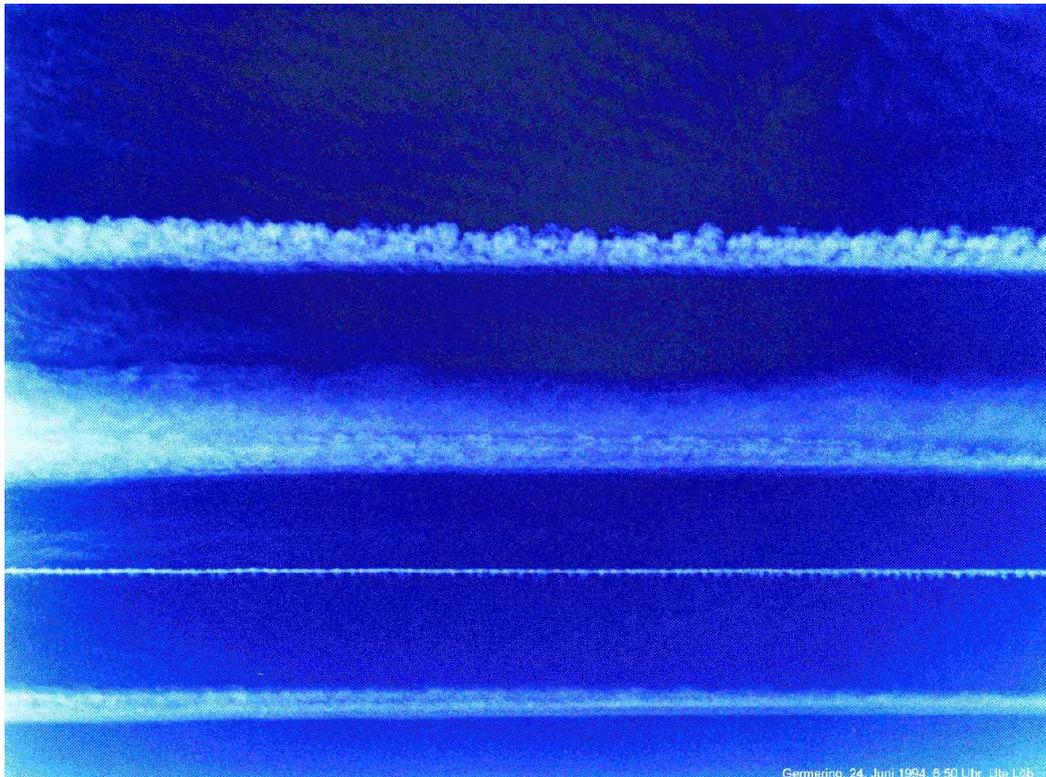


Partikel aus Flugzeugtriebwerken und ihr Einfluss auf Kondensstreifen, Zirruswolken und Klima (PAZI)

Antrag eines Forschungsvorhabens im HGF-Strategiefonds
von DLR, AWI und FZJ in Kooperation mit dem FZK



Dezember 1999

Kurzfassung

Das Projekt PAZI erforscht die Bildung von Ruß und anderen Aerosolen in Triebwerken und in der Atmosphäre durch den Luftverkehr, deren Einfluß auf die Bildung von Eisparkeln in und außerhalb von Kondensstreifen und die Wirkungen dieser Partikel auf die Zusammensetzung der Atmosphäre, auf Zirruswolken und Strahlungshaushalt und damit letztlich auf das Klima. Das Projekt liefert eine Abschätzung des Beitrages des Luftverkehrs zu Veränderungen der Bewölkung und des hieraus folgenden Strahlungsantriebes. Das Projekt führt zu einem vertieften Verständnis der Physik der Aerosole und Wolkenbildung. Insbesondere liefert das Projekt: 1. ein mit Messungen überprüfetes Modell der Rußbildung in Triebwerken, 2. Erkenntnisse über Wirksamkeit verschiedener Aerosole auf die Eisbildung, 3. Daten über den Zusammenhang zwischen Aerosolen und Zirren und 4. eine erste Quantifizierung der Wirkung von veränderten Zirren auf den Strahlungsantrieb und das Klima der Atmosphäre.

Die beteiligten Zentren setzen hierzu komplementäre Methoden ein: AWI: Bodenlidar, FZK: Aerosolkammer AIDA, FZJ: Einzelpartikelanalyse und DLR: Brennkammer-Prüfstände, instrumentierte Forschungsflugzeuge, Satellitendaten, und Ruß-, Aerosol- und Klimamodelle. Zudem wird mit europäischen (Uni. Stockholm, DERA Pyestock u.a.) und deutschen Partnern von Hochschulen (Essen), der MPG (Heidelberg, Hamburg) und der Industrie (BRR, MTU, Lufthansa), teils in europäisch geförderten Projekten zusammengearbeitet.

Wie vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1999) festgestellt, ist dies Thema von strategischer Bedeutung, um den wachsenden Luftverkehr möglichst umweltverträglich gestalten zu können. Die Kenntnis der Rußbildung beeinflusst zudem die technische Auslegung von Triebwerken. Die Ergebnisse des Projekts PAZI bilden die Grundlage für die Verminderung der Wirkungen durch innovative Triebwerke, Treibstoffe und Betriebsabläufe im Luftverkehr. Mit der Industrie wird unter Wahrung der Neutralität der Forschung zusammengearbeitet. Das Projekt unterstützt umweltbezogene Daseinsvorsorge, die zu den staatlichen Aufgaben gehört.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Forschungsprogramm | 4 |
| 1.1 | Problemstellung | 4 |
| 1.2 | Wissenschaftliche Zielsetzung und Methoden | 4 |
| 1.3 | Beziehung zu HGF-Kernthemen und externen Projekten | 8 |
| 1.4 | Innovationspotential und Anwendungsbezug | 9 |
| 2 | Projektbeschreibung | 10 |
| 2.1 | Beteiligte Einrichtungen und Partner | 10 |
| 2.2 | Projektstruktur und Projektmanagement | 11 |
| 2.3 | Wissenschaftliche Begründung des Projektes | 12 |
| 2.4 | Zusammenwirken der Teilprojekte und Hauptmeilensteine | 17 |
| 2.5 | Literatur | 18 |
| 3 | Beantragte Fördermittel | 21 |
| 4 | Darstellung der Einzelprojekte | 22 |
| 4.1 | Rußemissionen und Aerosolvorläufergase | 22 |
| 4.1.1 | Rußbildung und Gasphasenchemie in Brennkammern | 22 |
| 4.1.2 | Rußemissionen auf realen Flugmissionen | 27 |
| 4.1.3 | Spektrale Rußcharakterisierung | 31 |
| 4.2 | Eisbildung in der Atmosphäre | 35 |
| 4.2.1 | Gefriermessungen in der Aerosol-Wolkenkammer AIDA | 35 |
| 4.2.2 | Partikelmessungen in Kondensstreifen und Zirren | 39 |
| 4.2.3 | Lidarmessungen von Kondensstreifen, Zirren und H ₂ O | 43 |
| 4.2.4 | In-situ-Messungen von Einzelpartikelkomposition und H ₂ O | 47 |
| 4.3 | Aerosol-Zirren-Messungen | 50 |
| 4.3.1 | INCA Feldmessungen | 50 |
| 4.3.2 | Lidaranalyse von Zirren bei INCA | 54 |
| 4.3.3 | Satellitenfernerkundung von Zirren | 58 |
| 4.4 | Aerosol-Zirren-Modellierung | 62 |
| 4.4.1 | Prozessmodellierung Aerosole und Zirren | 62 |
| 4.4.2 | Wolkenauflösende Modellierung | 66 |
| 4.4.3 | Globale Modellierung mit ECHAM | 70 |
| 5 | Verzeichnis der Abkürzungen | 74 |
| 6 | Anlagen: Briefe von Partnern | 75 |

1 Forschungsprogramm

1.1 Problemstellung

Der Strahlungshaushalt der Erde reagiert besonders empfindlich auf Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre und der Bewölkung in der Nähe der Tropopause, der Grenzfläche zwischen oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre. Zu solchen Veränderungen tragen neben natürlichen Quellen auch anthropogene Quellen bei, insbesondere auch der Luftverkehr, der direkt in diesen Bereich, bis etwa 14 km Höhe, Gase und Partikel emittiert. Die Bewölkung in der Tropopausenregion besteht in mittleren Breiten vorwiegend aus Zirruswolken, die aufgrund der dort herrschenden, sehr tiefen Temperaturen (-40°C und kälter) hauptsächlich Eiskristalle enthalten. Dünne Zirruswolken verändern die Strahlungsbilanz, so dass sich die Erdatmosphäre unterhalb der Zirren erwärmt. Langjährige Beobachtungen der Häufigkeit von hohen Wolken in mittleren Breiten auf der Nordhemisphäre deuten auf eine großräumige Zunahme der Zirrusbewölkung hin. Noch ist offen, ob diese Zunahme eine Folge der Kondensstreifen und Partikel, wie Ruß und Schwefelsäuretropfen sind, die von Verkehrsflugzeugen stammen. Andere Partikelquellen und natürliche Änderungen können hier ebenfalls wirksam sein.

Im Rahmen deutscher, europäischer und amerikanischer Forschungsvorhaben gelangen in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte bei der Beurteilung der klimatischen Wirkungen von gasförmigen Emissionen des Luftverkehrs. Die Antragsteller waren hieran maßgeblich beteiligt. Im Rahmen des internationalen Assessments „Aviation and the Global Atmosphere“ des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC¹) wurde im Sommer 1999 festgestellt, dass nach gegenwärtigem Wissen der Strahlungsantrieb aufgrund linienförmiger Kondensstreifen und Veränderungen der Zirrusbewölkung größer ist als der Strahlungsantrieb durch die vom Luftverkehr verursachten Kohlendioxid- oder Ozonzunahmen.

Allerdings weist der IPCC-Bericht auch auf den noch sehr unzureichenden Stand des wissenschaftlichen Verständnisses hinsichtlich der Bildung und Wirkung der Partikel und Zirrusänderungen hin. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Entstehung von Rußpartikeln in den Triebwerken als auch auf die Bildung neuer Partikel in der Atmosphäre aus emittierten Vorläufersubstanzen. Seit einigen Jahren weiß man, dass Aerosole Wolken aus flüssigen Tropfen deutlich verändern. Es ist zu vermuten, dass sie auch Wolken aus Eispartikeln verändern, aber bisher ist dies wenig belegt und nicht global quantifizierbar. Es besteht erhebliche Unsicherheit darüber, wie sich Eiskristalle in Zirren in sauberen und verschmutzten Luftmassen unterscheiden und wie sich diese Unterschiede auf die optischen Eigenschaften und somit auf den durch Zirruswolken bedingten Strahlungsantrieb übertragen.

1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung und Methoden

Das Gesamtziel des Projektes ist es, festzustellen, ob und wenn ja, in welchem Umfang Partikel aus Triebwerken von Verkehrsflugzeugen zusammen mit Kondensstreifen zu einer klimawirksamen Veränderung der Bewölkung beitragen und welche Partikel (aus Flugzeugen und/oder die aus anderen natürlichen und anthropogenen Quellen) am stärksten die Wolkenbildung und den Strahlungshaushalt der Atmosphäre beeinflussen.

Damit soll die Basis geschaffen werden, um den wachsenden Luftverkehr umweltverträglich gestalten zu können. Zugleich soll PAZI zu einer Vertiefung des Verständnisses der Rußbil-

¹ Abkürzungen sind in Kap. 5 zusammengestellt und erläutert.

derung in Triebwerken und der Physik der Aerosole und der Wolkenbildung und deren Wechselwirkung mit der Chemie der Troposphäre und Stratosphäre beitragen. Dazu werden in vier Teilprojekten folgende Fragen untersucht:

- 1) Welche Rußmengen (Masse und Anzahl) und Aerosolvorläufer entstehen in Triebwerken, von welchen Parametern hängt die Bildung von Ruß und anderen Aerosolen ab und wie kann man von den Messungen an einzelnen Triebwerken auf die globale Emission schließen?
- 2) Wie verändern sich die emittierten Partikel und Aerosolvorläufer nach Verlassen der Triebwerke innerhalb und außerhalb von Kondensstreifen? Welchen Einfluss hat die Wasserdampfverteilung auf die Entwicklung von Kondensstreifen und Zirren? Welche Gefriereigenschaften haben Ruß und andere Aerosole in der Tropopausenregion?
- 3) Welche Unterschiede bestehen in den Eigenschaften von Zirren in Luftmassen mit niedriger und hoher Aerosolbelastung?
- 4) Wie lassen sich die Effekte des natürlichen und des Flugzeugaerosols auf Bedeckungsgrad, Eisgehalt und optische Eigenschaften von Zirren modellieren? Wie groß ist der Einfluss luftverkehrsinduzierter Aerosole auf den Bedeckungsgrad sowie die optischen Eigenschaften von Kondensstreifen und Zirren? Wie groß sind die damit verbundenen globalen Klimaänderungen?

Die Fragen werden in den Teilprojekten (TP) mit teils neuen experimentellen und numerischen Methoden und Verfahren aus Verbrennungsforschung, Aerosolphysik und Atmosphärenforschung untersucht. In Tabelle 1 sind die für die Messungen verwendeten Instrumente zusammengestellt.

TP1 liefert als Ergebnis Daten über die Konzentration und Größe der von Triebwerken emittierten Rußpartikel. Die Rußbildung in der Brennkammer wird modelliert und gemessen. Es wird ein Modell erstellt, das die Integration von unterschiedlichen Rußbildungsmodellen ermöglicht und das die Fluid- und Thermodynamik in der Brennkammer beschreibt. Das Modell wird mit neuen Messungen an Brennkammern und Triebwerken auf Versuchsständen überprüft. Durch Messungen direkt am Brennkammerexit und dann am Triebwerksexit bei gleicher Brennkammer wird die Veränderung der Zahl und Größe von Rußpartikeln in der Turbine bestimmt. Die an einzelnen Triebwerken gemessenen Rußeigenschaften werden mit Hilfe empirischer Beziehungen angenähert. Daraus wird mit Partnern der Verkehrsforschung die globale Emission der Flotte aller Verkehrsflugzeuge bestimmt.

TP2 mißt die Bildung von Aerosolen und Eispartikeln aus den emittierten Rußpartikeln und Aerosolvorläufern innerhalb und außerhalb von Kondensstreifen und Zirren. Die Partikeleigenschaften werden mit zahlreichen Instrumenten gemessen, u.a. mit Ionenmassenspektroskopie und einem neu entwickelten Laser-Ionisations-Massenspektrometer. Die Wasserdampfverteilung im Umfeld von Kondensstreifen und Zirren wird vom Forschungsflugzeug Falcon mit einem Fluoreszenz-Hygrometer und mit einem Differential-Absorptions-Lidar gemessen. Die Gefriereigenschaften von Modellruß und anderen Aerosolen werden unter für die Atmosphäre realistischen Bedingungen in einer Aerosol-/Wolkenkammer bestimmt.

TP3 bestimmt den Zusammenhang zwischen Aerosolen und den Eigenschaften von Zirren in Luftmassen mit sehr geringer und sehr großer Aerosolbelastung durch Messungen in mittleren Breiten auf der Süd- und Nordhemisphäre, unter sonst ähnlichen Bedingungen. Hierbei werden Flugzeugmessungen mit boden- oder schiffsgestützten Lidarmessungen und Analy-

Tabelle 1: Instrumente im Projekt PAZI

| Instrument | EP | Measurement | Range | Accuracy | Response time |
|--------------------------------------|----------|--|-----------------------------------|------------------------|--------------------|
| Soot particle properties | | | | | |
| SMPS | 1.1 | Size distribution, number concentration, soot volume fraction, surface concentration, volume concentration | 5-250 nm or 10-1000 nm | | 3 min |
| HPLC | 1.1 | Cabonyl compounds | > 10 ppb | ± 10 % | 2 min |
| | | PAH | > 1 ppm | ± 10 % | 4 min |
| GC-MS | 1.1 | Fuel analysis | | | |
| Smoke meter | 1.1 | Smoke number | 0-100 | ± 1 | 4 min |
| SEM | 1.1 | Particle shape | > 2 nm | | |
| LII | 1.1 | Soot volume fraction | 0.1–100 ppm | | 100 µs at 2 Hz |
| LIF | 1.1 | OH-concentration | ppm-range | 30 % | 10 µs at 2 Hz |
| CARS | 1.1 | Temperature | 300-2500K | 3-5 % | 10 µs at 10 Hz |
| CPC | 1.3 | Aerosol number density | D > 3, 5, 14 nm | | 1 s |
| DMA+Thermodenuder | 1.3 | Size selection and thermal pretreatment | | | |
| Absorption photometer | 1.3 | Absorption coefficient, black carbon | >10 ⁻⁷ m ⁻¹ | | 30 s |
| Integrating nephelometer | 1.3 | Scattering coefficient | >10 ⁻⁷ m ⁻¹ | | 5 s |
| Filter sampling | 1.3 | Total aerosol mass, carbon fraction | > 100 µg | | 1 min |
| Trace gas concentrations | | | | | |
| Hygrometer | 2.1, 2.3 | Frost point temperature ⇒ mixing ratio | 3-5000 ppm | 5% | |
| NO | 2.1 | Nitrogen oxide mixing ratio | 0.005-25 ppb | 5% bei 0.2 ppb | 1 s sampling rate |
| NO _y | 2.1 | Total reactive nitrogen gases | 0.05-25 ppb | 15% bei 0.2 ppb | 1 s sampling rate |
| Ozone monitor | 2.1, 2.3 | Stratospheric tracer, UV-absorption | 1-1000 ppb | 5% | 5 s sampling rate |
| Carbon monoxide | 2.1 | Tropospheric tracer, VUV fluorescence | 5-500 ppb | 10% | 3 s sampling rate |
| Carbon dioxide | 2.3 | NDIR | 1 ppm detect. Limit | 5% | 1 s sampling rate |
| J (NO ₂) | 2.1 | Filter radiometry ⇒ photolysis frequency | 10 ⁻⁴ s ⁻¹ | 6% | 1 s sampling rate |
| FISH | 2.3 | Total water mixing ratio | 0.2 – 500 ppmv | ± 0.3 ppmv | 1 Hz |
| Lidar | | | | | |
| H ₂ O DIAL (aircraft a/c) | 2.3 | Water vapor concentration | 1-5km from a/c | 0.3 ppmv error <10% | Resolution 1-3 min |
| | | Aerosol backscatter coeff. (1064, 935, 532 nm) | 1-25km from a/c | 1-10% | Resolution 1-10 s |
| | | Aerosol extinction coefficient | 1-20km from a/c | 5-20% | Resolution 1-10 s |
| | | Optical depth (1064, 935, 532 nm) | 1-20km from a/c | 5-20% | Resolution 1-10 s |
| | | Aerosol depolarization (532 nm) | 1-20km from a/c | 10-50% | Resolution 1-10 s |

| Instrument | EP | Measurement | Range | Accuracy | Response time |
|---|----------|--|-----------------------------------|----------|----------------------|
| (continued) | | | | | |
| MARL Aerosol-Raman Lidar | 3.2 | Aerosol backscatter coefficient (355, 532nm) | Altitude 5-30 km | 1-10% | Resolution 2-10 min |
| | | Aerosol extinction coefficient (355, 532 nm) | Altitude 5-20 km | 10-50% | Resolution 30-60 min |
| | | Aerosol depolarization (355, 532 nm) | Altitude 5-20 km | 10-50% | Resolution 2-10 min |
| | | Optical depth (355, 532 nm) | | 5-50% | Resolution 2-10 min |
| | | Temperature | Above 25 km | 1-10K | Resolution 30-60 min |
| | | Water vapor concentration | Altitude 2-8 km | 5-100% | Resolution 15-30 min |
| Cloud microphysical properties | | | | | |
| PCASP | 2.1, 2.3 | Aerosol size distribution | 0.12-3.5 μm | | 10s |
| FSSP-300 | 2.1, 2.3 | Aerosol/Crystal size distribution | 0.3-30 μm | | 10s |
| 2DC | 2.1 | Crystal size distribution | 50-800 μm | | |
| Polar nephelometer | 2.1 | Scattering phase function | 1-500 μm | | |
| Hygrometer | 2.1 | Cloud water content | 0.002-1 g/kg | | |
| Interstitial/out-of-cloud aerosol properties | | | | | |
| SPLAT | 2.3 | Chemical composition of single particles | >0.18 μm | | 10 particle / s |
| CPC 1 | 2.1, 2.3 | Aerosol number density | D>5 nm | | 1 s |
| CPC 2 | 2.1, 2.3 | Aerosol number density | D>14 nm | | 1 s |
| DMPS | 2.1 | Aerosol size distribution | 0.02-0.15 μm | | 2 min |
| MASP | 2.2 | Aerosol size distribution and refractive index | 0.3-20 μm | | 10 s |
| Filter samples | 2.1, 2.3 | Particle composition | D>0.2 μm | | 30 min |
| Thermodenuder | 2.1, 2.3 | Thermal stability of particles | 0.02-2 μm | | 1 s |
| Absorption photometer | 2.1, 2.3 | Absorption coefficient, black carbon | >10 ⁻⁷ m ⁻¹ | | 30 min |
| Crystal residual properties | | | | | |
| CPC 1 | 2.1 | Residual number density | D>10 nm | | 1 s |
| CPC 2 | 2.1 | Residual number density | D>15 nm | | 1 s |
| DMPS | 2.1 | Residual number density | 0.02-0.15 μm | | 2 min |
| PCASP | 2.1 | Residual number density | 0.12-3.5 μm | | 10s |
| Filter samples | 2.1 | Residual particle composition | D>0.2 μm | | 30 min |
| Thermodenuder | 2.1 | Thermal stability of residual particles | 0.02-2 μm | | 1 s |
| Absorption photometer | 2.1 | Absorption coefficient, black carbon | >10 ⁻⁷ m ⁻¹ | | 1 min |

sen von Satellitendaten kombiniert. Neben dem Forschungsflugzeug Falcon kommt hierbei das Forschungsschiff POLARSTERN zum Einsatz.

TP4 entwickelt numerische Modelle und berechnet den Einfluss der Aerosole auf Zirren und den potentiellen Einfluss des Luftverkehrs auf den Strahlungshaushalt und das Klima. Dabei kommen Modelle zum Einsatz, die einerseits die Mikrophysik im Detail nachvollziehen. Andererseits wird das globale Zirkulationsmodell ECHAM mit einem Aerosolmodul ausgestattet, um erstmalig die Wirkung von Aerosolen aus dem Luftverkehr und aus anderen Quellen auf die Zirruswolkenbildung näherungsweise in einem globalen Modell zu erfassen.

