflussen den Schadstoffeintrag in die Stratosphäre. In einem weiteren Vorhaben wurden unter Benutzung von ICAO-Daten Untersuchungen zur globalen Verteilung der Schadstoffeintragungen vorgenommen und abgeschlossen. Auf Daten dieser Arbeit beruht die Darstellung der Belastung der Breitengrade mit Stickoxiden *(Bild 13)*. Erste Daten von in-situ-Messungen mit dem DLR Forschungsflugzeug Falcon im Abgasstrahl von Verkehrsmaschinen über dem süddeutschen Raum zeigen die *Bilder 14* und *15*. Ziel waren die Erprobung eines Differential-Absorptions-LIDAR (DIAL) sowie in-situ-Messungen meteorologischer Parameter und von Konzentrationen chemischer Komponenten. *Bild 14* zeigt das Absinken des Kondenzstreifens einer B 747-200 mit zunehmendem Abstand vom Flugzeug und dessen seitliche Ausprägung. Bild 15 zeigt Werte von Konzentrationsmessungen im Abgasstrahl einer DC-9; die Balken am unteren Bildrand zeigen die Verweilzeiten innerhalb des Abgasstrahls.

Im Teilprogramm „Triebwerkstechnologie" will man sich mit den Ursachen der

Bild 15 – 17: Konzentrationserhöhungen im Abgasstrahl (oberes Bild). Mitte: Schadstoffarme Brennkammerkonzepte. Unten: Die Entwicklung einer Brennkammer bis zur Zertifikation.

Schadstoffentstehung unter den speziellen Bedingungen des Flugtriebwerks, mit alternativen Brennkammerkonzepten zur schadstoffarmen Verbrennung und

Teilverbundprogramm Triebwerkstechnologie

mit neuen Triebwerkskonzepten zur Verringerung des Brennstoffverbrauchs und der Emissionen beschäftigen. Neuartige Brennkammerkonzepte mit gezielter Führung der Verbrennung wie Magerverbrennung, Fett-Mager-Stufung und Magerverbrennung mit Vorvermischung stellen deutliche Reduktionen beim Stickoxidausstoß in Aussicht, langfristig auf nur 15 % der heutigen Bestwerte *(Bild 16)*. Vor ihrer Verwirklichung und zum Nachweis eines sicheren Betriebs sind jedoch mannigfaltige Probleme zu lösen, dabei nehmen Entwicklungsrisiko und Entwicklungsdauer mit dem Grad der NO_x-Reduktion zu. Wenn auch der Schwerpunkt auf einer deutlichen Senkung des spezifischen Stickoxidausstoßes liegt, sollen langfristig alle Schadstoffemissionen verringert werden. Die Entwicklung einer Brennkammer bis zur Zertifikation erstreckt sich über rund 15 Jahre. *(Bild 17)* zeigt die Entwicklungsschritte und verdeutlicht, daß aufgrund der langen Entwicklungsdauer bis zur Einführung schadstoffärmerer Brennkammern der Einstieg in die Grundlagenentwicklung äußerst dringlich ist.

Alternative Kraftstoffe werden in die Untersuchungen einbezogen. Zur Diskussion stehen vorrangig Wasserstoff und Methan. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht kein Kohlendioxid, weshalb er als „sauberer" Brennstoff bezeichnet wird. Jedoch fällt bei gleichem Energieäquivalent rund zweieinhalbmal mehr Wasserdampf an als bei der Verbrennung von Kerosin. Auch entstehen nicht weniger Stickoxide.

Die Untersuchung luftfahrtinduzierter Schadstoffe im Umfeld von Großflughäfen ist nicht Bestandteil des Verbundvorhabens. Ebenfalls nicht einbezogen sind andere Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung, etwa durch verbesserte Aerodynamik, Gewichtsreduzierung oder Flugführung.