1.3 Beziehung zu HGF-Kernthemen und externen Projekten

Das HGF-Verbundprojekt PAZI berührt das Kernthema der Luft- und Raumfahrt im Hinblick auf die Umweltauswirkungen der Luftfahrt und Weiterentwicklung von Fernmessverfahren zur Erdbeobachtung, sowie ferner die Kernthemen Stratosphärenforschung und Aerosolforschung der beteiligten HGF-Zentren. Das Projekt dient HGF-Zielen im Sinne der Vorsorgeforschung. Das Ergebnis der Untersuchungen ist von unmittelbarem Interesse für die Triebwerksindustrie, die zur Optimierung der Umweltwirkungen von Luftverkehr wissen muss, ob Emissionen von Rußpartikeln oder reaktiven Schwefelprodukten auf das Klima der Erdatmosphäre einen größeren Einfluss ausüben als beispielsweise die Stickoxidemissionen.

Für die Luftfahrtindustrie ist es von strategischer Bedeutung, möglichst frühzeitig zu wissen, welche Emissionen das Hauptproblem darstellen und auf welche Weise man diesen Problemen entgegen kann. Nur so kann die Industrie den Nutzen ihrer umfangreichen, langfristigen Investitionen sicherstellen. Frühzeitiges Wissen eröffnet dabei einen internationalen Wettbewerbsvorteil. In PAZI engagieren sich Unternehmen aus der Triebwerksherstellung und die Lufthansa durch die Bereitstellung von Triebwerken und Flugzeugen, einschließlich der umfangreichen Infrastruktur zur Durchführung der Messungen am Boden und in der Atmosphäre.

Das geplante Projekt stützt sich auf erhebliche Erfahrungen der beteiligten Partner und bereits begonnene Methodenentwicklungen. So fließen wichtige Erkenntnisse aus den BMBF Verbundprogrammen „Schadstoffe in der Luftfahrt“ und KEROMIX, des Ozonforschungsprogrammes (OFP) des BMBF, dem DGF Schwerpunktprogramm „Grundlagen der Auswirkungen der Luft- und Raumfahrt auf die Atmosphäre“, den DLR SCHWEFEL 1-6 Feldmesskampagnen, dem DLR Brennkammermodellierungsprojekt (BKM), sowie den EU-Vorhaben AERONOX, AEROCONTRAIL, AEROTRACE, u.a. ein. Zudem nutzt das Vorhaben die Erfahrungen in dem europäischen thematischen Netzwerk AERONET. Das Vorhaben stützt sich auf laufende nationale (u.a. im BMBF-Aerosolschwerpunkt) und europäische (u.a. CHEMICON und CLOUDMAP) Projekte. Im Rahmen der Projekte POLINAT und SONEX wurde in den letzten Jahren mit Partnern von der NASA, NOAA, NCAR und verschiedenen Universitäten in den USA zusammengearbeitet. Die Ergebnisse und Erfolge dieser Zusammenarbeit sind beispielsweise in den Sonderheften der *Geophysical Research Letters* (15. Oktober 1999) und des *Journal of Geophysical Research* (im Druck, erscheint in 2000) dokumentiert.

Hierbei wurden international beachtete Ergebnisse erzielt, wie Zitate der zahlreichen Publikationen der PAZI-Partner, die tragende Rolle bei der Erstellung des IPCC-Berichtes, die Anerkennung durch transatlantische Zusammenarbeit und die erfolgreiche Einwerbung europäischer Projekte gezeigt haben. Im Januar 1999 hat eine internationale Expertengruppe die HGF-Umweltsektion begutachtet. Sie hat den HGF-Beitrag zum Thema „Luftverkehr und At-

mosphäre“ als international führend anerkannt und die bereits damals vorgestellte Konzept-idee für PAZI ausdrücklich begrüßt.

Das Projekt PAZI ist mit den EU-Projekten INCA und PARTEMIS verknüpft, die im Sommer 1999 im fünften Rahmenprogramm der EU von den internationalen Gutachtern befürwortet wurden und für die mit Vertragsabschluss zum Beginn 2000 gerechnet wird. Das Projekt INCA (Interhemispheric differences in cirrus properties from anthropogenic emissions) liefert die europäische Komponente des Einzelprojekts 3.1 von PAZI. Es umfasst Messungen mit der Falcon im April 2000 von Punta Arenas (Chile, ca. 50°S) und im Oktober 2000 von Shannon (Irland, ca. 50°N) aus. Im Projekt INCA sind mit DLR-PA 6 Partner aus 5 Ländern beteiligt, darunter Partner wie Johan Ström, Universität Stockholm, Joëlle Ovarlez, Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS und Markku Kulmala, Universität Helsinki, die eine fundierte Fachkompetenz für Messungen und Modellierung von Aerosolen und Zirren einbringen. Hinsichtlich der eingesetzten Satellitendaten wird mit Partnern in den USA (Patrick Minnis, NASA Langley) und vor Ort in Südamerika zusammengearbeitet.

Das Projekt PARTEMIS (Measurement and prediction of aerosols and gaseous precursors from turbine engines) liefert eine ergänzende europäische Komponente der Einzelprojekte 1.1 bis 1.3 von PAZI. Es umfasst Messungen an einem Triebwerksmodell bei der DERA, der englischen Großforschungseinrichtung in Pyestock. Im Projekt PARTEMIS sind elf auf den Gebieten experimentelle Aerosolcharakterisierung und –modellierung international ausgewiesene Partner aus 6 Ländern beteiligt, darunter Chris Wilson, DERA Pyestock, Urs Baltensperger, Paul-Scherrer-Institut und Philippe Mirabel, Universität Strasbourg, neben den PAZI Partnern Arnold (MPI-K), Zellner (Uni Essen), Petzold (DLR-PA) und Döpelheuer (DLR-AT).

1.4 Innovationspotential und Anwendungsbezug

Für die moderne Zivilisation stellt der Luftverkehr einen zentralen Bestandteil der Infrastruktur dar. Der zivile Luftverkehr (gemessen in Passagier-Kilometern) ist im Durchschnitt seit 1960 um mehr als 9% pro Jahr und seit 1992 um 5 - 7 % pro Jahr gewachsen. Im Jahr 1997 transportierten 13500 Strahlflugzeuge und 3200 Turboprop-Flugzeuge weltweit (ohne russische Föderation und China) 1.45 Milliarden zahlende Passagiere im Durchschnitt 1800 km weit. Bis 2050 ist vom IPCC ein Wachstum um den Faktor sechs im Vergleich zu 1992 als möglich eingestuft worden. PAZI liefert Wissen, das notwendig ist, um den wachsenden Verkehr umweltverträglich zu gestalten, zum Beispiel durch Entwicklung von Triebwerken mit verminderten Partikelemissionen, von Treibstoffen mit geringerem Schwefelgehalt und Rußbildungspotential und von Betriebsabläufen im Luftverkehr, die Regionen mit erhöhter Neigung zur Bildung von Kondensstreifen und Partikeln meiden.

Das Projekt untersucht eine neue Fragestellung. Während die Umweltforschung zum Luftverkehr sich bisher vorwiegend mit den emittierten Stickoxiden befasste, werden jetzt die direkten und indirekten Effekte der emittierten Partikel untersucht. Speziell zu den indirekten Aerosoleffekten gibt es bisher keine systematischen Untersuchungen.

Methodisches Innovationspotential besteht u.a. in der flugzeuggetragenen Analyse von Einzelpartikeln durch Laser-Ionisations-Massenspektrometrie, in der Messung von Wasserdampf im Umfeld von Zirren mit einem um Polarisationskanäle erweiterten Flugzeug-Lidar, und bei der Analyse des Gefrierhaltens von Aerosolen unter atmosphärischen Bedingungen in einer großvolumigen Aerosolkammer. Neu ist die Kombination dieser Methoden für Messungen in der Atmosphäre und im Labor mit den Messmöglichkeiten an Brennkammern und Triebwerken. Erstmals wird zudem mit einem umfangreichen Zirrus-, Aerosol- und Spurengas-Messsystem, einem Bodencilidar und Satellitendaten ein Vergleich der Zirruseigenschaften

der Nord- und Südhemisphäre für mittlere Breiten hergestellt. Neuland wird auch auf dem Gebiet der Modellierung beschritten.

Das Vorhaben stützt sich auf ein langjähriges, vertrauensvolles Verhältnis zur Industrie, das von Achtung der gegenseitigen Interessen und Unabhängigkeit geprägt ist. Die Zusammenarbeit mit der Industrie ermöglicht den Zugang zu Testanlagen und Informationen. Beispielsweise ist die Lufthansa inzwischen international zu einem Vorreiter für eine umweltgerechte Weiterentwicklung des Luftverkehrs geworden. Sie übt damit Druck auf die Triebwerks- und Flugzeughersteller aus und verschafft sich ein förderliches Image. Im Projekt PAZI wird mit der Industrie unter Wahrung der Neutralität der Forschung zusammengearbeitet.

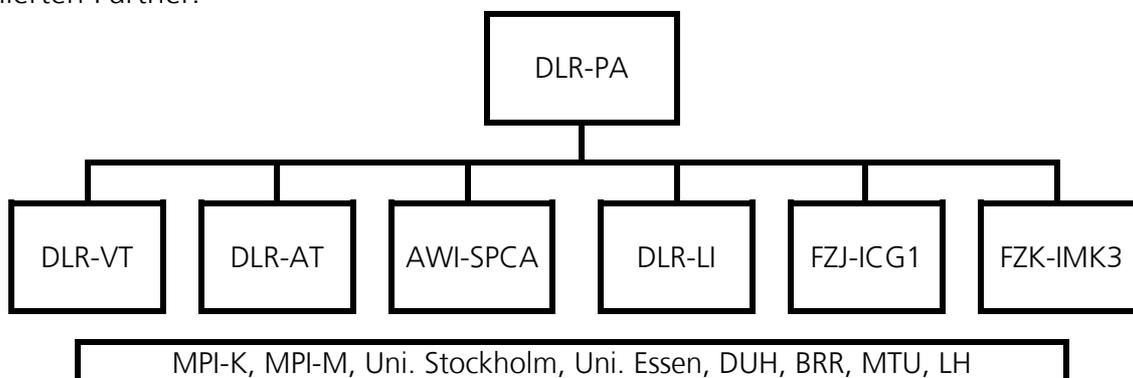
Das Vorhaben behandelt sehr anspruchsvolle Fragestellungen. Nicht zu allen Fragen wird innerhalb von drei Jahren eine abschließende Antwort möglich sein. Beachtet man jedoch die Beiträge der Antragsteller zu diesem Arbeitsgebiet in den letzten Jahren und die hier vorgeschlagene Verbundforschung mit der beantragten Finanzierung, der vorhandenen Kompetenz und der starken internationalen Vernetzung mit sehr kompetenten Partnern und mit anderen Forschungsprogrammen, so ist eine wesentliche Zielannäherung im geplanten Projekt zu erwarten.

PAZI hat das Potential, neue langfristige Arbeitsgebiete anzustoßen. Beispielsweise könnten folgende Fragen Themen nachfolgender Vorhaben werden: Optimierung von Triebwerken unter dem Aspekt minimaler Emission von eisbildenden Partikeln, Optimierung von Flugstrecken im Sinne einer Minimierung der Kondensstreifen und Partikelbildung, Erkennung von großräumigen Zirkusänderungen mit den Daten des voraussichtlich Mitte 2001 zu startenden europäischen Umweltsatelliten ENVISAT, der Einfluss der Veränderungen durch Aerosole auf den Niederschlag aus Zirren (letztlich auf den hydrologischen Zyklus), die Wirkung von veränderten Wolken auf die Luftchemie und die Rückwirkung einer veränderten Oxidationskapazität in der Atmosphäre oder eines veränderten Klimas auf die Partikelbildung.

2 Projektbeschreibung

2.1 Beteiligte Einrichtungen und Partner

Das nachfolgende Organigramm gibt eine Übersicht über die in PAZI beteiligten Zentren und assoziierten Partner.



In Projekt PAZI sind seitens des DLR das Institut für Physik der Atmosphäre (PA) (Antragstellung und Koordination) gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Lidar (LI) und in enger Abstimmung mit dem Flugbetrieb (FB) und dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR in Oberpfaffenhofen, das Institut für Verbrennungstechnik (VT, Stuttgart) und das Insti-

tut für Antriebstechnik (AT, Köln) beteiligt. Das Alfred-Wegener-Institut (AWI, Bremerhaven) liefert Beiträge aus der Sektion für Physik und Chemie der Atmosphäre (SPCA). Das Forschungszentrum Jülich (FZJ) ist mit dem Institut für Stratosphärenchemie (ICG1) vertreten, und eine Kooperation besteht mit dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK3) des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK). Wissenschaftliche Partner kommen aus den Max-Planck-Instituten für Kernphysik (MPI-K, Heidelberg) und für Meteorologie (MPI-M, Hamburg) und aus den Universitäten Stockholm (und damit dem INCA-Projekt), Essen und der Dalhousie University Halifax (DUH), Kanada. Industriepartner sind BMW-Rolls-Royce (BRR), Motoren und Turbinen Union (MTU), die Lufthansa (LH), sowie die Industriepartner des EU-Projekts PARTEMIS. Im Verlaufe des Projekts können weitere Partner hinzukommen.

2.2 Projektstruktur und Projektmanagement

Das Projekt PAZI gliedert sich in 4 Teilprojekte (TP), deren Titel und Koordinatoren in der folgenden Tabelle dargestellt sind.

| | | | |
|--------------------------------|--|----------------------------------|---------------|
| Fachliche Koordination: | | Prof. Dr. U. Schumann | DLR-PA |
| Projektleitung: | | Priv.-Doz. Dr. B. Kärcher | DLR-PA |
| Teilprojekte (TP) | | | |
| TP1 | Messung und Modellierung von Rußpartikeln aus Flugzeugtriebwerken Koordinator: Prof. Dr. M. Aigner, DLR-VT | | |
| TP2 | Messung eisbildender Eigenschaften des Aerosols Koordinator: Prof. Dr. U. Schurath, FZK-IMK3 | | |
| TP3 | Messung des Zusammenhanges zwischen Aerosolen und Zirren Koordinator: Prof. Dr. O. Schrems, AWI-SPCA | | |
| TP4 | Modellierung des Zusammenhanges zwischen Aerosolen und Zirren Koordinator: Priv.-Doz. Dr. R. Sausen, DLR-PA | | |

Die fachliche Koordination sorgt für die zentrale Projektverfolgung, jährliche Zwischenberichte aller Einzelprojekte und jährliche Workshops. Der Stand des Projektes wird laufend im Internet dokumentiert. Im Jahr 2000 wird ein internationaler Workshop durchgeführt, um die Verbindung zu anderen internationalen Arbeitsgruppen herzustellen und um später die im Rahmen von PAZI (bzw. den EU-Projekten INCA und PARTEMIS) gemessenen Daten der Modellierung zugänglich zu machen. Jeweils gegen Ende der drei Projektjahre werden zusammenfassende Aufsätze erstellt, die das Projekt, die Ergebnisse und die Bewertung der Arbeiten im Vergleich zum internationalen Wissensstand der allgemein fachlich interessierten Öffentlichkeit vorstellen (z.B. in den DLR-Nachrichten). Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden sobald als möglich in internationalen, begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht. Die Messdaten werden bezüglich TP1 bei DLR-VT und bezüglich TP2 und TP3 bei DLR-PA in zentralen Datenbanken gespeichert. Sie werden ein Jahr nach Ablauf des Projektes veröffentlicht. Vorher werden sie Dritten nur nach Zustimmung aller Beteiligten (inklusive der jeweiligen Industriepartner) zur Verfügung gestellt. Die Datenweitergabe und Zustimmung hierzu sind schriftlich zu dokumentieren. Das Vorhaben wird von einem Lenkungsausschuss begleitet, in dem die Leiter aller beteiligten Institute vertreten sind.

Die Teilprojekte sind in insgesamt 13 Einzelprojekte (EP) aufgeteilt, wovon jedes inhaltlich von einem Fachkoordinator verantwortet wird, wie der nachfolgende Strukturplan ausweist.

Projektstrukturplan von PAZI

| | | | |
|---|--|---|--|
| PAZI Schumann und Kärcher Partikel aus Flugzeugtriebwerken und ihr Einfluss auf Kondensstreifen, Zirruswolken und Klima | | | |
| 1 Aigner Rußemissionen und Aerosolvorläufergase | 2 Schurath Eisbildung in der Atmosphäre | 3 Schrems Aerosol-Zirren- Messung | 4 Sausen Aerosol-Zirren- Modellierung |
| 1.1 VT Noll Rußbildung und Gasphasenchemie in Brennkammern (mit BRR und MTU) | 2.1 FZK Möhler Gefriermessungen in der Aerosol-/Wolkenkammer AIDA | 3.1 PA Busen INCA-Feldmessungen (mit EU-INCA-Partnern) | 4.1 PA Kärcher Prozessmodellierung Aerosole und Wolken (mit Uni Essen, Zellner) |
| 1.2 AT Kruse Rußemissionen auf realen Flugmissionen (mit BRR und MTU) | 2.2 PA Busen Partikelmessungen in Kondensstreifen und Zirren (mit MPI-K, Arnold) | 3.2 AWI Schrems Lidaranalyse von Zirren bei INCA | 4.2 PA Gierens Wolkenauflösende Modellierung |
| 1.3 PA Petzold Spektrale Rußcharakteri- sierung (mit EU-PARTEMIS Partnern) | 2.3 LI Flentje Lidarmessungen von Kondensstreifen, Zirren und H ₂ O | 3.3 PA Wendling Satellitenbeobachtung von Kondensstreifen und Zirren (mit NASA, Minnis) | 4.3 PA Sausen Globale Modellierung mit ECHAM (mit MPI-M, Feichter) |
| | 2.4 FZJ Borrmann In-situ-Messungen von Einzelpartikel- Komposition und H ₂ O | | |

2.3 Wissenschaftliche Begründung des Projektes

Aerosole, wie z.B. luftgetragene Rußpartikel und Schwefelsäuretropfen, werden am Boden und von Flugzeugen in die Atmosphäre emittiert oder bilden sich durch Nukleation aus kondensierbaren Gasen. Aerosole stammen aus natürlichen Quellen (z.B. Biomassenverbrennung und Vulkane) und anthropogenen Quellen (z.B. Verbrennung fossiler Treibstoffe). Aerosole beeinflussen den Strahlungshaushalt und das Klima direkt durch Streuung und Absorption von Strahlung und indirekt durch Veränderung der Albedo und Lebensdauer von Wolken. Der indirekte Effekt des troposphärischen Aerosols auf niedrige Wolken, siehe Abb. 1, bewirkt potentiell den größten negativen Strahlungsantrieb (kühlend), kann aber lediglich der Größenordnung nach abgeschätzt werden (IPCC, 1996).

Zirruswolken bedecken etwa 20 bis 30% der Erdoberfläche. Sie beeinflussen den Strahlungshaushalt durch zwei gegenläufige Effekte (Liou, 1986). Sie reflektieren einen Teil der solaren Strahlung und kühlen so die darunter liegende Atmosphäre. Andererseits verringern sie den terrestrischen Strahlungsverlust und wirken so erwärmend. Beide Effekte hängen von den

Eigenschaften der Zirruswolken ab, wie Bedeckungsgrad, Wolkenhöhe, Temperatur, geometrische Struktur, optische Dicke, Eiswassergehalt, Größe, Form und Lage der Eispartikel, sowie vom Sonnenstand, von Albedo, Temperatur und Emissivität der Erdoberfläche, von der Bedeckung mit anderen Wolken und vom Feuchte- und Temperaturprofil der Atmosphäre (Wendling et al., 1979; Meerkötter et al., 1999). Nach Modellrechnungen mit Klimamodellen wirkt eine Zunahme von dünnen Zirren überwiegend erwärmend (Hansen et al., 1997). Eine Zunahme der optischen Dicke von Zirren, z.B. durch Zunahme der Eispartikel oder des Wassergehalts, wirkt bei dünnen Zirren erwärmend, bei dicken Zirren kühlend (Wyser and Ström, 1998; IPCC, 1999). Daher ist die Wirkung von zusätzlichen Aerosolen auf Zirren selbst dem Vorzeichen nach nicht einfach abschätzbar. Über die Veränderung der Lebensdauer von Zirren durch Aerosole, z.B. aus Vulkaneruptionen, gibt es nur wenige, teils widersprüchliche Angaben (IPCC, 1999).

Die Erforschung der Wechselwirkung von Aerosolen und Kondensstreifen mit Zirren und Klima erfordert daher einen langfristigen, integrierten Ansatz von In-situ-Messungen, Fernerkundung und Modellierung, wie in PAZI vorgesehen. Dabei kann PAZI auf Erfahrungen aus früheren und laufenden nationalen und internationalen Forschungsprogrammen aufbauen (Heintzenberg et al., 1996; Raschke et al., 1998), siehe auch Kap. 1.3.

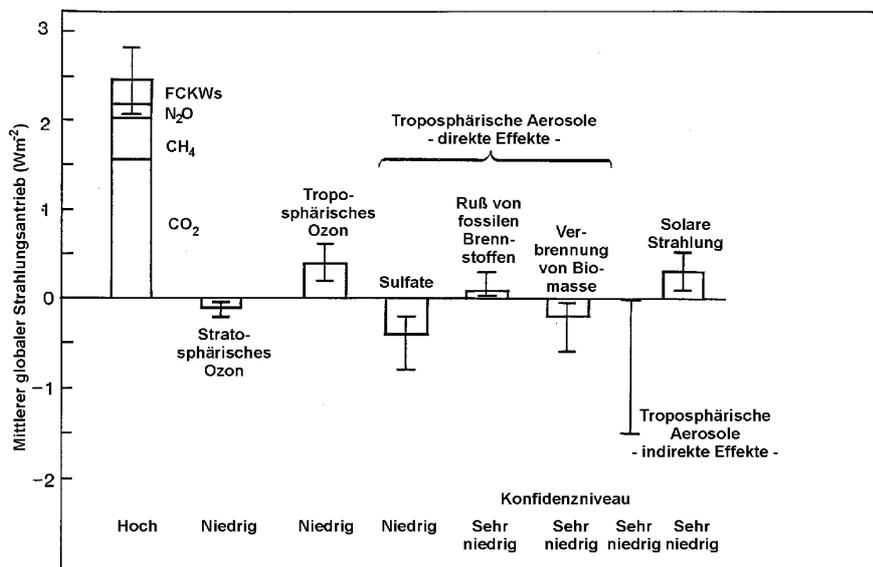


Abb. 1. Strahlungsantrieb aufgrund verschiedener anthropogener und natürlicher Störungen seit Beginn der Industrialisierung bis 1992 (IPCC, 1996).

Flugzeugtriebwerke emittieren Rußpartikel, Chemikalien und kondensierbare Gase, darunter Wasserdampf (H₂O), Schwefelsäure (H₂SO₄) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe, die zur Neubildung (Nukleation) von flüssigen Aerosolteilchen im unmittelbaren Nachlauf führen (Yu et al., 1998; Kärcher et al., 1998; Schröder et al., 1998; Gleitsmann and Zellner, 1998; Arnold et al., 1999). Der absolute Beitrag des Luftverkehrs zum atmosphärischen Aerosol (ca. 0.006 Tg Ruß/Jahr und 0.06 Tg Schwefel pro Jahr) ist etwa 1000 mal kleiner als die Ruß- und Schwefelmengen, die aus der Verbrennung von fossilen Treibstoffen insgesamt in die Atmosphäre gelangen. Dennoch ist der Beitrag des Luftverkehrs nicht vernachlässigbar, da er Aerosole direkt im Bildungsbereich von Zirruswolken freisetzt und da es nicht primär auf die Masse, sondern die Zahl der Partikel ankommt, die zur Eisbildung geeignet sind. Die Partikel aus dem Luftverkehr sind relativ klein (typisch 10 bis 100 nm Durchmesser) und daher ist ihre Zahl trotz geringer Masse groß.

Kondensstreifen sind linienförmige Wolken hinter Flugzeugen. Kondensstreifen bilden sich, wenn das Flugzeug in einer kalten Atmosphäre fliegt, deren Temperatur eine kritische Temperatur unterschreitet, die vom Druck, der Umgebungfeuchte, dem Wassergehalt und der Verbrennungswärme im Treibstoff und dem Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks im Flug abhängt (Schumann, 1996). Kondensstreifen bestehen vorwiegend aus Eispartikeln, die zunächst als flüssige Tröpfchen durch Kondensation des Wasserdampfes aus den Triebwerken auf dafür geeigneten Partikeln entstehen und bald danach gefrieren. Bei geringer Luftfeuchte verdunsten die Eiskristalle bald wieder und der Kondensstreifen bleibt kurz. In eisübersättigter Atmosphäre wachsen die Kondensstreifen zu Zirruswolken an, wobei die Eispartikel ihren Wassergehalt vorwiegend aus der Übersättigung der Atmosphäre beziehen. Im Jahresmittel bedecken die als linienförmige Wolken im Satellitenbild erkennbaren Kondensstreifen in Regionen mit hohem Luftverkehr in mittleren Breiten mehr als 1% des Himmels. Der globale Bedeckungsgrad mit Kondensstreifen wird auf knapp 0.1% geschätzt, wobei der Anteil gealterter Kondensstreifen, die nicht mehr linear sind, unbekannt ist. Kondensstreifen haben, abgesehen von ihrer Geometrie, Strahlungseigenschaften ähnlich wie dünne Zirren. Ein Zuwachs von 2 bis 5% an Bedeckung durch Kondensstreifen in den Hauptverkehrsregionen hat das Potential, das Klima zumindest regional signifikant zu ändern (Ponater et al., 1996; IPCC, 1999).

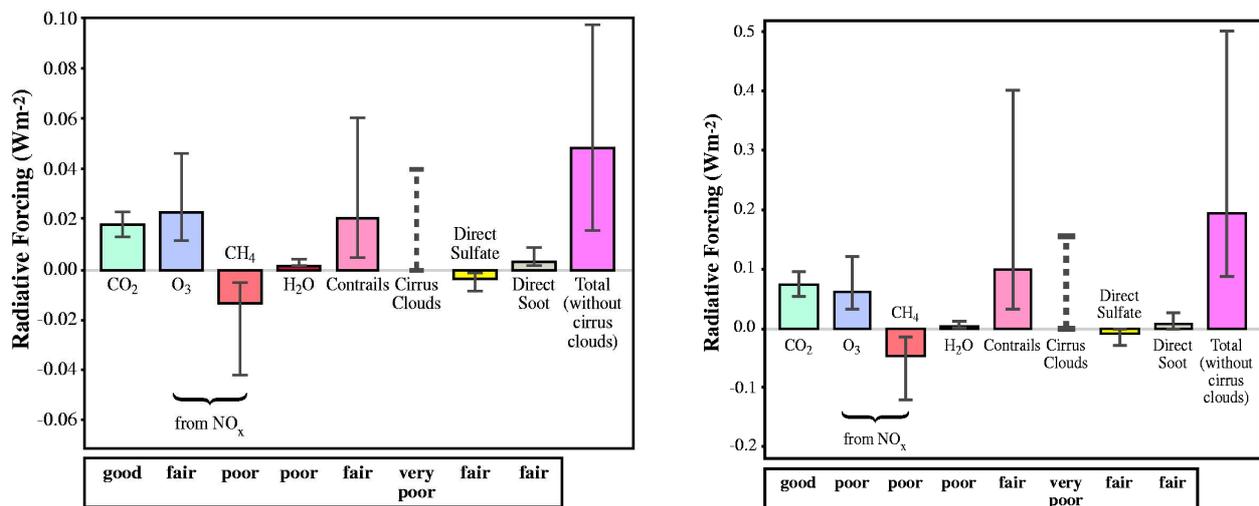


Abb. 2. Strahlungsantrieb aufgrund der verschiedenen Emissionen des Luftverkehrs; links: im Jahr 1992; rechts: für ein Referenzszenario mit 6-fach gesteigertem Verkehr im Jahr 2050 (IPCC, 1999).

Der Sonderbericht des IPCC (1999) zu den Wirkungen der Emissionen des weltweiten Luftverkehrs auf die Atmosphäre lieferte erstmalig eine globale Abschätzung des Strahlungsantriebs aller Emissionen des Luftverkehrs für 1992 und für Szenarien bis 2050, siehe Abb. 2. Danach tragen die Emissionen des Luftverkehrs heute ca. 4% zum gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb des Klimas bei. In einem Bezugsszenario wächst der Beitrag des Luftverkehrs zum Strahlungsantrieb gegenüber 1992 bis 2050, bei Annahme eines sechsfach gestiegenen Verkehrs, um einen Faktor 3.8. Dabei ist der Effekt des Luftverkehrs auf Zirren nicht berücksichtigt. Der Strahlungsantrieb durch linienförmige Kondensstreifen konnte erstmalig von regionalen Beobachtungen (Bakan et al., 1994; Mannstein et al., 1999) mit Hilfe von Analysen auf der Basis meteorologischer Daten (Sausen et al., 1998) und mit Strahlungstransportrechnungen (Meerkötter et al., 1999; Minnis et al., 1999) global extrapoliert werden. Danach beeinflussen die linienförmigen Kondensstreifen das Klima möglicherweise etwa ebenso stark wie die vom Luftverkehr emittierten bzw. beeinflussten Treibhausgase Kohlendioxid und Ozon. Langzeit-Beobachtungen der Wolkenbedeckung in Regionen mit starkem

Luftverkehr vom Boden aus (Boucher, 1999) oder mit Satellitendaten (IPCC, Kapitel 3.5, 1999) deuten darauf hin, dass die Bewölkung in der Atmosphäre in diesen Regionen zunimmt („Boucher-Hypothese“) und dass diese Zunahme etwa dreimal so groß ist, wie aufgrund der linienförmigen Kondensstreifen erklärbar wäre. Allerdings kann diese Bewölkungszunahme auch auf andere Ursachen zurückgehen.

Als wichtigste wissenschaftliche Frage, zu der heute noch besonders große Unsicherheiten bestehen, nennt der IPCC-Bericht die Wirkung von Aerosolen und Kondensstreifen auf Zirruswolken. Bisher gibt es kein Modell, das die Wirkungen von Kondensstreifen und Aerosolen aus dem globalen Luftverkehr auf Zirren, Strahlungshaushalt und Klima berechnen kann. Solch ein Modell soll erstmalig im TP4 entwickelt werden. Dazu sind Kenntnisse über die Rußbildung und -eigenschaften (TP1), über die Bildungsprozesse von Aerosolen und Eispartikeln in der Atmosphäre (TP2), über die großräumigen Beziehungen zwischen Aerosolen und Zirrusseigenschaften (TP3) sowie die Modellierung der Prozesse und Eigenschaften auf verschiedenen Skalen, bis hin zur globalen Skala (TP4) erforderlich.

TP1: Messung und Modellierung der Rußentstehung in Triebwerken

Triebwerke emittieren ca. 10^{15} Rußpartikel je kg verbrannten Treibstoffs (typisch 10-100 nm Durchmesser) und induzieren durch Chemionen und kondensierbare Gase wie Schwefelsäure oder organische Verbindungen ca. 10^{17} /kg volatile Partikel (<10 nm Durchmesser). Der Emissionsindex für Ruß beträgt ca. 0.04 g/kg (Petzold et al., 1999). Für die Partikelneubildung ist die Partitionierung von SO_2 in SO_3 bzw. H_2SO_4 am Triebwerksexit und die Anzahl der im Triebwerk generierten Chemionen von entscheidender Bedeutung. Der größte Anteil des Schwefels wird als SO_2 emittiert, jedoch existieren beträchtliche Unsicherheiten bezüglich der Konversionsfraktion $(\text{SO}_3+\text{H}_2\text{SO}_4)/\text{S}$ im Bereich 1%-20% (Lukachko et al., 1998; Kärcher, 1999). Zur Minimierung der Partikelbildung muß man wissen, von welchen Triebwerksparametern die Bildung von Ruß, Schwefelsäure, kondensierbaren Kohlenwasserstoffen und Chemionen abhängt.

Die Bildung von Ruß (Bockhorn, 1994) in realen Brennkammern (IPCC, Kap. 7, 1999) kann bisher nur mit Hilfe empirisch angepasster Modelle berechnet werden (Bressloff, 1996). Modelle auf der Basis von detaillierten Reaktionsmechanismen (z.B. Mauss und Bockhorn, 1995) versprechen einen größeren Gültigkeitsbereich, sind aber numerisch sehr aufwendig und noch in der Entwicklung. Sie werden langfristig die Basis der numerischen Simulation von Rußbildung und -oxidation bilden. Die Rußbildung und -oxidation hängen ab von der Fluid- und Thermodynamik in der Brennkammer und in der Turbine. Wichtige, zu modellierende Einflußgrößen sind die Wirkung der Turbulenz, die Gasphasenchemie der Brennstoffe, die für die Rußbildung maßgeblichen gasförmigen Rußvorläufersubstanzen und Radikale (wie O, H und OH) und die SO_2/SO_3 -Umwandlung.

Wie schon früher für Stickoxide und auch für die Rußmasse demonstriert (Döpelheuer, 1997), kann die Übertragung der Emissionen von Einzeltriebwerken auf die Flotte der eingesetzten Flugzeuge mit empirischen Beziehungen erfolgen. Diese Beziehungen sind anhand gezielter Messungen an Brennkammer-, Triebwerks- und Höhenprüfständen entwickelt worden und benutzen zur Übertragung auf andere Triebwerkstypen die Messwerte aus deren Zulassung. In jüngster Zeit konnte das Berechnungsverfahren anhand von Messungen im Flug validiert werden (Petzold et al., 1999). Neu ist der Versuch, auch die Abhängigkeit des mittleren Rußdurchmesser vom Triebwerk und dessen Zustand mit solchen Beziehungen zu erfassen.

TP2: Bestimmung der Eisbildungseigenschaften des Aerosols und der Wasserdampfverteilung

Die Eigenschaften von Zirruspartikeln als Funktion des Aerosols sind rechnerisch schwer vorhersagbar (Pruppacher and Klett, 1997). Dies gilt besonders im Bereich der Tropopause, in dem tiefe Temperaturen vorherrschen und der durch eine relativ hohe raumzeitliche Variabilität von Spurengasen und Aerosolen gekennzeichnet ist. Die heute benutzten Modelle der Wolkenbildung in globalen Zirkulationsmodellen unterstellen, dass sich Zirruswolken bilden, wenn die Luftfeuchte Eissättigung überschreitet. Messungen in Gebirgswolken haben gezeigt, dass dort Feuchten gefunden werden, die weit oberhalb der Eissättigung liegen (bis zu 160% relativ zur Sättigung über Eis; Heymsfield et al., 1998). Hohe Übersättigung wurden kürzlich auch in Zirren über dem Ozean gemessen (Ovarlez et al., 1999; Jensen et al., 1999; Gierens et al., 1999). Die für das Klima und Wolken wichtige Wasserdampfverteilung (Kley and Russell, 2000) ist im Bereich der Tropopause nicht einfach zu messen. Hier stehen jedoch geeignete in situ (Schiller et al., 1999) und DIAL-Lidar-Methoden zur Verfügung (Ehret et al., 1998).

Nach Modellen (Jensen and Toon, 1997) kann die Zahl der Eispartikel in Zirren mit Ruß sowohl abnehmen als auch zunehmen, je nach bei den Simulationen angenommenen (aber de facto unbekannt) Eisbildungseigenschaften der Rußpartikel. Frisch emittierter Ruß gilt gemeinhin als hydrophob. Neuere Labormessungen zeigen jedoch, dass Ruß auf verschiedenen Wegen, z.B. durch Benetzung mit Schwefelsäure, hydrophil wird und somit als Kondensationskern auch bei geringer Wasserübersättigung geeignet ist. Einmal gebildete Wassertropfen gefrieren homogen, wenn es kalt genug ist (typisch unter -40°C). Ruß kann auch bei Temperaturen unter ca. -35°C die Eisbildung durch heterogene Nukleation auslösen (DeMott et al., 1999). Die Eigenschaften von Aerosolen lassen sich u.a. mit Partikelspektrometern (Schröder et al., 2000), mit Laser-Ionisations-Massenspektrometern (Murphy et al., 1998) und mit Aerosol-/Wolkenkammern untersuchen (Bunz et al., 1996).

TP3: Bestimmung der Beziehung zwischen Aerosolen und Zirruseigenschaften

Ruß und volatile Aerosole beeinflussen die Eigenschaften von Zirren, aber die Details und das Ausmaß dieser Effekte sind kaum bekannt. Es gibt keine systematischen Erkenntnisse über die Beziehungen zwischen Eigenschaften des Aerosols und der Zahl von sich bildenden Zirruspartikeln. Ström et al. (1997) finden bei Messungen in Zirren über Deutschland sehr viel mehr kleine Eispartikel als früher erwartet wurden. Sie vermuten, dass Zirren hier fast immer durch Luftverkehr beeinflusst sind. Messungen in einer Region mit starkem Flugverkehr in Zirren haben gezeigt, dass Regionen mit großer Rußkonzentration korrelieren mit Zirren mit hoher Eispartikelanzahldichte (Ström und Ohlsson, 1998). Ob diese Korrelation auf verstärkter Nukleation von Eispartikeln in den Zirren beruht oder auf Eisbildung in den Kondensstreifen zurückgeht, ist bisher nicht klar. Satelliten-Daten (SAGE) zeigen, dass dünne Zirren in der oberen Troposphäre auf mittleren nördlichen Breiten häufiger sind als auf entsprechenden Breiten der Südhemisphäre (Wang et al., 1996). Sie können auch die Chemie der Atmosphäre beeinflussen (Borrmann et al., 1996, Kärcher und Solomon, 1999). Bisher existieren In-situ-Messungen von Zirruswolken in mittleren Breiten nur auf der Nordhemisphäre (z.B. Raschke et al., 1998). Die Größe von Eispartikeln in Zirruswolken läßt sich mit der sogenannten split-window-Technik von Satellitendaten im $10\ \mu\text{m}$ Bereich bestimmen, wenn man die Form der Partikel kennt oder voraussetzt (Inoue et al., 1985; Minnis et al., 1993). Kürzlich gelang es Baran et al. (1999) die Partikelgröße und -form von Eispartikeln aus Daten eines vorwärts und rückwärts schauenden Instruments (ATSR) bei 3.7 und $10.8\ \mu\text{m}$ zu bestimmen. In jüngerer Zeit ist es in Einzelfällen gelungen, die mittlere Größe von Eispartikeln von Zirren und Kondensstreifen aus Satellitendaten abzuleiten (Duda et al., 1999). Die Eigenschaften von

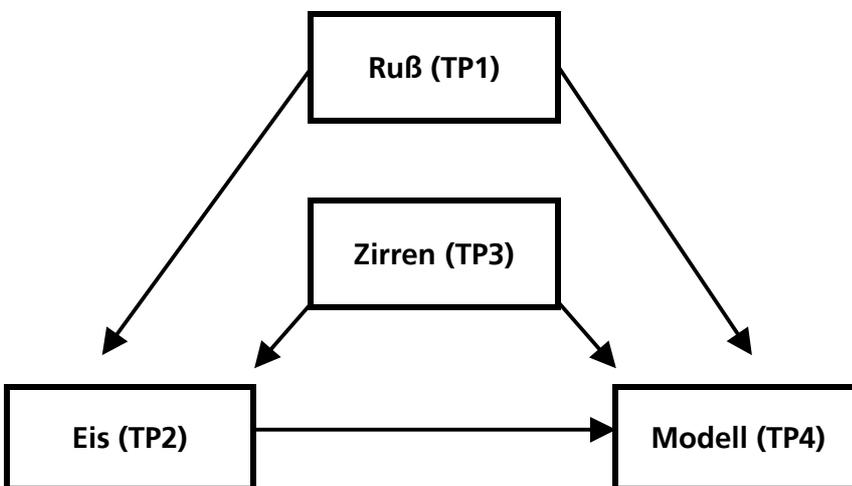
Zirren lassen sich vom Boden aus mit Lidar beobachten (Platt et al., 1987; Beyerle et al., 1998). Im Projekt PAZI werden hemisphärische Unterschiede in der Aerosol-Zirrus-Beziehung erstmalig in situ, mit Lidar und Satelliten gemessen.

TP4: Modellierung des Aerosoleinflusses auf Eisbildung, Strahlungshaushalt und Klima.

Die numerische Modellierung der Aerosolwirkungen auf Zirren in globalen Klimamodellen ist Neuland. Es gibt bisher Modelle der Rußverteilung und des Schwefelkreislaufes in der Atmosphäre. Beispielsweise haben Kjellström et al. (1998) gezeigt, dass der Luftverkehr nur wenig zur Massenbelastung der Atmosphäre durch Sulfataerosole beiträgt, aber durchaus die Anzahldichte von Partikeln verändert. Dies wird durch Messungen bestätigt (z.B. Schlager et al., 1997; Hofmann et al., 1998; Anderson et al., 1999). Die Bildung von Zirruswolken wird in Klimamodellen bis heute ohne Berücksichtigung von Aerosoleigenschaften modelliert (Lohmann et al., 1999). Die Modelle berechnen lokal die Veränderung des Wassergehalts (unterhalb von -30°C wird vollständige Eisbildung unterstellt), indem sie annehmen, dass aller Wasserdampf oberhalb der Eissättigung in Eis übergeht, und berücksichtigen Niederschlag mit einer vorgegebenen Fallgeschwindigkeit. Der Bedeckungsgrad wird als Funktion der relativen Feuchte vorgegeben. Partikelparameter gehen bisher nur in die Strahlungstransportrechnung ein und werden dafür fest vorgegeben. Im Projekt PAZI werden Methoden zur numerischen Modellierung der Aerosolwirkungen auf Zirren entwickelt.

2.4 Zusammenwirken der Teilprojekte und Hauptmeilensteine

Das folgende Diagramm zeigt den Informationsfluss zwischen den vier Teilprojekten:



Das stark vereinfachende Flußbild zeigt, dass die Ergebnisse von TP1 (Ruß) bei TP2 (Eis) und TP4 (Modell) einfließen. TP2 verfolgt die Rußeigenschaften nach Verlassen des Triebwerkes und bestimmt ihre Eignung zur Eisbildung. Die Ergebnisse gehen in die Modellierung bei TP4 ein. Die Messungen zu Zirren und Aerosolen in TP3 fließen in die Auslegung der Labormessungen in TP2 ein und geben eine Verifikationsmöglichkeit für die Modellierung in TP4. Die Prozessmodellierung in TP4 ermöglicht eine Interpretation der AIDA Messungen zur Eisbildung. Im Zusammenspiel mit den In-situ-Messungen von Partikeln und Wasserdampf aus TP2 und TP3 tragen prozess- und wolkenauflösenden Simulationen zu einem vertieften Verständnis der Aerosol-Zirren-Wechselwirkung bei. Mit diesen Informationen und den Erkenntnissen der experimentellen Vorhaben werden Parameterisierungen zur Bildung und zum Bedeckungsgrad von Zirren abgeleitet und letztlich der Einfluss flugzeug-generierter Partikel auf das Klima näherungsweise bestimmt. Bezüglich zahlreicher weiteren Beziehungen zwischen

den Einzelprojekten sei auf deren Beschreibung in Kap. 4 verwiesen. Zur Übersicht sind die wichtigsten Arbeitspakete im folgenden Zeitplan angegeben. Die Ziffern kennzeichnen das Ende des jeweiligen Arbeitspakets (Einzelheiten siehe Kap. 4).

TP1:

1. Rußmodul zur Ankopplung an Strömungscode
2. Messungen zur Russcharakterisierung im Labor, im Hochdruckkanal und am Triebwerk

TP2:

3. Eisexperimente mit Ruß-/Sulfataerosolen in AIDA
4. Feldmesskampagnen für Kondensstreifen, Zirren und H₂O

TP3:

5. INCA-Messkampagne Shannon
6. Analyse des Nord-/Süd-Kontrastes der Zirruseigenschaften in den INCA-Messgebieten

TP4:

7. Parameterisierungen von Zirren und Bedeckungsgrad für ECHAM
8. Erste Quantifizierung der Klimawirksamkeit luftverkehrsbedingter Zirrenänderungen

| | 1. Jahr | | | | 2. Jahr | | | | 3. Jahr | | | |
|-----|---------|---|---|---|---------|---|---|---|---------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TP1 | | | | | | | | | 1 | 2 | | |
| TP2 | | | | | | | | | 3 | 4 | | |
| TP3 | 5 | | | | 6 | | | | | | | |
| TP4 | | | | | | | | | 7 | | 8 | |

2.5 Literatur

- Anderson, B.E., W.R.Cofer, J. Crawford, G.L. Gregory, S.A. Vay, K.E. Brunke, Y. Kondo, M. Koike, H. Schlager, S.L. Baughcum, E.J. Jensen, Y. Zhao, K. Kita, An assessment of aircraft as a source of particles to the upper troposphere, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 3069-3073, 1999.
- Arnold, F., J. Curtius, B. Sierau, V. Bürger, R. Busen and U. Schumann, Detection of massive negative chemiions in the exhaust plume of a jet aircraft in flight, *Geophys. Res. Lett.*, **26** 1577-1580, 1999.
- Bakan, S., M. Betancor, V. Gayler, and H. Graßl, Contrail frequency over Europe from NOAA-satellite images, *Ann. Geophysicae* **12**, 962-968, 1994.
- Baran, A.J., S.J. Brown, J.S. Foot, D.L. Mitchell, Retrieval of tropical cirrus thermal optical depth, crystal size, and shape using a dual-view instrument at 3.7 and 10.8 µm, *J. Atmos. Sci.* **56**, 92-110, 1999.
- Beyerle, G., H.-J. Schäfer, R. Neuber, O. Schrems and I. S. McDermid, Dual wavelength lidar observation of tropical high-altitude cirrus clouds during the ALBATROSS 1996 campaign, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 919-922, 1998.
- Bockhorn, H. (Ed.), Soot formation in combustion – Mechanisms and Models, Springer, 1994
- Borrmann, S., S. Solomon, J.E. Dye, and B. Luo, The potential of cirrus clouds for heterogeneous chlorine activation, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2133-2136, 1996.
- Boucher, O., Air traffic may increase cirrus cloudiness, *Nature* **397**, 30-31, 1999.
- Bressloff, N.W., J.B. Moss and P.A. Rubini, CFD prediction of coupled radiation heat transfer and soot production in turbulent flames, 26th Symp. (Intern.) on Combustion, 2379-2386, 1996.
- Bunz, H., O. Möhler, K.-H. Naumann, H. Saathoff, W. Schöck, and U. Schurath, The novel aerosol chamber facility AIDA: Status and first results, in: Proc. 7th Symp. Physico-chemical behaviour of atmospheric pollutants (Eds: B. Larsen, B. Versino and G. Angeletti), EUR 17482, 673-677, 1996
- DeMott, P.J., Y. Chen, S.M. Kreidenweis, D.C. Rogers, and D.E. Sherman, Ice formation by black carbon particles, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2425-2428, 1999.

- Döpelheuer, A., Berechnung der Produkte unvollständiger Verbrennung aus Luftfahrttriebwerken, IB-325-09-97, DLR, Institut für Antriebstechnik, 1997.
- Duda, D. P., P. Minnis, L. Nguyen, D.R. Doelling, and R. Palinkonda, Estimates of cloud radiative forcing in contrail clusters, *J. Geophys. Res.*, eingereicht, 1999.
- Ehret, G., A. Fix, V. Weiss, G. Poberaj and T. Baumert, Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapour DIAL application in the upper troposphere and lower stratosphere, *Appl. Phys B* **67**, 427-431, 1998.
- Gierens, K., U. Schumann, M. Helten, H. Smit, and A. Marenco, A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements, *Ann. Geophys.* **17**, 1218-1226, 1999.
- Gleitsmann, G. and R. Zellner, A modelling study of the formation of cloud condensation nuclei in the jet regime of aircraft plumes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 19543-19556, 1998.
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy, Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6831-6864, 1997.
- Heintzenberg, J., H.-F. Graf, R.J. Charlson, and P. Warneck, Climate forcing and the physico-chemical life cycle of the atmospheric aerosol - why do we need an integrated, interdisciplinary global research programme? *Contr. Atmos. Phys.* **69**, 261-271, 1996.
- Heymsfield, A.J., L.M. Miloshevich, C. Twohy, G. Sachse, and S. Oltmans, Upper tropospheric relative humidity observations and implications for cirrus ice nucleation, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1343-1346, 1998.
- Hofmann, D.J., R.S. Stone, M.E. Wood, T. Deshler, and J.M. Harris, An analysis of 25 years of balloon-borne aerosol data in search of a signature of the subsonic commercial aircraft fleet, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2433-2436, 1998.
- Inoue, T., On the temperature and the effective emissivity determination of semitransparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 μm window region, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 88-98, 1985.
- IPCC, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 pp, 1996.
- IPCC, *Aviation and the Global Atmosphere, Special Report* [J.H. Houghton et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Jensen, E.J., and O.B. Toon, The potential impact of soot particles from aircraft exhaust on cirrus clouds, *Geophys. Res. Lett.* **24**, 249-252, 1997.
- Jensen, E.J., O.B. Toon, S.A. Vay, J. Ovarlez, R. May, P. Bui, C.H. Twohy, B. Gandrud, R.F. Pueschel, and U. Schumann, Prevalence of ice supersaturated regions in the upper troposphere: Implications for optically thin ice cloud formation, *J. Geophys. Res.*, eingereicht, 1999.
- Kärcher, B., Aviation-produced aerosols and contrails, *Surv. Geophys.* **20**, 113-167, 1999.
- Kärcher, B., F. Yu, F.P. Schröder, and R.P. Turco, Ultrafine aerosol particles in aircraft plumes: Analysis of growth mechanisms, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2793-2796, 1998.
- Kärcher, B. and S. Solomon, On the composition and optical extinction of particles in the tropopause region. *J. Geophys. Res.* **104**, 27441-27459, 1999.
- Kjellström, E., J. Feichter, R. Sausen, and R. Hein, The contribution of aircraft emissions to the atmospheric sulfur budget, *Atmos. Environ.* **33**, 3455-3465, 1999.
- Kley, D., and J.M. Russell III, The SPARC Water Vapor Assessment, in Vorbereitung, 2000.
- Liou, K.N., Review: Influence of cirrus clouds on weather and climate processes - A global perspective. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1167-1199.
- Lohmann, U., J. Feichter, C.C. Chuang, and J.E. Penner, Prediction of the number of cloud droplets in the ECHAM GCM. *J. Geophys. Res.* **104**, 9169-9198, 1999.
- Lukachko, S.P., I.A. Waitz, R.C. Miake-Lye, R.C. Brown, and M.R. Anderson, Production of sulfate aerosol precursors in the turbine and exhaust nozzle of an aircraft engine, *J. Geophys. Res.* **103**, 16159-16174, 1998.
- Mannstein, H., R. Meyer, and P. Wendling, Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR-data, *Int. J. Remote Sensing* **20**, 1641-1660, 1999.
- Mauss, F. and H. Bockhorn, *Z. Phys. Chem.* **188**, 45-60, 1995.

- Meerkötter, R., U. Schumann, D.R. Doelling, P. Minnis, T. Nakajima, and Y. Tsushima, Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophysicae* **17**, 1080-1094, 1999.
- Minnis, P., K.-N. Liou, and Y. Tanako, Inference of cirrus cloud properties using satellite-observed visible and infrared radiances. Part I: Parameterization of radiance fields, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1279-1304, 1993.
- Minnis, P., U. Schumann, D.R. Doelling, K.M. Gierens, and D.W. Fahey: Global distribution of contrail radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1853-1856, 1999.
- Murphy, D.M., D.S. Thomson, and M.J. Mahoney, In situ measurements of organics, meteoritic material, mercury, and other elements in aerosols at 5 to 19 km, *Science* **282**, 1664-1669, 1998.
- Ovarlez, J., P.F.J. van Velthoven, and H. Schlager, Water vapor measurements from the troposphere to the lowermost stratosphere: Some signatures of troposphere to stratosphere exchanges, *J. Geophys. Res.* **104**, 16,973-16,978, 1999.
- Petzold, A., A. Döpelheuer, C.A. Brock, and F.P. Schröder, In situ measurements and prediction of black carbon emission properties of aircraft at cruise altitude, *J. Geophys. Res.* **104**, 22171-22181, 1999.
- Platt, C.M. R., J.C. Scott and A.C. Dilley, Remote sensing of high clouds. Part VI: Optical properties of midlatitude and tropical cirrus, *J. Atmos. Sci.* **44**, 729-747, 1987.
- Ponater, M., S. Brinkop, R. Sausen, and U. Schumann, Simulating the global atmospheric response to aircraft water vapour emissions and contrails - A first approach using a GCM, *Ann. Geophys.*, **14**, 941-960, 1996.
- Pruppacher, H.R., and J.D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 954 pp, 1997.
- Raschke, E., P. Flamant, Y. Fouquart, P. Hignett, H. Isaka, P.R. Jonas, H. Sundqvist, and P. Wendling, Cloud-radiation studies during the European Cloud and Radiation Experiment (EUCREX), *Surv. Geophys.* **19**, 89-138, 1998.
- Sausen, R., K. Gierens, M. Ponater, and U. Schumann, A diagnostic study of the global distribution of contrails. Part I: Present day climate, *Theor. Appl. Climatol.* **61**, 127-141, 1998.
- Schiller, C., A. Afchine, N. Eicke, C. Feigl, H. Fischer, A. Giez, P. Konopka, H. Schlager, F. Tuitjer, F.G. Wienhold, and M. Zöger, M., Ice particle formation and sedimentation in the tropopause region: A case study based on in situ measurements of total water during POLSTAR 1997, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2219-2222, 1999.
- Schlager, H., P. Konopka, P. Schulte, U. Schumann, H. Ziereis, F. Arnold, M. Klemm, D.E. Hagen, and P.D. Whitefield, *In situ* observations of air-traffic emission signatures in the North Atlantic flight corridor, *J. Geophys. Res.*, **102**, 10739-10750, 1997.
- Schröder, F.P., B. Kärcher, A. Petzold, R. Baumann, R. Busen, C. Hoell, and U. Schumann, Ultrafine aerosol particles in aircraft plumes: In situ observations, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2789-2792, 1998.
- Schröder, F.P., B. Kärcher, C. Duroure, J. Ström, A. Petzold, J.-F. Gayet, B. Strauss, P. Wendling, and S. Borrmann, The transition of contrails into cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.*, im Druck, 2000.
- Schumann, U., On conditions for contrail formation from aircraft exhausts, *Meteorol. Z.*, **5**, 4-23, 1996.
- Ström, J., and S. Ohlsson, In situ measurements of enhanced crystal number densities in cirrus clouds caused by aircraft exhaust, *J. Geophys. Res.* **103**, 11355-11361, 1998.
- Ström, J., B. Strauss, T. Anderson, F. Schröder, J. Heintzenberg, and P. Wendling, In situ observations of the microphysical properties of young cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.* **54**, 2542-2553, 1997.
- Wang, P., P. Minnis, M.P. McCormick, G.S. Kent, and K.M. Skeens, A 6-year climatology of cloud occurrence frequency from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II observations (1985-1990), *J. Geophys. Res.* **101**, 29407-29429, 1996.
- Wendling, P., R. Wendling, H.K. Weickmann, Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals, *Appl. Opt.*, **18**, 2663-2671, 1979.
- Wyser, K., and J. Ström, 1998: A possible change in cloud radiative forcing due to aircraft exhaust, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1673-1676, 1998.
- Yu, F., R.P. Turco, B. Kärcher, and F.P. Schröder, On the mechanisms controlling the formation and properties of volatile particles in aircraft wakes, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 3839-3842, 1998.

3 Beantragte Fördermittel

Die im Rahmen von PAZI beantragte Gesamtfördersumme für den Zeitraum von 3 Jahren beträgt 8.84 Millionen DM. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Personal- und Investitionsbedarf aller am Projekt PAZI beteiligten Gruppen, nach Zentren aufgeschlüsselt. Dabei sind für Personalmittel die HGF-Pauschale von TDM 200 je Jahr und Mitarbeiter/in angesetzt, sowie Investitionen bzw. Sonderleistungen, die TDM 500 überschreiten.

| Zentrum | Personalmittel (TDM) | Investitionen (TDM) | Summe (TDM) |
|-------------|----------------------|---------------------|-------------|
| DLR | 7.200 | 540 | 7.740 |
| AWI | 900 | 0 | 900 |
| FZJ | 200 | 0 | 200 |
| FZK | 0 | 0 | 0 |
| Summe (TDM) | 8.300 | 540 | 8.840 |

Messungen mit Flugzeugen und in aufwendigen Labor- und Prüfständen sowie Klimasimulationen erfordern eine erhebliche Mittelausstattung. Zur Erzielung der Ergebnisse ist langfristig aufgebaute Kompetenz erforderlich. Entsprechend ist das veranschlagte Mittelvolumen und Personaleinsatz grundsätzlich begründet. Die Investitionsmittel dienen dem Aufbau eines Teststandes in EP1.1 und sind dort begründet.

Die Tabelle erfasst nur die Mittel, die speziell für PAZI von den HGF-Zentren vorgesehen wurden. Beispielsweise lassen es die HGF-Richtlinien nicht zu, die erheblichen Sachkosten für die Flugzeug- oder Rechnernutzung auszuweisen. Diese werden teils durch Drittmittel, durch die Overheads in den Personalkosten oder durch Personaleinsatz betrieblichen Personals gedeckt. Daneben setzen die beteiligten Institute zum Teil in erheblichem Umfang weitere Eigenmittel ein, z.B. um die erforderlichen Messsysteme aufzubauen. Die AIDA Messungen werden mit Mitteln des FZK durchgeführt. FZJ hat die Entwicklung des SPLAT-Instruments außerhalb des HGF-Projekts gesichert und rechnet hier nur die direkte Beteiligung an den Messungen ab. Schließlich stützt sich PAZI auf die bereits gesicherte Drittmittelfinanzierung in laufenden Projekten (z.B. bei der EU) und strebt weitere Verstärkung durch neue Drittmittelprojekte an. Der Personalbedarf (in Personaljahren) aller Einzelprojekte setzt sich wie folgt zusammen:

| Institut | Projekt | Jahr 1 | Jahr 2 | Jahr 3 | Summe |
|----------|------------|--------|--------|--------|-------|
| | TP1 | | | | |
| DLR-VT | 1.1 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| DLR-AT | 1.2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| DLR-PA | 1.3 | 0.5 | 1 | 0.5 | 2 |
| | TP2 | | | | |
| FZK-IMK3 | 2.1 | - | - | - | - |
| DLR-PA | 2.2 | 0.5 | 2 | 1 | 3.5 |
| DLR-LI | 2.3 | 0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.5 |
| FZJ-ICG1 | 2.4 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 1 |
| | TP3 | | | | |
| DLR-PA | 3.1 | 2.5 | 2 | 1 | 5.5 |
| AWI-SPCA | 3.2 | 2 | 1.5 | 1 | 4.5 |
| DLR-PA | 3.3 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| | TP4 | | | | |
| DLR-PA | 4.1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| DLR-PA | 4.2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| DLR-PA | 4.3 | 1.5 | 2 | 2 | 5.5 |
| Summe | | 13.4 | 15.9 | 12.2 | 41.5 |

4 Darstellung der Einzelprojekte

4.1 Rußemissionen und Aerosolvorläufergase

4.1.1 Rußbildung und Gasphasenchemie in Brennkammern

Fachkoordination Dr. habil. B. Noll, DLR-VT
Zuordnung TP1 - Rußemissionen und Aerosolvorläufergase

Ziele

Das Ziel dieser Arbeiten ist die Charakterisierung und Quantifizierung des am Austritt von Flugtriebwerksbrennkammern vorliegenden Abgasaerosols. Dabei interessieren in erster Linie die Bestimmung von Rußkonzentration und -größenverteilungen und die am Brennkammeraustritt vorliegenden Konzentrationen gasförmiger Substanzen wie hochreaktiven Verbrennungsradiakalen oder von Schwefeloxiden. Weiterhin wird untersucht, welche Veränderungen der am Brennkammeraustritt vorliegende Ruß in der nachfolgenden Turbine mit gekühlten Schaufeln erfährt. Zum Erreichen der Ziele werden numerische Berechnungen und Experimente durchgeführt.

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern im TP1 wird somit eine Datenbasis für andere Projekte in PAZI geschaffen, in denen die Auswirkungen von Rußteilchen aus Flugtriebwerken in der Tropopausenregion untersucht werden (Aerosolkammer-Messungen in EP2.1, Zirrenbildung in EP4.2, klimatische Auswirkungen in EP4.3). Aus der Berechnung der Strömungs- und Verbrennungsvorgänge sowie der Rußbildung und -oxidation ist neben der Bestimmung der Rußemissionen von Flugtriebwerken auch die Ableitung von Konzepten zur Minderung der Rußemissionen möglich.

Problemstellung

Über die Entstehung und den Abbrand von Ruß in Brennkammern von Flugtriebwerken ist ein nur unvollständiger Wissensstand erreicht. Die Untersuchung des Einflusses der Abgasaeosole aus Flugtriebwerken auf die Wolkenbildung in der Tropopausenregion vor dem Hintergrund anderer Partikelquellen erfordert eine möglichst genaue Charakterisierung des Rußaerosols.

Methoden

Zur Ermittlung der Ruß- und Gasphasenkonzentrationen am Austritt von Brennkammern ist in EP1.1 die dreidimensionale numerische Simulation von Rußbildungs- und -oxidationvorgängen in einer repräsentativen Versuchsbrennkammer und in realen Flugtriebwerksbrennkammern für unterschiedliche Lastpunkte vorgesehen. Hierfür ist insbesondere eine Weiterentwicklung der vorhandenen Rechenmodelle zur numerischen Simulation der Verbrennungs- und Rußbildungsvorgänge in Brennkammern erforderlich. Zur Validierung dieser Modelle muss die vorhandene, experimentelle Datenbasis vervollständigt und erweitert werden. Die hierzu geplanten umfangreichen experimentellen Arbeiten dienen ferner zur Aufstellung von empirischen Korrelationen zur Rußemission von Brennkammern in EP1.2 sowie zur Charakterisierung des Rußaerosols.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Entwicklung von Rußbildungsmodellen

Zur numerischen Beschreibung der Rußbildung existieren halbempirische Modelle (z.B. Bressloff et al., 1996), die relativ einfach an unterschiedliche Verbrennungsbedingungen angepaßt werden können, deren Einsatzbereich jedoch wegen ihrer geringen Allgemeingültigkeit sehr begrenzt ist. Modelle mit detaillierten Reaktionsmechanismen (Frenklach, 1996; Frenklach and Wang, 1994; Bockhorn, 1994; Mauss and Bockhorn, 1995; Braun-Unkhoff et al., 1998; Tan and Frank, 1996; Hu et al., 1999) sind universeller einsetzbar und sollen die Basis für die hier geplanten Arbeiten bilden.

Bei DLR-VT wurden in der Vergangenheit umfangreiche Stoßrohrexperimente zur Kinetik der Rußbildung und -oxidation durchgeführt, die zur Entwicklung eines Rußmodells beitrugen (Braun-Unkhoff et al., 1998). Dabei wurden auch geeignete Reaktionsmechanismen für die Verbrennung und Rußvorläuferchemie von realen Brennstoffen (Kerosin, Erdgas) in Verbindung mit Laborexperimenten weiterentwickelt. Die Erstellung und das Testen von Ersatzmechanismen für die Kerosin-Verbrennung wird auch weiterhin bei DLR-VT Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten sein. Diese Arbeiten werden jedoch außerhalb von PAZI durchgeführt werden.

Messtechnik und Versuchseinrichtungen

Zur Messung von Rußkonzentration, Rußvolumenbruch und Größenverteilung von Rußpartikeln sind bei DLR-VT sowohl optische Verfahren als auch eine Messtechnik basierend auf Filterproben vorhanden. Zur Auswertung von Filterproben steht ein Feldemissionsraster-Elektronenmikroskop mit der außergewöhnlich hohen Auflösung von 1.2 nm zur Verfügung. Weiterhin wird in dem vorliegenden Vorhaben ein Particle-Analyzer benutzt werden, der die Erfassung von Verteilungen der Rußpartikelgröße und der spezifischen 'Mindest'-Rußoberfläche ermöglicht. Für den Einsatz dieser Messtechnik liegen umfangreiche Erfahrungen vor, die auch Messungen an Triebwerken umfassen. Für die Analyse von Brennstoffen als auch für die Abgasanalyse gasförmiger Spezies ist eine umfangreiche gerätetechnische Ausstattung (Standardanalytik, Gaschromatografie-Massenspektrometrie-Analyse) vorhanden, die im vorliegenden Vorhaben eingesetzt werden soll.

Bei DLR-VT wurden bereits umfangreiche und auch wegweisende Arbeiten zu Entwicklung und Einsatz von laseroptischen Messverfahren für die in-situ-Bestimmung von Temperatur und Spezieskonzentrationen in Flammen (z.B. in Stricker et al., 1993) durchgeführt. Hieraus stammen fundierte Erfahrungen für die Anwendung solcher Messsysteme sowohl unter Laborbedingungen als auch unter den 'harten' Bedingungen von Messungen an realen Brennkammern unter Druck und an Triebwerksprüfständen. In EP1.1 sind auch die derzeitigen Aktivitäten zu Einsatz und Entwicklung des LII (Laser-induced Incandescence) Verfahrens für die Untersuchung der Rußbildung unter Druck von Bedeutung. Weiterhin laufen am Institut Forschungsarbeiten zum Einsatz von CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) in rußenden Flammen. Mit LII und CARS kommen zwei Messverfahren zum Einsatz, mit denen auch in Flammen unter Druck die örtlichen Verteilungen sowohl des Rußvolumenbruch als auch der Temperatur erfaßt werden können. Die experimentellen Datensätze sind von großer Wichtigkeit für die künftige Entwicklung von Rußbildungsmodellen.

Numerische Simulation

Die Entwicklung und Anwendung von numerischen Methoden zur Strömungssimulation in Brennkammern war und ist Gegenstand einer Reihe von Forschungsarbeiten bei DLR-VT. Der Fachkoordinator bringt auf diesem Gebiet fundierte Erfahrungen ein (Noll, 1992). Hierbei

wurden bereits mehrere physikalisch/chemische Modelle (Verbrennungsmodelle, Wärmestrahlung, Sprayverbrennung, Mehrphasenströmung, Brennstoffausbreitung und -verdunstung) entwickelt und auch unter realitätsnahen Bedingungen getestet. Die bisher geleisteten Arbeiten zur numerischen Simulation von Brennkammerströmungen wurden im DLR-Projekt "Brennkammer-Modellierung" (BKM) gebündelt (Noll, 1999).

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Laborexperimente zur Weiterentwicklung von vorhandenen Rußmodellen

Zweck der grundlagenorientierten Laborexperimente, die mit einer laminaren Coflame-Konfiguration durchgeführt werden, ist die Weiterentwicklung und Überprüfung des bei DLR-VT entwickelten Rußmodells. Die Versuchsparameter werden hierbei an den typischen Bedingungen von Flugtriebwerksbrennkammern ausgerichtet. Durch eine kontrollierte Einmischung von Luft hinter der Verbrennungszone der Flamme werden bislang nicht vorhandene Messungen zum in Brennkammern von Flugtriebwerken sehr wesentlichen Rußabbrand ermöglicht. Rußvolumenbrüche, Temperaturen, OH Konzentrationsverteilung und die Rußgrößenverteilung werden mit modernen, laseroptischen Methoden, CARS, einem TSI Particle Analyzer und einem höchstauflösenden Elektronenmikroskop bestimmt. Dabei werden auch Einflüsse des Drucks und der Brennstoffzusammensetzung berücksichtigt.

- M1: Versuche zur Russbildung abgeschlossen
- M2: Versuche zur Russoxidation abgeschlossen

Arbeitspaket 2: Experimente im Hochdruckkanal HBK-S

Ziel ist die Gewinnung von detaillierten Daten über die Entstehung und Emission von Rußpartikeln sowie atmosphären-relevanter, gasförmiger Substanzen unter Bedingungen, die repräsentativ für Flugtriebwerks-Brennkammern sind. Dazu werden in enger Kooperation mit EP1.3 detaillierte Messungen an einer triebwerkstypischen Versuchsbrennkammer durchgeführt werden, in der Kerosin in einer hochturbulenten, Mischungintensiven Dralldiffusionsflamme unter Drücken bis 40 bar und Brennkammer-Eintrittstemperaturen um 650°C verbrannt wird. Diese Untersuchungen mit besonderer Betonung des Einflusses der Turbulenz auf Verbrennung und Rußbildung sind von zentraler Bedeutung für die experimentelle Charakterisierung des Rußaerosols aus Flugtriebwerken und für die numerische Simulation von Verbrennung und Rußbildung in Flugtriebwerksbrennkammern.

- M3: Aufbau der Messstrecke beendet und Versuchsplanung durchgeführt
- M4: Messungen im Hochdruckkanal abgeschlossen

Arbeitspaket 3: Komponenten- und Triebwerksversuche mit Partnern aus der Industrie

In EP1.2 sind Messungen am Austritt von realen Brennkammern von Flugtriebwerken an einem Hochdruck-Prüfstand bei DLR-AT geplant. Hierzu werden in EP1.1 Rußmessungen durchgeführt, die der Bestimmung von Rußkonzentration und -größenverteilung am Austritt von realen Brennkammern dienen. Neben der in EP1.2 beabsichtigten Aufstellung von Korrelationen wird damit auch eine Überprüfung des verwendeten numerischen Programms unter realen Bedingungen ermöglicht. Neben den Komponentenversuchen sind auch Messungen der Rußkonzentrationen sowie der Abgaszusammensetzung an einem Triebwerk im Bodenprüfstand eines Triebwerksherstellers vorgesehen. Es sollen Messungen an einem Triebwerk durchgeführt werden, dessen Brennkammer auch in den Komponentenversuchen verwendet wird. Damit werden Rückschlüsse darauf gezogen, welche Veränderungen Rußpartikel in der Turbine erfahren.

- M5: Komponentenversuche abgeschlossen
- M6: Triebwerksversuche abgeschlossen

Arbeitspaket 4: Erstellung eines modularen Rußberechnungsmoduls

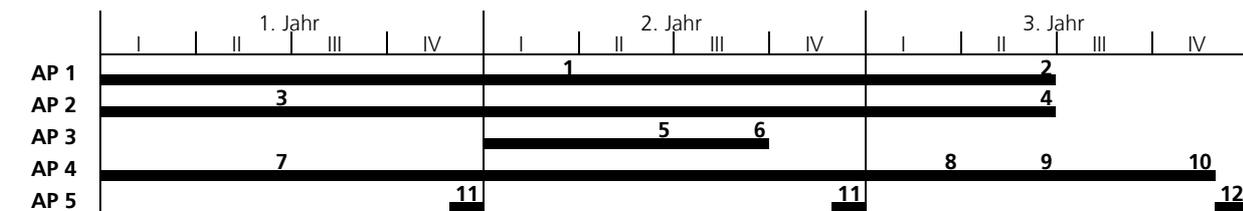
Da davon auszugehen ist, dass die Rückwirkungen des Rußes auf Strömung und Verbrennung in Brennkammern von Flugtriebwerken klein sind, kann die Simulation der Rußbildung einer 3D-Berechnung von Strömung und Verbrennung nachgeschaltet werden. Dies ermöglicht auch den Einsatz von komplexen Rußbildungsmodellen und aufwendigen Methoden zur Simulation der Turbulenz-Chemie-Interaktion. Das zu schaffende Post-processing-Programm zur Berechnung der Rußbildung wird möglichst eigenständig und modular aufgebaut, so dass eine Ankopplung an unterschiedliche Brennkammerberechnungscodes und damit auch eine Nutzung durch die Industrie möglich wird.

- M7: Vergleich von Rußmodellen und Parameteroptimierung fertig
- M8: Rußmodul zur Ankopplung an Strömungscodes erstellt
- M9: Gasphasenmechanismus (mit Schwefeloxidation) adaptiert
- M10: Rechnungen für reale Triebwerksbrennkammern durchgeführt

Arbeitspaket 5: Dokumentation

- M11: Zwischenbericht erstellt
- M12: Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 2 | 2 | 2 | 6 | 540 | 1740 |

Die Versuchseinrichtungen für die Laborexperimente sind in ihren wesentlichen Komponenten vorhanden und durch geringfügige Umbauten den hier gestellten Anforderungen anzupassen. Die messtechnische Ausrüstung in VT kann für die hier geplanten Untersuchungen genutzt werden.

Für die Hochdruckversuche im halbtechnischen Maßstab ist eine an Triebwerks-Brennkammern angelehnte Versuchsbrennkammer in der Hochdruckanlage HBK-S des DLR-Stuttgart zu untersuchen. Die Infrastruktur der Hochdruckanlage HBK-S (Kompressor, Druckbehälter, Luftvorwärmer, Ventile, Einspritzkühler und weitere Komponenten) im Wert von mehreren Millionen DM ist vorhanden und wird für die hier geplanten Versuche in Anspruch genommen. Die eigentliche Versuchsbrennkammer ist jedoch noch zu konstruieren, zu fertigen und zu instrumentieren. Die Versuchsbrennkammer wird voraussichtlich als gestufte Brennkammer mit einem Diffusionsbrenner ausgeführt werden. In Anlehnung an reale Flugtriebwerks-Brennkammern wird die Versuchsbrennkammer aus einem luftgekühlten Flammrohr und einem außenliegenden Druckgehäuse aufgebaut. Aufgrund der zu fordernden, dauerhaften Druckfestigkeit bei hohen Temperaturen müssen alle Teile der Versuchsbrennkammer aus einer Nickelbasislegierung gefertigt werden. Dies bringt sehr hohe Materialkosten und besonders auch außerordentlich hohe Fertigungskosten mit sich. Zur Messung von Druck und Temperatur sind an mehreren Positionen Druckmessbohrungen und Öffnungen zur Durchführung von Druckmesssonden sowie Thermolemente zur Wandtemperaturmessung vorzusehen. Zudem sind zur Kalibrierung der laseroptischen Verfahren auch Einlässe für

Kaltgase vorzusehen. Die Versuchsbrennkammer ist zudem für optoelektronische Messtechniken mit druckfesten Quarzfenstern sowie mit einer fest installierten Traversiereinrichtung auszurüsten.

Für den Bau und die Instrumentierung der Versuchsbrennkammer entstehen wie folgt Investitionskosten in Höhe von 540 TDM:

- Konstruktion, Festigkeitsberechnungen, TÜV-Abnahme: 90 TDM
- Materialkosten: 80 TDM
- Fertigungskosten: 160 TDM
- Fest installierte Entnahmesonden: 50 TDM
- Thermoelemente und Drucksensoren: 40 TDM
- Quarzfenster (mit Halterungen): 40 TDM
- Fest installierte Traversiereinrichtung: 80 TDM

Das Einzelprojekt wird ergänzt durch die Arbeiten im DLR-BKM Projekt. Eine weitere Ergänzung der Arbeiten in EP1.1 wird aus einem drittmittelfinanzierten Vorhaben im Rahmen des beantragten EU-Projekts CFD4C (Computational Fluid Dynamics For Combustion) erwartet.

Literatur²

Bockhorn, H. (Ed.), Soot formation in combustion – Mechanisms and Models, Springer, 1994.

Braun-Unkhoff, A. **Chrysostomou**, P. **Frank**, E. **Gutheil**, R. **Lückerath** and W. **Stricker**, Experimental and numerical study on soot formation in laminar high pressure flames, 27th Symp. (Intern.) on Combustion, 1998.

Bressloff, N.W., J.B. Moss and P.A. Rubini, CFD prediction of coupled radiation heat transfer and soot production in turbulent flames, 26th Symp. (Intern.) on Combustion, 2379-2386, 1996.

Frenklach, M., On surface growth mechanism of soot particles, 26th Symp. (Intern.) on Combustion, 2285-2293, 1996.

Frenklach, M. and Wang, H., Soot formation in combustion, Ed. H. Bockhorn, Springer Series in Chemical Physics 59, Springer, 1994, p. 162

Mauss, F. and H. Bockhorn, Soot formation in premixed hydrocarbon flames: Prediction of temperature and pressure dependence, *Zs. Phys. Chem.* **188**, 45-60, 1995.

Hu, D., M. **Braun-Unkhoff** and P. **Frank**, Modelling study on soot formation at high pressures, *Combust. Sci. Technol.*, im Druck, 1999.

Noll, B. Möglichkeiten und Grenzen der numerischen Beschreibung von Strömungen in hochbelasteten Brennräumen. Habilitationsschrift, Universität Karlsruhe, 1992.

Noll, B., Schwerpunkt Energietechnik, Projekt Brennkammermodellierung 1999-2001, Informationsschrift, 1999.

Stricker, W., M. **Woyde**, R. **Lückerath**, V. **Bergmann**, Temperature measurements in high pressure combustion, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **97**, 1608-1618, 1993.

Tan, Y. and **Frank**, P., A detailed comprehensive kinetic model for benzene oxidation using the recent kinetic results, 26th Symp. (Intern.) on Combustion, 677-684, 1996.

²Hier und bei den folgenden Projektbeschreibungen sind Autoren aus der Arbeitsgruppe des Antragstellers fett gedruckt.

4.1.2 Rußemissionen auf realen Flugmissionen

Fachkoordination Dr. H. Kruse, DLR-AT
Zuordnung TP1 - Rußemissionen und Aerosolvorläufergase

Ziele

Für aktuelle Flugzeug-Triebwerk-Kombinationen und Flugmissionen sollen Angaben über Rußemissionen nach Menge, Partikelanzahl, Größenverteilung und spezifischer Oberfläche bereitgestellt werden. Hierzu werden Beziehungen zwischen den Emissions- und Triebwerksparametern (in diesem Zusammenhang als „Korrelationen“ bezeichnet) erstellt, die sich zum Teil auf Analyseverfahren von EP1.1 und EP1.3 stützen. Die gemessenen und gerechneten Ergebnisse über Rußemissionen am Brennkammer- bzw. Triebwerksaustritt ergänzen die Messungen in TP2 in der Atmosphäre und werden als Eingabe für die Modellierungen in TP4 bereitgestellt.

Problemstellung

Angaben über Rußemissionen aus Triebwerken sind bisher fast ausschließlich aus den ICAO-Datenblättern verfügbar, die bei der Zulassung neuer Triebwerke nach standardisierten Verfahren aufgenommen werden. Dabei wird an einem Prototyp des Triebwerks in einem Bodenstandversuch bei verschiedenen Laststufen, die den Betrieb eines Flugzeuges im Flughafennahbereich repräsentieren, die Konzentration der Rauchgase anhand der Schwärzung eines Papierfilters bei vorgegebenem Abgasvolumen durch die sogenannte „Smoke number“ optisch charakterisiert. Die Smoke-Number-Werte werden in diesem Projekt auf Rußmassenemissionen umgerechnet.

Bisher gibt es keine zuverlässige Methode, um die Partikelgrößenverteilung als Funktion des Betriebszustandes eines Triebwerkes zu bestimmen. Aufgrund der wenigen Messungen der Partikelgrößenverteilungen in Höhenprüfständen bzw. im Reiseflug (Rickey, 1995; Howard et al., 1996; Petzold et al., 1999) können diese nur abgeschätzt werden. Systematische Untersuchungen über die Änderungen der Größenverteilung mit dem Lastzustand fehlen.

Methoden

Angaben über Rußemissionen werden aus den wenigen vorhandenen und aus neuen Messungen im Rahmen von PAZI bestimmt und mit den Triebwerksparametern anhand von Triebwerks- und Flugleistungsrechenverfahren in Beziehung gesetzt. Hierzu ist ein möglichst vollständiger Datensatz für reale Brennkammern bei repräsentativen Betriebszuständen notwendig. Solche Daten sollen hier im Komponentenversuch gemessen werden. Die neu ermittelten Daten bilden eine Grundlage zur Aufstellung der empirischen Korrelationen.

Die bei DLR-AT verfügbaren Anlagen erlauben die Durchführung von Messungen an realen Brennkammern bei Betriebszuständen, die den gesamten Einsatzbereich eines Luftfahrttriebwerks abdecken. Es sind Programme zur Berechnung der Triebwerksthermodynamik vorhanden, mit denen für charakteristische Flugzustände die Brennkammerparameter berechnet werden können, die dann im Versuch realisiert werden. Eine Brennkammer aktueller Technologie wird von Kooperationspartnern der Industrie zur Verfügung gestellt. DLR-AT adaptiert diese, misst alle Betriebsgrößen, führt standardisierte Rauchgasmessungen durch und schafft alle prüfstandsseitigen Voraussetzungen für die Rußmessungen in EP1.1 und EP1.3.

Nach Auswertung und Analyse der Ergebnisse bilden diese zusammen mit den aus anderen Quellen zur Verfügung stehenden Ergebnissen die Basis für die hier zu entwickelnden und zu verifizierenden Korrelationen zur Quantifizierung charakteristischer Ruß-Parameter. Mit Hilfe der so erarbeiteten Korrelationen, verfügbarer Daten für aktuelle Triebwerke und Flugzeuge sowie der vorhandenen Rechenprogramme für Triebwerks- und Flugleistungen können dann Tabellen mit Daten über die Rußemission von Flugzeugen der derzeitigen Flotte auf definierten Missionen erzeugt werden. Mit Verkehrs-Daten, wie Flottenzusammensetzung (Flugzeug- und Triebwerkstyp), Ladefaktor sowie Flugbewegungen (nach Strecke, Zeit und Höhe aufgeschlüsselt), die von der Flugverkehrsforschung (u.a. im DLR) bereitgestellt werden, können so globale Kataster der von der Luftfahrt verursachten Rußemissionen erzeugt werden.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Bei DLR-AT liegen zu diesem Thema umfangreiche Erfahrungen vor, u.a. aus der Bearbeitung eines Projektes im BMBF-Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“, aus der Mitwirkung am IPCC-Bericht sowie aus der Beteiligung an den EU-Projekten AERONOX, AEROTRACE und dem Netzwerk AERONET.

Detaillierte Rechenprogramme für die Triebwerksleistung von Triebwerksherstellern und kommerziell erwerbbar Programme erfüllen nicht die hier geforderte Flexibilität hinsichtlich der Nachrechnung („Auslegung“) existierender Triebwerke, da die erforderlichen Ausgangsdaten und die notwendigen Emissionskorrelationen nicht öffentlich zugänglich sind. Deshalb wurde bei DLR-AT dafür ein Rechenprogramm erstellt und validiert, welches eine rein thermodynamische Kreisprozessrechnung durchführt (Deidewig, 1998). Es hat sich gezeigt, dass die für Boden- und Flugbedingungen damit berechneten Parameter (z.B. Döpelheuer und Lecht, 1999) sehr gut mit Herstellerangaben übereinstimmen. Das Programm ermöglicht die Simulation aller heutigen Triebwerke und kann aufgrund seiner großen Flexibilität auch auf zukünftige Triebwerkskonzepte, wie Triebwerke mit Wärmetauschern oder mit sehr hohen Bypass-Verhältnissen angewendet werden. Das Modul zur Flugleistungsrechnung ist so ausgelegt, dass er ohne die Informationen auskommt, über die nur die Hersteller der Triebwerke verfügen.

Bei DLR-AT ist eine Rußmengen-Korrelation für Triebwerke erstellt worden, die die in Modellflammenversuchen gefundenen wichtigsten Einflussgrößen miteinander verknüpft und die sich auf in der Literatur zur Verfügung stehende Ergebnisse aus Boden-Standmessungen abstützt. Die in der Korrelation auftretenden Konstanten wurden an Ergebnisse von Brennkammerversuchen angepasst (Döpelheuer, 1997). Mit dieser Korrelation ist es möglich, aus zu messenden oder zu berechnenden triebwerksinternen Daten und Rußmessungen am Boden im Stand auf die Rußemission im Flug zu schließen. Für ein Triebwerk wurde gezeigt, dass die mit dieser Korrelation berechneten und die während eines Fluges gemessenen Daten gut übereinstimmen (Petzold et al., 1999).

Die Methode zur Bestimmung der Rußmengen wurde mit der Triebwerks- und Flugleistungsrechnung verknüpft, um so einzelne Flugmissionen detailliert nachzubilden. Die Ergebnisse wurden mit Rechnungen von Lufthansa und Swissair verglichen. Sowohl die Triebwerks- als auch die Flug-Daten aus den verschiedenen Rechnungen stimmen sehr gut überein. Das gilt nicht nur für die Brennstoffmenge und Flugzeit der Gesamtmission, sondern auch für den Brennstoffverbrauch, die Zeit und die Flugstrecke einzelner Abschnitte, wie z.B. der Flugstrecke bis zum Erreichen der Reiseflughöhe.

Ergebnisse von detaillierten Flugmissionsrechnungen und Untersuchungen zu Einflüssen der Reiseflughöhe und -geschwindigkeit, des Startgewichts, der Position des Stepclimbs, der Umgebungstemperatur oder des Nutzlastfaktors sind in Döpelheuer und Lecht (1999) veröffentlicht. Das Verfahren wurde mit einer Verkehrsdatenbank der DLR-Verkehrsforschung zu einem mittlerweile international verwendeten ersten globalen Kataster der von Luftfahrzeugen emittierten Rußmenge kombiniert (Döpelheuer, 1997).

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Messungen an realen Brennkammern

Auf den Anlagen von DLR-AT können zweidimensionale Brennkammersegmente (mit realem radialen Aufbau und bei Drücken bis 20 bar) mit laseroptischen Messverfahren vermessen werden. Es können auch volle oder segmentierte Brennkammern bei Drücken bis 40 bar mit konventioneller Messtechnik vermessen werden. In beiden Fällen sind Probenentnahmen mittels Sonden über beheizte Leitungen möglich. Welcher Versuchsbetrieb gewählt wird, hängt von der vom Industriepartner zur Verfügung gestellten Brennkammer ab.

- M1: Charakteristische Betriebspunkte der Triebwerke ausgewählt
- M2: Messkampagne mit Industriepartner abgeschlossen

Arbeitspaket 2: Auswertung und Analyse der Brennkammermessungen

- M3: Datensätze aus den Brennkammermessungen bereitgestellt (mit TP1.1)

Arbeitspaket 3: Korrelationsanalyse charakteristischer Rußparameter

Die Rußmenge, die Partikelgrößenverteilung und eine Abschätzungen der Oberfläche der Partikel werden mit Brennkammer- und Triebwerksparameter in Beziehung gesetzt. Die Rußmengen werden mit Hilfe einer experimentell gewonnenen Beziehung zwischen Rußkonzentration [g/m^3] und Smoke-Number aus den gemessenen Smoke-Number-Werten ermittelt. Hieraus kann letztlich ein Rußemissionsindex $E_{\text{Ruß}}$ (Masse Ruß je Masse Brennstoffs in [$\text{g}/\text{kg}_{\text{Brennst.}}$]) berechnet werden. Die aus der Literatur verfügbaren Daten werden um die Messdaten aus EP1.1 ergänzt. Die Partikeloberflächen werden in EP1.1 mit einem Elektronenmikroskop aus Filterproben bestimmt. Das Verhältnis der realen unregelmäßigen Oberfläche der Partikel zu der einer repräsentativen Kugel wird mit dem Partikeldurchmesser aus Messungen des Scanning-Mobility-Particle Sizer (SMPS) in Beziehung gesetzt.

- M4: Abgeleitete Rußpartikeleigenschaften zur Modellierung bereitgestellt

Arbeitspaket 4: Rußemissionen der derzeitigen Flotte auf definierten Missionen

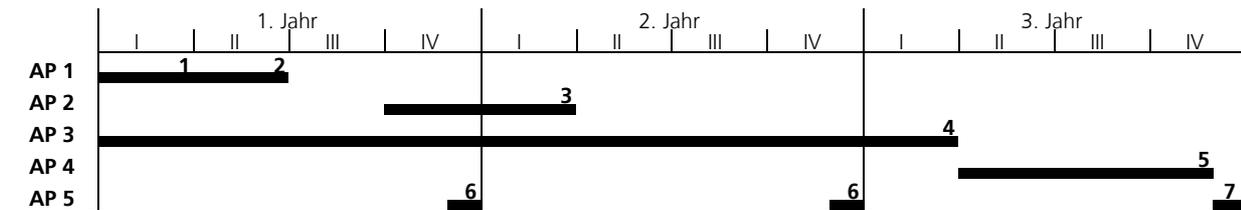
Die globale Luftfahrtflotte wird durch eine Reihe von typischen Triebwerks-/Flugzeug-Kombinationen approximiert. Jeder Kombination werden charakteristische Flugmissionen zugeordnet. Zu jeder Teilstrecke dieser Missionen werden die Flugzeug- und Triebwerksparameter berechnet. Anhand der zuvor ermittelten Korrelationen werden die Parameter der Rußemissionen (Masse, Zahl, Größe) berechnet und in Tabellen als Funktion des Flugabschnitts und der Flughöhe abgelegt. Aus diesen Tabellen können die Emissionen in einem weiteren Schritt global orts-, höhen- und zeitabhängig berechnet werden. Dazu müssen die Daten mit Angaben über die geflogenen Flugverbindungen mit den diversen Flugzeugtypen ergänzt werden. Dieser letzte Schritt soll in Zusammenarbeit mit Partnern außerhalb dieses Projekts erfolgen.

- M5: Emissionsdatensätze in Tabellen für heutige Flotte fertig

Arbeitspaket 5: Berichtslegung

- M6: Zwischenbericht fertig
- M7: Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 600 |

Die Arbeitspakete 1 bis 5 erfordern 2,5, 6, 18, 7 und 2,5 Mannmonaten von mit der Thematik und den Methoden vertrauten Mitarbeitern (Versuchsbetrieb und Korrelationsanalyse).

Ergänzende Grundfinanzierung: Fachliche Ergänzung durch die EU-Projekte NEPAIR (0,7 PJ), PARTEMIS (0,6 PJ) und CYPRESS (0,4 PJ). (Die Angaben sind 50% Personal-Anteil über 3 Jahre). Die Aufwendungen für Brennkammersversuche sind:

- Bereitstellung einer Brennkammer und Rig:
Beitrag des Kooperationspartners aus der Industrie
- Adaption des Rigs an der Versuchsanlage und Betrieb (Energiekosten):
Sekundärkostenbudget von AT bzw. Abteilung Technische Dienste (Druckluft und Aufheizung)

Literatur

- Döpelheuer**, A., Berechnung der Produkte unvollständiger Verbrennung aus Luftfahrttriebwerken, *IB-325-09-97*, DLR, Institut für Antriebstechnik, 1997.
- Döpelheuer**, A. and H. **Kruse**, Measurement of trace species in the exhaust of aero engines, task 6: Sensitivity analysis; EC-Project AEROTRACE, 1997.
- Döpelheuer**, A. and M. **Lecht**, Influence of engine performance on emission characteristics, RTO-MP-14, pp. 20-1 to 20-11, Neuilly-sur-Seine Cedex, June 1999.
- Deidewig**, F., Ermittlung der Schadstoffemissionen im Unter- und Überschallflug, Institut für Antriebstechnik, DLR Forschungsbericht 98-10, 1998.
- Howard, R.P., J.C. Wormhoudt, P.D. Whitefield, Experimental characterization of gas turbine emissions at simulated flight altitude conditions, *AEDC-TR-96-3*, 1996.
- Petzold, A., A. **Döpelheuer**, C.A. Brock, F.P. Schröder, In situ measurements and prediction of black carbon emission properties of aircraft at cruise altitude, *J. Geophys. Res.* **104**, 22171-22181, 1999.
- Rickey, J.E., The effect of altitude conditions on the particle emissions of a J85-GE-5L turbojet engine, *NASA-TM-106669*, 1995.

4.1.3 Spektrale Rußcharakterisierung

Fachkoordination Dr. A. Petzold, DLR-PA
Zuordnung TP1 – Rußemissionen und Aerosolvorläufergase

Ziele

Ziel des Einzelprojektes ist es, wesentliche mikrophysikalische und chemische Parameter des Rußaerosols zu messen, das aus einer Gasturbine emittiert wird. EP1.3 ist eng mit EP1.1 von DLR-VT und EP1.2 von DLR-AT zur Untersuchung der Rußbildung in Gasturbinen verknüpft. Eine unmittelbare Beziehung besteht auch zu den Studien an der Aerosolkammer AIDA (EP2.1) des FZK und zu den geplanten Einzelpartikelanalysen (EP2.4) durch das FZJ.

Problemstellung

Bisherige Ergebnisse zur Charakterisierung des Rußaerosols aus Flugzeugtriebwerken unter Reiseflugbedingungen zeigen, dass die Größenverteilung bimodal ist mit einer Mode im Bereich 0.025-0.06 µm Durchmesser und einer zweiten Mode bei 0.15-0.2 µm Durchmesser (Hagen et al. 1996; 1998; Petzold et al. 1998; 1999a,b). Die Massenemissionsindizes variieren zwischen 0.01 g kg⁻¹ und 0.1 g kg⁻¹, abhängig davon, um welchen Triebwerkstyp es sich handelt, die Anzahlemissionsindizes liegen bei 10¹⁵ kg⁻¹ (Petzold and Döpelheuer, 1998; Anderson et al. 1998a; Petzold et al. 1999b). Mit größeren Unsicherheiten ist der derzeitige Kenntnisstand zur Bildung neuer Partikeln im abkühlenden Abgasstrahl aus gasförmigen Vorläufern behaftet. Deren Anzahlemissionsindizes liegen um 10¹⁷ kg⁻¹ (Schumann et al. 1996; Schröder et al. 1998, Anderson et al., 1998b; Kärcher, 1999). Die unter Reiseflugbedingungen ermittelten Werte wurden zum Teil auch bei Messungen an Triebwerkstestständen ermittelt (Howard et al. 1996; Wey et al. 1998). Es handelt sich bei allen hier angeführten Arbeiten um Studien, bei denen schon aufgrund der Struktur keine systematische Untersuchungen zum Einfluss des Betriebszustands des Triebwerks auf die Schadstoffbildung durchgeführt werden konnten.

Lediglich bei der jüngsten Arbeit von Petzold et al. (1999b) konnte das empirische Rußmodell von DLR-AT, basierend auf einer Korrelationsmethode, verifiziert werden, so dass nun eine validierte Methode zur Verfügung steht, mit der Rußmassenemissionen aus Jet-Turbinen bei vorgegebenen Betriebsbedingungen vorhergesagt werden können. Diese Methode bedarf jedoch noch einer wesentlichen Verfeinerung, was auch Aufgabe von EP1.3 ist. Weitgehend offen ist die Frage, wie die Rußbildung selbst abläuft (EP1.1). Die oben genannte Korrelationsmethode (EP1.2) ist ein semi-empirisches Verfahren und macht keinerlei Annahmen über die zugrundeliegenden Bildungsprozesse. Daher erlaubt die Korrelationsmethode auch keine Aussage über die Anzahlkonzentration und die Größenverteilung des gebildeten Rußaerosols. Offen ist auch, welchen Einfluss der Betriebszustand des Triebwerks auf die Bildung oxidierter Schwefelkomponenten und kondensierbarer organischer Substanzen haben. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

Methoden

Die zur Untersuchung der dargelegten Problemstellung verwendete Messtechnik ergänzt die in EP 1.1 beschriebenen Methoden dahingehend, dass neben der Standard-Aerosol-instrumentierung zur Erfassung der Rußpartikelgrößenverteilung mit einem DMPS-System und der Partikelmorphologie durch Filterprobenahme und Rasterelektronenmikroskopie eine größenauflösende Bestimmung der chemischen Natur der Partikeln beigesteuert werden soll. Da-

zu wird mit Hilfe eines DMA eine Größenklasse des Aerosols abgetrennt und anschließend vermessen. Informationen über die chemische Natur der abgetrennten Größenklasse werden aus der thermischen Stabilität der Partikeln dadurch abgeleitet, dass die Partikeln vor der eigentlichen Messung thermisch vorkonditioniert werden. Je nach Aufheizungsgrad der Aerosolprobe kann zwischen schwarzem Kohlenstoff, der auch über 350°C noch stabil ist, und verschiedenen flüchtigen organischen Komponenten, die thermisch bis 250°C und bis 350°C stabil sind, unterschieden werden. Zusätzlich soll der Gehalt an schwarzem Kohlenstoff optisch durch ein Rußabsorptionsphotometer bestimmt werden. Es wird erwartet, dass der Anteil der flüchtigen organischen Komponenten am Verbrennungsaerosol von der gewählten Größenklasse und von den Verbrennungsbedingungen abhängt. Detaillierte Informationen darüber liegen bisher jedoch für eine Brennkammer oder Gasturbine nicht vor.

Alle hier zum Einsatz kommenden Verfahren wurden bereits zur Charakterisierung des Abgasaerosols aus einem Flugzeugtriebwerk unter Reiseflugbedingungen benutzt (Petzold et al., 1999b). Die Anwendung derselben Methoden auf Brennkammer- und Prüfstands-messungen soll die Anbindung der im Rahmen von PAZI erarbeiteten Resultate an Ergebnisse von Messungen unter Reiseflugbedingungen gewährleisten. Die einzusetzende Messtechnik ist in der Tabelle im Haupttext im Überblick dargestellt.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Der Fachkoordinator arbeitet seit 1990 auf dem Bereich der Rußmesstechnik und konzentriert sich seit 1996 auf den Spezialfall der Rußemissionen des Luftverkehrs. Seine wissenschaftlichen Arbeiten sind in der Fachliteratur ausführlich dokumentiert. Zudem ist DLR-PA wesentlich an den internationalen Arbeiten zur Charakterisierung der Partikelemissionen aus Flugzeugtriebwerken und deren Einfluss auf die Bildung von Kondensstreifen und Zirren beteiligt. Während dieser Arbeiten konnte ein Aerosolmesssystem aufgebaut werden, welches das gesamte in Frage kommende Partikelspektrum abdeckt. Die durchgeführten Arbeiten decken die Bereiche der Rußemission, Partikelneubildung im expandierenden Abgasstrahl und der Bildung von Kondensstreifen ab.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Aufbau und Test des Messsystems

Das Messinstrumentarium wird für den Einsatz an Testständen umgebaut und vorbereitet. Darin eingeschlossen sind weitreichende Gerätemodifikationen, da die Rahmenbedingungen bei flugzeug-getragenen Messungen wesentlich anders sind als bei Messungen an einer Brennkammer oder einem Teststand. Wesentliche technische Schwierigkeiten sind hier nicht zu erwarten, da ein Teil der Messgeräte bereits bei Studien im Triebwerksabgas bei Bodentests eingesetzt wurde (Petzold et al. 1998). Das Messsystem selbst repräsentiert den aktuellen Stand der Messtechnik auf diesem Gebiet. Als Abschluss der Aufbauphase ist ein Test des Instrumentariums im Rahmen einer Brennkammermessung geplant.

- M1: Testmessungen am Prüfstand durchgeführt

Arbeitspaket 2: Messungen an einer Brennkammer und an einem Teststand

Das Arbeitspaket 2 ist eng an die Messaktivitäten des EP1.1 angekoppelt, da alle Messaktivitäten im gesamten Arbeitspaket 1 miteinander verknüpft sind. Eine erste Auswertung der Messdaten ist Teil dieses Arbeitspakets.

- M2: Brennkammer- bzw. Teststandmessungen ausgewertet

Arbeitspaket 3: Datenanalyse

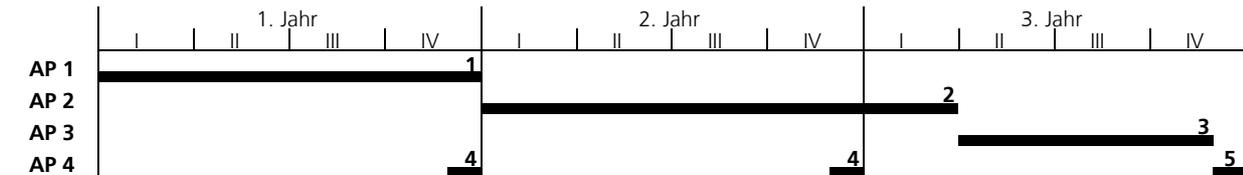
Schwerpunkte sind die weiterführende Datenanalyse sowie die Synthese aus den Beobachtungen und der Modellierung und Korrelationsanalyse der Emissionsparameter.

- M3: Gemessene Rußparameter mit Modellresultaten und Korrelationsanalysen verglichen

Arbeitspaket 4: Dokumentation

- M4: Zwischenbericht angefertigt
- M5: Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|---|-----|--------|------------------|------------|
| PJ | 0.5 | 1 | 0.5 | 2 | 0 | 400 |

EP1.3 steht thematisch und instrumentell in enger Verbindung mit dem EU-Projekt PARTEMIS („Measurement and prediction of emissions of aerosols and gaseous precursors from gas turbine engines“), das unter der Koordination von DERA Pyestock in Kooperation mit 11 europäischen Partnern durchgeführt wird.

PARTEMIS konzentriert sich auf die Untersuchung des in einer Gasturbine gebildeten Aerosols vom Brennkammerausgang stromabwärts, insbesondere hinsichtlich seiner atmosphärischen Wirksamkeit. Dabei wird ein mit PAZI TP1vergleichbares Messinstrumentarium eingesetzt. Der Ansatz von PARTEMIS umfaßt neben der Rußkomponente auch die Messung von Aerosolvorläufergasen, um zusätzlich das Bildungspotential für flüchtige Partikel im Abgasstrahl einer Turbine zu untersuchen. Im Gegensatz zu PAZI schließt PARTEMIS jedoch Detailstudien zur Rußbildung und insbesondere zur Verbesserung der Rußmodelle aus.

Der Personalbedarf in Personenmonaten (PM) für die einzelnen Arbeitspakete beläuft sich auf 5 PM für Arbeitspaket 1, 12 PM für Arbeitspaket 2, 4 PM für Arbeitspaket 3 und 3 PM für Arbeitspaket 4. Die Arbeiten müssen von einer Person durchgeführt werden, die sich kontinuierlich mit dieser Materie befaßt, da andernfalls eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens nicht sichergestellt werden kann.

Literatur

- Anderson, B.E., W.R. Cofer, D.R. Bagwell, J.W. Barrick, C.H. Hudgins, and K.E. Brunke, Airborne observations of aircraft aerosol emissions I: Total nonvolatile particle emission indices, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1689-1692, 1998a.
- Anderson, B.E., W.R. Cofer, D.R. Bagwell, J.W. Barrick, and C.H. Hudgins, Airborne observations of aircraft aerosol emissions II: Factors controlling volatile particle production, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1693-1696, 1998b.
- Hagen, D.E., P.D. Whitefield and H. **Schlager**, Particle emissions in the exhaust plume from commercial jet aircraft under cruise conditions, *J. Geophys. Res.* **101**, 19,551-19,557, 1996.
- Hagen, D.E., P.D. Whitefield, J. Paladino, M. Trueblood, and H. Lilienfeld, Particle sizing and emission indices for a jet engine exhaust sampled at cruise, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1681-1684, 1998.

- Howard, R.P., R.S. Hiers, P.D. Whitefield, D.E. Hagen, J.C. Wormhoudt, R.C. Miake-Lye, and R. Strange, *Experimental Characterization of Gas Turbine Emissions at Simulated Flight Altitude Conditions*, Arnold Engineering Development Center, Technical Report AEDC-TR-96-3, 1996.
- Kärcher**, B., 1999: Aviation-produced aerosols and contrails. *Surv. Geophys.* **20**, 113-167.
- Petzold**, A. and F.P. **Schröder**, Jet Engine Aerosol Characterization, *Aerosol Sci. Technol.* **28**, 62-76, 1998.
- Petzold**, A. and A. Döpelheuer, Reexamination of Black Carbon Mass Emission Indices of a Jet Engine, *Aerosol Sci. Technol.* **29**, 355 – 356, 1998.
- Petzold**, A., J. Ström, F.P. **Schröder**, and B. **Kärcher**, Carbonaceous aerosol in jet engine exhaust: emission characteristics and implications for heterogeneous chemistry, *Atmos. Environ.* **33**, 2689-2698, 1999a.
- Petzold**, A., A. Döpelheuer, C.A. Brock, and F.P. **Schröder**, In situ observations and model calculations of black carbon emission by aircraft at cruise altitude, *J. Geophys. Res.* **104**, 22171-22181, 1999b.
- Schröder**, F.P., B. **Kärcher**, A. **Petzold**, R. **Baumann**, R. **Busen**, C. **Hoell**, and U. **Schumann**, Ultra-fine aerosol particles in aircraft plumes: In situ observations, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2789-2792, 1998.
- Schumann** U., J. Ström, R. **Busen**, R. **Baumann**, K. **Gierens**, M. **Krautstrunk**, F.P. **Schröder** and J. **Stingl**, In situ observation of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels, *J. Geophys. Res.* **101**, 6853 – 6869, 1996.
- Wey, C.C., et al., Engine Gaseous, Aerosol Precursors and Particulate at Simulated Flight Altitude Conditions, NASA Lewis Research Center, TM-1998-208509, 1998.

4.2 *Eisbildung in der Atmosphäre*

4.2.1 *Gefriermessungen in der Aerosol-Wolkenkammer AIDA*

Fachkoordination Dr. O. Möhler, FZK-IMK
Zuordnung TP2 – Eisbildung in der Atmosphäre

Ziele

Ziel ist es, in systematischen Experimenten unter simulierten Bedingungen der Tropopause eisbildende Eigenschaften relevanter Aerosolpartikel (z.B. Rußpartikel, Mischpartikel aus Ruß und Schwefelsäure) in einer großen Aerosol/Wolkenkammer zu untersuchen. Dabei geht es auch um die Frage, inwieweit Alterungsvorgänge am Aerosol (z.B. Oberflächenoxidation, Bildung von Oberflächenschichten) die Eisnukleation beeinflussen. Ferner werden klimarelevante optische Partikeleigenschaften gemessen. Die Kammermessungen orientieren sich an Ergebnissen zur Rußcharakterisierung (TP1) sowie zur Aerosol- und Zirrencharakterisierung (TP2 und TP3). Die Interpretation der Experimente wird in enger Zusammenarbeit mit EP4.1 durchgeführt. Die Ergebnisse fließen in die wolkenauflösende Modellierungen (EP4.2) und in die globale Modellierung (EP4.3) ein.

Problemstellung

Während bei der Entstehung von Kondensstreifen lokal hohe Eis- und Wasserdampf-Übersättigungen auftreten, bilden sich Zirren bei geringeren Abkühlraten und Übersättigungen. Zur Zirrenbildung können daher auch Partikel beitragen, die schon bei geringer Eisübersättigung, dafür aber viel langsamer aktiviert werden. Der Mangel an In-situ-Messungen im Bereich der Tropopause erlaubt es derzeit nicht, wichtige mikrophysikalische Eigenschaften der dort auftretenden, optisch dünnen Zirren und ihrer Aerosolvorläufer hinreichend einzugrenzen (Kärcher und Solomon, 1999). Dieses Wissen ist aber nötig zur Entwicklung und Verifikation prognosefähiger Modelle der Bildung und Klimawirkung von Zirren.

Im Bereich der Tropopause und im Nachlauf von Flugzeugen wurden flüssiges Schwefelsäure-Aerosol und Rußpartikel nachgewiesen (z.B. Blake and Kato, 1995; Schumann et al., 1996; Pueschel et al., 1998; Curtius et al., 1998). Deshalb soll zunächst die heterogene Eisnukleation an reinen Rußpartikeln untersucht werden. Später werden dann, den massenspektrometrischen Partikelanalysen in EP2.4 folgend, weitere Partikelarten untersucht.

Von FZK-IMK wurde gezeigt, dass sich die Oberfläche von luftgetragenen Rußpartikeln bei Einwirkung von Ozon im Laufe etwa eines Tages verändert (Kamm et al., 1999) und damit möglicherweise auch ihre eiskeimbildenden Eigenschaften. In der AIDA-Kammer können solche langsamen Änderungen gut untersucht werden. Es gibt starke Hinweise darauf, dass hydrophobe Rußpartikel im Nachlauf von Flugzeugen mit Schwefelsäure benetzt und dadurch hydrophil werden (Hagen et al., 1992; Petzold and Schröder, 1998; Kärcher et al., 1998). Erste Laborstudien zu Gefriereigenschaften von benetztem Ruß wurden von DeMott et al. (1999) vorgestellt. Ein quantitativer Nachweis, in wieweit der Vermischungsgrad von Rußpartikeln mit Schwefelsäure oder anderen löslichen Substanzen deren Fähigkeit zur heterogenen Eisnukleation beeinflusst, ist bisher noch nicht gelungen, weil sich die sehr kleinen Rußpartikel den angewandten Detektions- und Analysenverfahren entziehen. Auch dieser Aspekt wird in der AIDA-Kammer untersucht.

Methoden

Alle Untersuchungen werden in der bis 1 Pa evakuierbaren und gleichmäßig kühlbaren Aerosol- und Wolkenkammer AIDA (Volumen von 84,3 m³) des FZK-IMK (Bunz et al., 1996; Möhler et al., 1999) durchgeführt. Sie befindet sich in einer Klimakammer, in der Temperaturen bis etwa -90°C (Möhler et al., 1999) eingestellt werden können. Durch kontrolliertes Pumpen kann die befeuchtete Kammerluft unter die (konstante) Wandtemperatur abgekühlt werden, wodurch sich lang andauernde Eis- und Wasserdampfübersättigungen erreichen lassen. Damit kann die Bildung von Wasser- und Eiswolken sowie die Prozessierung von Aerosolpartikeln unter realitätsnahen Bedingungen studiert werden. Die Untersuchungen werden von Prozessmodellierungen begleitet, die in Zusammenarbeit mit EP4.1 erfolgen.

Der Nachweis des Gefrierens und des Partikelwachstums erfolgt durch Intensitäts- und Depolarisationsmessungen von Laserstreulicht, das aus 2 cm³ Streuvolumen im Zentrum der Kammer in Vor- und Rückwärtsrichtung detektiert wird. Zur gezielten Probenahme und Analyse aktivierter Eiskeime soll speziell für die Aerosolkammer AIDA ein Gegenstromimpaktor vom Institut für Troposphärenforschung (IfT) in Leipzig entwickelt werden (AFO2000-Projekt, beantragt). Für die Messung optischer Partikeleigenschaften stehen folgende Geräte zur Verfügung: (1) ein Fourier-Transform-Infrarot- (FTIR) Spektrometer mit In-situ-White-Zelle, (2) eine 5 m lange Durchflusszelle zur Messung der Extinktionsspektren 200-1100 nm von Aerosolen bei Kammertemperatur, sowie (3) ein 3-Farben-Nephelometer für Streulichtmessungen und (4) eine externe White-Zelle für Extinktionsmessungen des abgetrockneten Aerosols. Mit einem Frostpunkthygrometer können Feuchten bis etwa -90°C Frostpunkt gemessen werden, unterhalb etwa -70°C allerdings mit Ansprechzeiten um 10-30 min. Bei der jüngsten AIDA-Messkampagne wurde gute Übereinstimmung mit dem Lyman- α -Hygrometer FISH (Nachweisgrenze etwa 0.1 ppm bei 1 s Zeitauflösung) des FZJ erzielt, welches auch bei den Flugzeugmessungen (EP2.4 und EP2.2) eingesetzt wird. Partikelkonzentrationen und Größenverteilungen werden mit Kondensationskernzählern und einem differentiellen Mobilitätsanalysator gemessen, die Analyse löslicher Komponenten erfolgt durch ionenchromatographische Analyse von Filterproben. Die Partikelstruktur wird in Zusammenarbeit mit TP1 elektronenmikroskopisch untersucht.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Die AIDA-Aerosolkammer des FZK-IMK ist eine weltweit einzigartige Versuchsanlage für Experimente unter simulierten Bedingungen der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. In bislang vier gemeinsamen Messkampagnen mit dem MPI für Kernphysik hat sich die Kammer im Betrieb unter stratosphärischen Bedingungen bewährt, wobei das Verfahren des adiabatischen Volumenköhlens in einem weiten T-p-Bereich erfolgreich angewandt wurde. Dabei kamen die oben beschriebenen Verfahren zum Nachweis der Eisbildung und zur Messung optischer Partikeleigenschaften zum Einsatz. Daher bestehen sehr gute Erfolgsaussichten für die hier beschriebenen Experimente. Der Fachkoordinator verfügt über langjährige Erfahrung in der Atmosphärenforschung (siehe z.B. Möhler and Arnold, 1992; Möhler et al., 1993; Kamm et al., 1999; Möhler et al., 1999; Reiner et al., 1999). Er leitet ein engagiertes Team von Mitarbeitern mit fundierten Fachkenntnissen und größtenteils langjähriger wissenschaftlicher Erfahrung.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Eisexperimente mit reinen Rußaerosolen

Nach Abschluss von Vorarbeiten wird das Eisbildungspotential verschiedener reiner Rußaerosole studiert („Modellruß“ aus einem Funkengenerator, Dieselruß, Verbrennungsruß). Parameter sind die Temperatur und die Übersättigung. Die Morphologie der Partikel wird mit Partikeln aus Flugzeugtriebwerken verglichen. Die Oberflächenbeschaffenheit und hygroskopischen Eigenschaften werden auch im Rahmen laufender / beantragter Projekte untersucht (AFS/BMBF, 5. Rahmenprogramm der EU, AFO2000 des BMBF).

- M1: Vorarbeiten und Aufbau des Kerosinbrenners abgeschlossen
- M2: Eisnukleations-Eigenschaften von Rußpartikeln für die Modellierung bereitgestellt
- M3: Morphologien von Modellrußen und Flugzeugruß verglichen

Arbeitspaket 2: Alterungseffekte

Untersucht wird der Einfluss mehrtägiger Alterungsprozesse auf die heterogene Eisnukleation durch Rußpartikel: Oberflächen-Oxidation, Bildung von Ruß-/Sulfat-Mischaerosolen, Benetzung der Rußpartikel mit Schwefelsäure.

- M4: Eisnukleations-Eigenschaften gealterter Mischaerosole für die Modellierung bereitgestellt

Arbeitspaket 3: Weiterführende Experimente

Je nach Ergebnislage der Feldmessungen sollen weitere relevante Aerosolkomponenten untersucht werden. Experimente mit mineralischen Aerosolen sind geplant.

- M5: Eisnukleations-Eigenschaften weiterer relevanter Aerosolkomponenten gemessen

Arbeitspaket 4: Optische Partikeleigenschaften

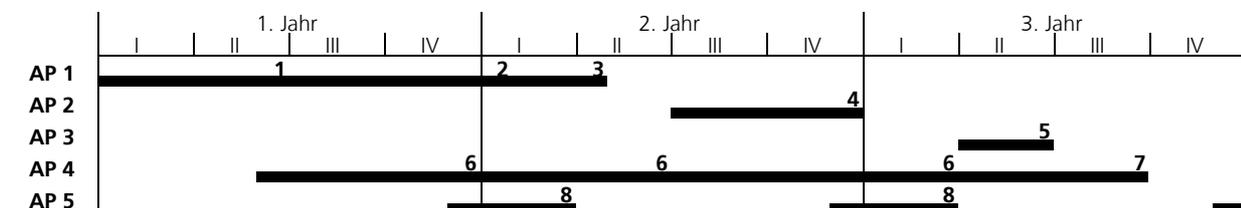
Bei allen Experimenten werden klimarelevante optische Eigenschaften der Aerosole routinemäßig mitgemessen. Durch die Depolarisations-Messungen wird ein Bezug zu den Lidar-Messungen in TP2 hergestellt.

- M6: Optische Aerosoldaten für Modellierung bereitgestellt
- M7: Optische Messungen abschließend bewertet

Arbeitspaket 5: Arbeitstreffen, Berichte

- M8: Zwischenbericht (Erstellung nach vorbereitenden Arbeitstreffen) geliefert
- M9: Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



Teile des Zeitplans stehen unter dem Vorbehalt von Änderungen im Falle der Bewilligung von AFO2000-Projekten.

Da der Fachkoordinator nicht zu den Antragstellern für den Strategiefonds zählt, werden die Arbeiten in Kooperation mit den PAZI-Partnern im Rahmen eines F&E-Vorhabens des IMK sowie unterstützt durch laufende und beantragte BMBF- und EU-Projekte durchgeführt.

Literatur

- Blake, D. F. and K. Kato, Latitudinal distribution of black carbon soot in the upper troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res.* **100**, 7195-7202, 1995.
- Bunz, H., O. Möhler, K.-H. Naumann, H. Saathoff, W. Schöck** and U. **Schurath**, The novel aerosol chamber facility AIDA: status and first results. In *Proc. 7th Symp. Physico-chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants* (Eds.: B. Larsen, B. Versino and G. Angeletti) EUR 17482, 673-677, 1996.
- Curtius, J., B. Sierau, F. Arnold, R. Baumann, R. Busen, P. Schulte and U. Schumann: First sulfuric acid detection in the exhaust plume of a jet aircraft inflight. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 923-926, 1998.
- DeMott, P.J., Y. Chen, S.M. Kreidenweis, D.C. Rogers, and D.E. Sherman, Ice formation by black carbon particles. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2429-2432, 1999.
- Hagen, D.E., M.B. Trueblood, and P.D. Whitefield, A field sampling of jet exhaust aerosols. *Part. Sci. Technol.* **10**, 53-63, 1992.
- Kamm, S., O. Möhler, K.-H. Naumann, H. Saathoff**, and U. **Schurath**, The heterogeneous reaction of ozone with soot aerosol. *Atmos. Env.* **33**, 4651-4661, 1999.
- Kärcher, B., R. Busen, A. Petzold, F.P. Schröder, U. Schumann, and E.J. Jensen, Physico-chemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles. 2. Comparison with observations and sensitivity studies, *J. Geophys. Res.* **103**, 17129-17148, 1998.
- Kärcher, B. and S. Solomon, On the composition and optical extinction of particles in the tropopause region. *J. Geophys. Res.* **104**, 27441-27459, 1999.
- Möhler, O.** and F. Arnold, Gaseous sulfuric acid and sulfur dioxide measurements in the arctic troposphere and lower stratosphere: implications for hydroxyl radical abundances, *Geophys. Res. Lett.* **19**, 1763-1766, 1992.
- Möhler, O., T. Reiner**, and F. Arnold, A novel aircraft-based tandem mass spectrometer for atmospheric ion and trace gas measurements, *Rev. Sci. Instr.* **64**, 1199-1207, 1993.
- Reiner, T., O. **Möhler**, and F. Arnold, Measurements of acetone, acetic acid, and formic acid in the northern midlatitude upper troposphere and lower stratosphere, *J. Geophys. Res.* **104**, 13943-13949, 1999.
- Möhler, O., H. Bunz, H. Saathoff, S. Schäfer, M. Seifert, R. Tiede, U. Schurath, D. Knopf, J. Schreiner, Ch. Voigt, P. Zink**, and K. Mauersberger, The potential of the AIDA aerosol chamber for investigating PSC formation and freezing mechanisms, In: *Proc. of the European Workshop on Mesoscale Processes in the Stratosphere* (Eds.: K. S. Carslaw and G. T. Amanatidis), EUR 18912, 171-174, 1999.
- Petzold, A. and F.P. Schröder, Jet engine exhaust aerosol characterization. *Aerosol Sci. Technol.* **28**, 62-76, 1998.
- Pueschel, R. F., S. Verma, G.V. Ferry, S.D. Howard, S. Vay, S.A. Kinne, J. Goodman, and A. W. Strawa, Sulfuric acid and soot particle formation in aircraft exhaust. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1685-1688, 1998.
- Schumann, U., J. Ström, R. Busen, R. Baumann, K. Gierens, M. Krautstrunk, F.P. Schröder, and J. Stingl, In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels. *J. Geophys. Res.* **101**, 6853-6869, 1996.
- Zink, P., D. Knopf, J. Schreiner, Ch. Voigt, K. Mauersberger, H. **Bunz, O. Möhler, H. Saathoff, M. Seifert, R. Tiede**, and U. **Schurath**, Growth of aerosol particles under stratospheric conditions – experiments inside the AIDA aerosol chamber, In: *Proc. of the European Workshop on Mesoscale Processes in the Stratosphere* (Eds.: K. S. Carslaw and G. T. Amanatidis), EUR 18912, 281-284, 1999.

4.2.2 Partikelmessungen in Kondensstreifen und Zirren

Fachkoordination Dr. R. Busen, DLR-PA
Zuordnung TP2 – Eisbildung in der Atmosphäre

Ziele

- Messung der Anzahldichte und Zusammensetzung des Aerosols im Größenbereich von Nanometern bis mehrere Mikrometer im Nachlauf und in der Umgebung von Flugzeugen.
- Messung der zeitlichen Entwicklung des Aerosols und der sich bildenden Kondensstreifen und Zirruswolken als Funktion der Umgebungsbedingungen, insbesondere der Feuchte.

Die In-situ-Messungen in der Atmosphäre bilden eine Grundlage für das Verständnis der Bildung und der Eigenschaften von Aerosol- und Eisteilchen. Die Untersuchung des Rußaerosols in jungen Abgasfahnen bildet den Anschluß an die Messungen an Triebwerken auf Prüfständen am Boden (TP1). Damit wird der Einfluss von Flugparametern (Höhe, Leistung) und Umgebungsparametern auf die Rußemission bestimmt. Die Messung der Veränderung des Aerosols innerhalb und außerhalb von Kondensstreifen und ihr Einfluss auf die Eigenschaften und Entwicklung von Zirren wird zur Verifizierung und Verbesserung von Modellansätzen (TP4) benutzt. Zudem trägt dieses EP zur Konzeption und Bewertung der Messungen in der Aerosol-Wolkenkammer (EP2.1) bei.

Problemstellung

Verkehrsflugzeuge im Reiseflug emittieren u.a. Wasserdampf, Rußteilchen und partikelbildende Substanzen. Triebwerke emittieren ca. 10^{15} Rußpartikel je kg verbrannten Treibstoffs und induzieren durch Chemiionen und kondensierbare Gase wie Schwefelsäure oder organische Verbindungen ca. 10^{17} /kg volatile Partikel. Die genaue Zahl und Masse variiert stark von Triebwerk zu Triebwerk und hängt von der Flughöhe und dem aktuellen Triebwerksschub ab. Für die Partikelneubildung ist die Partitionierung von SO_2 in SO_3 bzw. H_2SO_4 am Triebwerksexit und die Anzahl der im Triebwerk generierten Chemiionen von entscheidender Bedeutung. Der größte Anteil des Schwefels wird als SO_2 emittiert, jedoch existieren beträchtliche Unsicherheiten bezüglich der Konversionsfraktion $\epsilon = (\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4)/\text{S}$ im Bereich 1-20% (Brown et al., 1996; Tremmel und Schumann, 1999). Die Bildungs- und Wachstumsraten neuer $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ -Teilchen hängen stark von diesem Parameter ab (Kärcher, 1999). Mit Hilfe eines flugzeuggetragenen Ionen-Massenspektrometers gelang kürzlich der direkte Nachweis von Schwefelsäure im Flugzeugaerosol (Curtius et al., 1998). Es wurde gefunden, dass Flugzeugabgase Chemiionen mit zum Teil großen Massen enthalten, die die Nukleation von flüssigem Aerosol stark verstärken (Arnold et al., 1999; Schröder et al., 1998; Yu and Turco, 1998; Kärcher, 1999).

Kurzlebige oder langlebige Kondensstreifen bilden sich je nach Temperatur und Feuchte in der Umgebung (z.B. Schumann et al., 1996). Der Beginn der Kondensstreifenbildung hängt zudem vom Wirkungsgrad des Triebwerkes im Flug und schwach vom Schwefelgehalt des Treibstoffs ab (Busen und Schumann, 1995). Der Schwefelgehalt hat jedoch einen messbaren Einfluß auf die Zahl der Eispartikel im Kondensstreifen (Petzold et al., 1997). Zudem hat der Schwefelgehalt einen Einfluß auf das volatile Aerosol und die Benetzung von Ruß mit Schwefelsäure (Kärcher, 1999). Die Bildung von Kondensstreifen und volatilem Aerosol kann nur im Flug (nicht auf Prüfständen) untersucht werden.

Die Größenverteilung der durch die Emissionen des Flugzeugs generierten Partikel wurde bereits in mehreren Experimenten in situ in Abhängigkeit vom Alter des Abgases und von ver-

schiedenen Triebwerkstypen untersucht, wobei ansatzweise auch die chemische Zusammensetzung dieser Partikel gemessen wurde (Petzold et al., 1998, Arnold et al., 1999; Kuhn et al., 1998). Offen ist die Zusammensetzung des Aerosols im Nanometerbereich. Offen ist zudem, wie sich die emittierten Partikel und Aerosolvorläufer nach Verlassen des Nahbereichs von Flugzeugen innerhalb und außerhalb von Kondensstreifen verändern und welchen Einfluss die Aerosole je nach relativer Feuchte in der Umgebung auf die Entwicklung von Kondensstreifen und Zirren haben (Gierens and Jensen, 1998). Wenig ist bisher über die weitere Entwicklung des Aerosols und der sich bildenden Zirren bekannt (Schröder et al., 2000). Neue Beobachtungen (Heymsfield et al., 1998; Gierens et al., 1999) zeigen, dass die relative Feuchte in Zirren die Eissättigung oft stark übersteigt und gelegentlich Wassersättigung erreicht. Es ist bisher nicht bekannt, wie rasch sich eine Eisübersättigung in einem Kondensstreifen oder Zirrus in aufsteigenden Luftmassen abbaut. Mit den hier geplanten Messungen sollen neue experimentelle Informationen gewonnen werden, die dazu beitragen, diese Prozesse zu verstehen und in Modellen geeignet abzubilden.

Methoden

Es werden In-situ-Messungen mit dem Forschungsflugzeug Falcon durchgeführt. Dabei werden die Eigenschaften der von Flugzeugen stammenden Aerosole in Abgasfahnen im Alter von Sekunden bis zu knapp einer Stunde gemessen. Zudem werden Messungen in Zirren durchgeführt, die vom Luftverkehrsaerosol beeinflusst sind. Dabei soll die zeitliche Entwicklung der Aerosole und Zirren vermessen werden. Die Messungen mit dem H₂O-DIAL (EP2.3) werden mit Messungen zum Wasserdampf und den Aerosolen ergänzt. Dabei kommen folgende Instrumente zum Einsatz (siehe auch Tabelle 1 in Kap. 1.2):

- Ein Ionen-Massenspektrometer (IOMAS) des Max-Planck Instituts für Kernphysik Heidelberg zur Erfassung und Größenauflösung von Molekülclustern im Bereich von einigen Ångström bis zu etwa 2 nm Durchmesser.
- Kondensationskernzähler zur Messung des flugzeug-generierten und interstitiellen Aerosols und eine Filtereinheit für Aerosolproben, die nach dem Flug analysiert werden.
- Ein Laser-Ionization-Mass Spectrometer (SPLAT) zur In-situ-Analyse der chemischen Zusammensetzung von Aerosolteilchen (Beitrag FZJ, EP2.4).
- Ein CO₂-Analysator zur Bestimmung der aktuellen Konzentration des Abgases. CO₂ ist ein inerter Tracer, dessen Konzentration am Triebwerksausgang bekannt ist und zu einem späteren Zeitpunkt unmittelbar Rückschlüsse auf die aktuelle Verdünnung des Abgases zulässt.
- Ein Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar (H₂O-DIAL) zur Messung von Partikelstreuverhalten und Wasserdampfverteilung (Beitrag DLR-LI).
- Ein hochgenaues Hygrometer (FISH) zur Messung des totalen Wassergehaltes (Beitrag FZJ).
- Spektrometer an den Flächen des Flugzeugs zur Erfassung des Größenspektrums des Hintergrundaerosols und zur Bestimmung des Brechungsindex (MASP-Spektrometer).

Bei der Messkampagne zur Untersuchung eisübersättigter Gebiete nimmt das H₂O-DIAL einen Großteil des verfügbaren Raums im Flugzeug ein, als weitere Geräte werden hier deshalb nur die Kondensationskernzähler, Filtersammler und Spektrometer zusammen mit einem Hygrometer eingesetzt. Das Instrumente SPLAT und FISH des FZJ werden in EP2.4 und das H₂O-DIAL in EP2.3 im Detail beschrieben.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Für die Messungen wird in enger Zusammenarbeit mit dem Flugbetrieb des DLR das Forschungsflugzeug Falcon des DLR genutzt, das bereits bei einer großen Zahl von Messflügen mit ähnlicher Zielsetzung eingesetzt wurde. Die Piloten und Experimentatoren haben dabei

umfangreiche Erfahrungen mit verschiedenen Flugmanövern und Messsituationen gesammelt (Petzold et al., 1997).

Umfangreiche Messerfahrungen stammen aus der Experimentserie SULFUR 1 bis 6. Bei dem EU-Projekt AEROCONTRAIL wurden 1996 Kondensstreifen hinsichtlich ihrer mikrophysikalischen Eigenschaften und Strahlungswirkung untersucht. Das dabei eingesetzte Instrumentarium wurde laufend erweitert und verbessert (u.a. Schröder et al., 2000). Das Wasserdampf-Lidar wurde bereits im Flugzeug erprobt (siehe EP2.4). Die Massenspektrometer des MPI für Kernphysik werden seit Jahren auf der Falcon und anderen Forschungsflugzeugen erfolgreich eingesetzt (z.B. Arnold et al., 1999; Curtius et al., 1998). Damit werden erstmalig In-situ-Messungen im Größenbereich von Molekülclustern möglich.

Arbeitsprogramm

Geplant sind zwei Flugmesskampagnen von jeweils zwei Wochen Dauer im Herbst 2001, die mit der Falcon im süddeutschen Raum durchgeführt werden.

Arbeitspaket 1: Vorbereitung der Instrumente und der Messkampagnen

- M1: Vorbereitungstreffen zur Festlegung der Messstrategie
- M2: Vorbereitungstreffen zur Detailplanung der Messungen
- M3: Messgeräte einsatzbereit und zugelassen

Arbeitspaket 2: 1. Kampagne (mit EP2.3)

- M4: Quicklook-Daten verfügbar

Arbeitspaket 3: Auswertung der Messdaten

- M5: Endgültige Daten verfügbar
- M6: Arbeitstreffen zur weiteren Abstimmung der Auswertung

Arbeitspaket 4: 2. Kampagne (mit EP2.4 und MPI-K)

- M7: Quicklook-Daten verfügbar

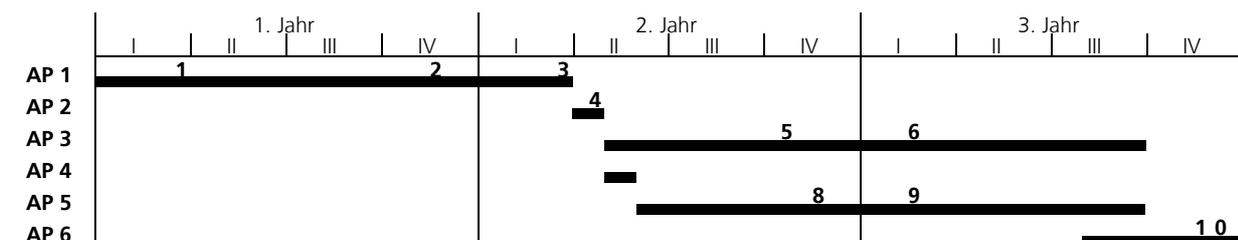
Arbeitspaket 5: Auswertung der Messdaten

- M8: Endgültige Daten verfügbar
- M9: Arbeitstreffen zur weiteren Abstimmung der Auswertung

Arbeitspaket 6: Endbericht

- M10: Endbericht fertig; Datensätze der Messkampagnen in Datenbank gespeichert

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 0.5 | 2 | 1 | 3.5 | 0 | 700 |

An diesem Vorhaben müssen mehrere erfahrene Wissenschaftler und Techniker mitarbeiten. Der erhöhte Aufwand im zweiten Jahr ist zur Durchführung und Auswertung der Experimente notwendig.

Literatur

- Arnold, F., J. Curtius, B. Sierau, V. Bürger, R. **Busen**, and U. **Schumann**, Detection of massive negative chemions in the exhaust plume of a jet aircraft in flight, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1577-1580, 1999.
- Brown, R.C., M.R. Anderson, R.C. Miake-Lye, C.E. Kolb, A.A. Sorokin, and Y.I. Buriko, Aircraft exhaust sulfur emissions, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 3603–3606, 1996.
- Busen**, R., and U. **Schumann**, Visible contrail formation from fuels with different sulfur contents. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1357-1360, 1995.
- Curtius, J., B. Sierau, F. Arnold, R. **Baumann**, R. **Busen**, P. **Schulte** and U. **Schumann**: First sulfuric acid detection in the exhaust plume of a jet aircraft in flight. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 923-926, 1998.
- Gierens**, K. and E. Jensen, Numerical study of the contrail-to-cirrus transition, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 4341-4344, 1998.
- Gierens**, K., U. **Schumann**, M. Helten, H. Smit, and P.H. Wang, Ice-supersaturated regions and sub visible cirrus in the northern midlatitude upper troposphere, eingereicht bei *J. Geophys. Res.*, 1999.
- Heymsfield, A., L.M. Miloshevich, C. Twohy, S. Oltmans, Upper-tropospheric relative humidity observations and implications for cirrus ice nucleation, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1343-1346, 1998.
- Kärcher**, B., Aviation-produced aerosols and contrails, *Surv. Geophys.* **20**, 113-167, 1999.
- Kuhn**, M., A. **Petzold**, D. Baumgardner, and F.P. **Schröder**, Particle composition of a young condensation trail and of upper tropospheric aerosol, *Geophys. Res. Lett.* **25** 2679-2682, 1998.
- Petzold**, A., R. **Busen**, F.P. **Schröder**, R. **Baumann**, M. **Kuhn**, J. Ström, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, D. Baumgardner, F. Arnold, S. Borrmann, and U. **Schumann**, Near-field measurements on contrail properties from fuels with different sulfur content, *J. Geophys. Res.* **102**, 29867-29880, 1997.
- Petzold**, A., J. Ström, S. Ohlsson, and F.P. **Schröder**, Elemental composition and morphology of ice crystal residual particles in cirrus clouds and contrails, *Atmos. Res.* **49**, 21-34, 1998.
- Schröder**, F.P., B. **Kärcher**, A. **Petzold**, R. **Baumann**, R. **Busen**, C. **Hoell**, and U. **Schumann**, Ultra-fine aerosol particles in aircraft plumes: In situ observations, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2789-2792, 1998.
- Schröder**, F.P., B. **Kärcher**, C. Duroure, J. Ström, A. **Petzold**, J.-F. Gayet, B. **Strauss**, P. **Wendling**, and S. Borrmann, The transition of contrails into cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.*, im Druck, 2000.
- Schumann**, U., J. Ström, R. **Busen**, R. **Baumann**, K. **Gierens**, M. **Krautstrunk**, F. P. **Schröder**, and J. **Stingl**, In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels, *J. Geophys. Res.*, **101**, 6,853-6,869, 1996.
- Tremmel**, H. G., and U. **Schumann**, Model simulations of fuel sulfur conversion efficiencies in an aircraft engine: Dependence on reaction rate constants and initial species mixing ratios. *Aerosp. Sci. Techn.*, im Druck, 1999.
- Yu, F. and R.P. Turco, Contrail formation and impacts on aerosol properties in aircraft plumes: Effects of fuel sulfur content. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 313-316, 1998.

4.2.3 Lidarmessungen von Kondensstreifen, Zirren und H_2O

Fachkoordination Dr. H. Flentje, DLR-LI
Zuordnung TP2 – Eisbildung in der Atmosphäre

Ziele

Mittels flugzeuggetragener Lidarmessungen über Mitteleuropa werden Rückstreuung und Depolarisation von Aerosolen und Eiskristallen sowie der Wasserdampfgehalt bestimmt. Anhand dieser Daten werden feuchte Gebiete im Bereich der Tropopause detektiert, ihr Sättigungsgrad bestimmt und darin entstehende Zirruswolken vermessen. Es werden Informationen über Lebensdauer und Häufigkeit des Auftretens optisch dünner Zirren, die Bedeutung der synoptischen Situation auf deren Entstehung und der Einfluss der Zirren auf den Strahlungshaushalt erwartet. Die Lidarmessungen dienen ferner der anschließenden zielgenauen Führung von In-situ-Messungen in diese Gebiete und der Modellierung der beteiligten mikrophysikalischen Prozesse. Damit trägt EP2.3 zur Klärung eines möglichen Zusammenhanges zwischen Triebwerksemissionen und der Bildung strahlungswirksamer Eiswolken bei.

Problemstellung

Eine Auswertung der MOZAIC Daten (Gierens et al., 1999) zeigt, dass feuchte Gebiete, die durch dynamische Prozesse wie etwa synoptische Anhebung oder Feuchteadvektion hervorgerufen werden, in der oberen Troposphäre und untersten Stratosphäre auftreten. In eisübersättigten Gebieten wird entsprechend die Bildung optisch dünner, unter Umständen unsichtbarer, Zirruswolken erwartet, deren Partikel mit Radien von wenigen μm mit dem Lidar gut messbar sind (EP3.2; Wirth et al., 1999; Kärcher and Solomon, 1999). Die Rolle der Partikel aus Flugzeugtriebwerken bei der Bildung und Modifikation solcher Eiswolken ist derzeit nicht geklärt. Aufgrund ihrer großräumigen Ausdehnung haben sie jedoch ein erhebliches Potential zur Beeinflussung des Strahlungshaushalts und stellen einen Unsicherheitsfaktor bei der Behandlung der Klima-Wolken-Rückkopplung in globalen Klimamodellen dar. Zur Abschätzung des Strahlungsantriebs der aus Flugzeug-Aerosol entstehenden Zirren müssen ihre Häufigkeit, Ausdehnung und mikrophysikalische Eigenschaften bestimmt werden. Es ist vorgesehen, neben der Partikel-Rückstreuung die H_2O -Konzentration als Indikator der Übersättigung und der Luftmasse entlang von Trajektorien zu messen, um ihren Zusammenhang mit der Bildung dünner Zirren und dem darin ablaufenden Partikelwachstum zu untersuchen. Hier besteht eine enge Schnittstelle zu den Modellaktivitäten aus TP4.

Methoden

Die gesamte Flugmesskampagne wird von EP2.2 koordiniert. Durch die beträchtliche horizontale und vertikale Erstreckung der Lidarmessungen ist es in Ergänzung der In-situ-Messungen mit Partikelsonden möglich, die großräumige Bildung und Entwicklung von Eiswolken zu untersuchen, die aus den von Flugzeugtriebwerken in die obere Troposphäre/untere Stratosphäre injizierten Partikeln in eisübersättigten Regionen entstehen können.

Da die synoptischen Prozesse, die die Bildung von Zirren einleiten, vermutlich mit den Hebungszonen synoptischer Wellenstörungen zusammenhängen, wird die Planung der einzelnen Flugmissionen anhand von ECMWF-Analysen vorgenommen. Zur kurzfristigen und genaueren Identifikation werden zusätzlich aktuelle Satellitenbilder der Gebiete hoher Feuchte herangezogen, die durch persistente, ausgedehnte Kondensstreifen markiert werden. Aus diesen Informationen sollen mit zenitgerichteten Lidarmessungen zweidimensionale Schnitte

der Partikel-Rückstreuung bei 3 Wellenlängen, der Depolarisation und der Wasserdampf-Konzentration feuchte Gebiete im Bereich der Tropopause lokalisiert, sowie deren räumliche Struktur und Ausdehnung bestimmt werden. Aufgrund seiner hohen vertikalen Auflösung eignet sich das H₂O-DIAL-System dazu, die Position der oft nur wenige 100 m dicken Aerosol-Zirruschichten präzise zu erfassen. Nach in früheren Kampagnen bereits bewährter Methode sollen anhand der ermittelten Positionen anschließend In-situ-Partikel- und Wasserdampf-Messungen in diesen Gebieten durchgeführt werden (beschrieben in EP2.2 und EP2.4).

Die Lidarmessungen liefern auch Aufschluss über bei der Zirrenbildung beteiligten dynamischen Prozesse, wie Wellen und stratosphärische Intrusionen. Für die Modellierung der Partikel-Bildungsmechanismen (EP4.1) und der Wolkendynamik (EP4.2) liefern die bei verschiedenen Wellenlängen gemessenen Rückstreu-Koeffizienten (Farbverhältnisse) eine Abschätzung der effektiven Radien kleinerer (sub- μm), im Wachstum befindlicher Partikel. Die dabei nötigen Annahmen können teilweise aus den In-situ-Messungen abgeleitet werden. Zusätzlich soll bei einer Wellenlänge die lineare Depolarisation gemessen werden, um Aufschluss über die Sphärizität der Partikel zu bekommen. Mit dem H₂O-DIAL (Differential Absorption Lidar) (Ehret et al., 1999) soll die absolute Wasserdampf-Konzentration entlang der Strömung im Bereich der feuchten Gebiete sowie die Lage und Struktur der Tropopause bestimmt werden. Dies gibt Aufschluss über die dynamische Situation dort, wo Zirren als Tracer nicht vorhanden sind und ist notwendig für die Simulation der beteiligten mikrophysikalischen Prozesse. Trajektorien und meteorologische Analysen werden für die Charakterisierung der Luftmassen herangezogen.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Flugzeuggestützte Lidarmessungen sind ein integraler Bestandteil der Fernerkundung und Atmosphärenforschung am DLR. Die eigenständige Arbeitsgruppe Lidar (LI) im Institut für Physik der Atmosphäre (PA) des DLR hat langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Anwendung der Lidar Technologie sowie in der Durchführung von Messkampagnen mit der Falcon und anderen Forschungsflugzeugen. Das flugzeug-getragene Rückstreu-Lidar OLEX, basierend auf einem Nd:YAG Laser (354, 532 und 1064 nm), und einem zusätzlichen XeCl Excimer Laser (308 nm) zur Messung von Ozon nach dem DIAL-Verfahren (Differential Absorption Lidar), wurde vielfach in (inter)nationalen Kampagnen zur Messung von Partikeln, Mehrfachstreuung in Wolken sowie Ozon eingesetzt (etwa EASOE, SESAME, APE/POLECAT, THESEO, HIMSPEC; z.B. Wirth et al., 1999; Flentje et al., 1999).

Parallel wurde seit 1986 ein H₂O-DIAL entwickelt und in Kampagnen zur Messung von Wasserdampf eingesetzt, etwa an Bord des NCAR-Forschungsflugzeuges Electra in der planetaren Grenzschicht (Ehret et al., 1993; Kiemle et al., 1997). In den letzten Jahren wurde ein wesentlich verbessertes H₂O-DIAL, basierend auf einem schmalbandigen, mit 100 Hz gepulsten Festkörperlaser, entwickelt (Fix et al., 1998). Die erfolgreichen Testmessungen von stratosphärischen Intrusionen (sichtbar im H₂O-Signal; Ehret et al., 1999) und Trägheitsschwerewellen (im Aerosol-Signal) zeigen, dass mit diesem System sehr niedrige stratosphärische Wasserdampf-Konzentrationen im ppm-Bereich und anhand dieser Luftmassentracer dynamische Prozesse in der Tropopausenregion mit sehr hoher Auflösung von wenigen 10 m horizontal und vertikal im Aerosol-Signal und 2 km bzw. 300 m im H₂O-Signal gemessen werden können.

Während der APE/THESEO Kampagne in den Tropen konnten sehr dünne Zirren (mit Rückstreu-Verhältnissen kleiner als 3), wie sie im Bereich der durch Flugzeuge kontaminierten feuchten Gebieten über Westeuropa erwartet werden, mit dem Lidar beobachtet und hin-

sichtlich Partikelgröße und -phase ausgewertet werden. Das russische Stratosphären-Forschungsflugzeug Geophysika wurde anhand der Lidarmessung in die dünnen Zirruschichten geleitet, während es sich als sehr unzuverlässig erwies, diese Flugführung aufgrund von Sichtbeobachtungen zu bewerkstelligen. Auch in Arktis-Kampagnen der vergangenen Jahre bewährte sich die Pfadfindertechnik der durch die Lidarmessung geführten In-situ-Messungen.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Vorbereitung und Erweiterung des Messsystems

Zu dem beschriebenen Lidarsystem, das bisher bei 1064 nm und 935 nm misst, wird ein weiterer Nachweiskanal hinzugefügt, der die unabhängige Messung der parallel und senkrecht polarisierten rückgestreuten Signale (Depolarisationsverhältnis) bei 532 nm mit hoher räumlicher Auflösung gestattet. Dazu sind eine entsprechende Erweiterung des optischen Aufbaus im Labor sowie atmosphärische Testmessungen vom Boden aus notwendig. Die Datenerfassung ist bereits für das erweiterte System ausgelegt.

- M1: Messsystem erweitert

Arbeitspaket 2: Meteorologische Analyse und Durchführung der Flugmesskampagne

Im Vorfeld der Messkampagne wird sichergestellt, dass alle benötigten Informationen den beteiligten Gruppen rechtzeitig und operationell zur Verfügung stehen, z.B. die synoptischen Analysen/Vorhersagen des ECMWF und die Satellitenbilder. Während der Kampagne wird bei täglichen Lagebesprechungen die synoptische Situation geprüft und gegebenenfalls die Flugroute, das vom Pfadfinder abzuscannende Gebiet und die Koordination mit den In-situ-Messungen geplant. Nach dem Start wird das Einsatzgebiet vom Flugzeug-Lidar im Wellenlinienmuster abgescannt und, sobald eisübersättigte Gebiete gefunden wurden, versucht, diese entlang der Windströmung abzufliegen. Das Flugzeug wird erst einen langen Schnitt und danach die In-situ-Messung im detektierten Gebiet, möglichst an dessen luvseitigen Rand stromauf- und abwärts fliegen. Nach den einzelnen Missionen findet eine Präsentation der Quicklook-Daten statt, um die Strategie zu optimieren.

- M2: Satellitendaten und meteorologische Analysen verfügbar
- M3: Messungen durchgeführt

Arbeitspaket 3: Auswertung der Lidar Aerosol- und Wasserdampf-Daten

Bestimmung der Wasserdampf-Konzentration, der Rückstreuverhältnisse (bei 1064, 935 und 532 nm) und der Depolarisation bei 532 nm im 2-D-Schnitt entlang der Flugrouten. Ableitung von Farbverhältnissen zur Abschätzung der effektiven Partikelgröße. Vergleich und Kombination der Lidar- und In-situ-Daten.

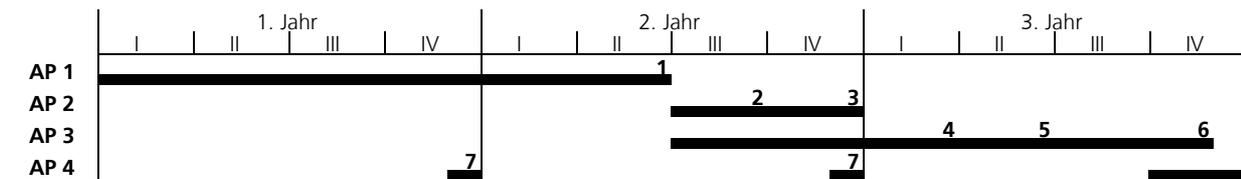
- M4: Farbverhältnisse und effektive Eispartikelgrößen bestimmt
- M5: Optische Parameter für Modelle aus Messdaten verfügbar
- M6: Vergleich mit anderen bei der Kampagne gewonnenen Messdaten abgeschlossen

Arbeitspaket 4: Dokumentationen

Erstellen von Zwischenberichten, Endbericht und Publikationen in Fachzeitschriften. Teilnahme an Tagungen und Workshops.

- M7: Zwischenberichte, Publikationen erstellt
- M8: Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|-----|-----|--------|------------------|------------|
| PJ | 0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.5 | 0 | 300 |

Zur Durchführung der genannten Arbeiten ist ein spezialisierter Mitarbeiter mit Kenntnissen auf dem Gebiet der Lidar-Messtechnik, der Auswertung von Satellitendaten und meteorologischen Analysen und Kampagnenerfahrung erforderlich. Dies rechtfertigt den Einsatz von 1.5 Personaljahren in PAZI.

Literatur

- Ehret, G., C. Kiemle, W. Renger** und G. **Simmet**, Airborne remote sensing of tropospheric water vapour with a stratospheric near infrared Differential Absorption Lidar system, *Appl. Opt.* **32**, 4534, 1993.
- Ehret, G., A. Fix, V. Weiss, G. Poberaj** und T. **Baumert**, Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapour DIAL application in the upper troposphere and lower stratosphere, *Appl. Phys. B* **67**, 427-431, 1998.
- Ehret, G., K. P. Hoinka, J. Stein, A. Fix, C. Kiemle** und G. **Poberaj**, Low Water-Vapour Measured by an Airborne Lidar, *J. Geophys. Res.*, im Druck, 1999.
- Fix, A., V. Weiss** und G. **Ehret**, Injection-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapour DIAL, *Pure Appl. Opt.* **7**, 837-852, 1998.
- Flentje, H., R. Dubois, J. Heintzenberg** und H. J. **Karbach**, Retrieval of aerosol properties from boundary layer extinction measurements with a DOAS system, *Geophys. Res. Lett.* **24**, 2019-2022, 1997.
- Flentje, H., W. Lohoz, W. Renger** und M. **Wirth**, Validation of contour advection simulations with airborne lidar measurements of filaments during SESAME, *J. Geophys. Res.*, eingereicht, 1999.
- Gierens, K., U. Schumann, M. Helten, H. Smit und A. Marenco, A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements, *Ann. Geophysicae* **17**, 1218-1226, 1999.
- Kärcher, B. und S. Solomon, On the composition and optical extinction of particles in the tropopause region. *J. Geophys. Res.* **104**, 27441-27459, 1999.
- Kiemle, C., G. Ehret, A. Giez, J. Davis, D. H. Lenschow** und S. P. **Oncley**, Estimation of boundary-layer humidity fluxes and statistics from airborne differential absorption lidar (DIAL), BOREAS special issue of the *J. Geophys. Res.* **102**, 29189-29203, 1997.
- Wirth, M., A. Tsias, A. Dörnbrack, V. Weiß, K. S. Carslaw, M. Leutbecher, W. Renger, H. Volkert** und Th. **Peter**, Model-guided Lagrangian observation and simulation of mountain polar stratospheric clouds, *J. Geophys. Res.* **104**, 23971-23981, 1999.

4.2.4 In-situ-Messungen von Einzelpartikelkomposition und H_2O

Fachkoordination Priv.-Doz. Dr. S. Borrmann, FZJ-ICG-1
Zuordnung TP2 – Eisbildung in der Atmosphäre

Ziele

Durch die Implementierung und den Einsatz des SPLAT (Single Particle Laser Ablation Time-of-flight mass spectrometer) Flugzeugmesssystems und den Einsatz des hochauflösenden, schnellen Wasserdampfmesssystems FISH (Fast In situ Stratospheric Hygrometer) bei den Messflügen der Falcon wird die chemische Zusammensetzung einzelner Aerosolpartikel bestimmt. Dies sind Schlüsselgrößen für die Charakterisierung des Aerosols hinsichtlich seiner Strahlungseigenschaften und seines Wolkenbildungspotentials.

Während das bei der NOAA (Aeronomy Laboratory, Boulder) entwickelte Messsystem nur Ionen eines Ladungszustandes bei einer Messung erfasst, wird mit SPLAT die simultane Bestimmung der chemischen Komposition von positiven und negativen Ionen eines einzelnen Teilchens ermöglicht. Dies erlaubt eine präzisere Bestimmung der Zusammensetzung der Einzelpartikel.

Problemstellung

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Aerosolpartikeln in der Atmosphäre ist von erheblicher Bedeutung für das Verständnis chemischer Prozesse, Wolkenbildungsvorgänge und des Klimas, und dient der Entwicklung und Überprüfung prognosefähiger numerischer Simulationsmodelle. Erst in jüngster Zeit gelang es einer Gruppe am MPI für Kernphysik, mit einer ballongetragenen Sonde die chemische Zusammensetzung von Aerosol- und Wolkenpartikeln in der polaren Stratosphäre in situ zu untersuchen (Schreiner et al., 1999). Die chemische Analyse von Einzelpartikeln in der freien Atmosphäre mit flugzeug-getragenen Instrumenten ist ebenfalls erst seit kurzer Zeit möglich (Murphy et al., 1998).

Methoden

Das SPLAT Messsystem ist integraler Bestandteil der Partikelcharakterisierung im TP2 und ergänzt sowohl den Messbereich der übrigen Instrumente als auch die Art der erfassten Messgrößen des Aerosols (Beschreibung bei EP2.2 und in der Tabelle im Haupttext). Das Arbeitsprogramm sieht die physikalische und chemische Charakterisierung von Aerosolen in Kondensstreifen und Zirren vor und ist ausführlich in EP2.2 beschrieben. Durch die Implementierung des SPLAT Systems auf der Falcon und dem Einsatz bei den Messungen in Abgasfahnen, Kondensstreifen und Zirren können die dort auftretenden Partikel erstmalig mit einem Einzelpartikelkompositionsmassenspektrometer in situ analysiert werden. Die wichtigsten Eigenschaften der SPLAT und FISH Messsysteme sind in der Tabelle aller Instrumente im Haupttext zusammengefasst.

SPLAT ist ein time-of-flight Massenspektrometer zur In-situ-Bestimmung der chemischen Zusammensetzung atmosphärischer Aerosolpartikel. Es wird derzeit am FZJ-ICG-1 entwickelt, um von einem Flugzeug aus die chemische Zusammensetzung einzelner Aerosolpartikel qualitativ zu bestimmen. Als Methode wird die time-of-flight Massenspektroskopie (TOFMS) eingesetzt, wobei die charakteristischen Ionen aus den Aerosolpartikeln durch Laserablation freigesetzt werden. Die Aerosolpartikel werden von der am Flugzeug vorbeiströmenden Luft gesammelt und in das Vakuum mittels eines differentiell besaugten Einlasses oder einer aero-

dynamischen Linse transferiert. Die Größe der Einzelpartikel wird mit Hilfe einer Streulichtmessung bestimmt. Die dazugehörige Optik dient mit entsprechender Elektronik auch zur Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel, womit dann ein gepulster Excimer Laser gesteuert wird, so dass der Laserpuls das Partikel trifft. Durch die auf dem Teilchen deponierte Lichtenergie wird das Partikel in Ionen und geladene Molekülbruchstücke zerlegt, die dann massenspektrometrisch untersucht werden.

Als Resultat werden für die Ionenwolke jedes vom Laserstrahl getroffenen Partikels zwei Spektren der Massen/Ladungsverhältnisse aufgezeichnet, bei denen jeder Peak einer Ionensorte mit einem bestimmten Massen- zu Ladungsverhältnis entspricht. Das eine der beiden Spektren erfasst die positiven Ionen, das zweite die negativen. Mit bisher existierenden TOFMS Instrumenten können auf diese Weise Partikel mit Größendurchmessern von $0.18 \mu\text{m}$ bis einigen Mikrometern chemisch analysiert werden, womit der Bereich von atmosphärischen Hintergrundaerosolpartikeln und großen Rußpartikeln im Flugzeugnachlauf bis hin zu kleinen Eispartikeln überdeckt ist.

Bisherige Versionen dieser Instrumente verarbeiten 10 Partikel je Minute; die NOAA Flugzeugversion kann bis zu 10 Teilchen je Sekunde erfassen (Murphy et al., 1998). Da Ladungs- zu Massenverhältnisse von 1 bis >500 aufgelöst werden können, ist es insbesondere möglich, auch große Bruchstücke organischer Moleküle und Kohlenstoffcluster zu erfassen, womit sich der Einsatz der Technik besonders für verbrennungstechnische Aerosole anbietet. Ein wesentliches Novum der SPLAT Konfiguration besteht in der gleichzeitigen Erfassung positiver und negativer Ionen zu jedem getroffenen Aerosolpartikel. Das weltweit bisher einzige Flugzeugmessgerät dieser Art kann nur eine Ionensorte je getroffenem Partikel aufzeichnen.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Der Leiter des SPLAT Entwicklungsprojektes führt seit 1981 In-situ-Aerosolmessungen auf fünf verschiedenen Flugzeugplattformen durch (z.B. Borrmann et al. 1996; 1997a,b). Unter anderem war er an den Experimenten mit der DLR Falcon im Zusammenhang mit den SCHWEFEL 4, CONTRAIL und AEROCONTRAIL Projekten beteiligt, also an Untersuchungen, die relevant für die Fragestellungen von PAZI sind. Das FISH Instrument ist ebenfalls auf der Falcon implementiert und wurde u.a. bei den POLSTAR-Projekten im Ozonforschungsprogramm des BMBF eingesetzt.

Die Wasserdampfmessungen am FZJ werden mit dem am Institut entwickelten Lyman- α Fluoreszenzhygrometer FISH (Zöger et al., 1999a) seit vielen Jahren von Ballonen (z.B. Zöger et al., 1999b) und Flugzeugen (z.B. Schiller et al., 1999a) erfolgreich durchgeführt. Die Hygrometer werden zwischen den Messeinsätzen im Labor kalibriert. Das Instrument ist in vielen Messkampagnen charakterisiert und mit vielen anderen Hygrometern verglichen, u.a. mit einem französischen Frostpunkthygrometer, MIPAS und den Satellitenexperimenten HALOE und ILAS (Kley and Russell, 2000; Schiller et al., 1999a, b; Zöger et al., 1999b).

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Aufbau und Fertigstellung des Geräts

- M1: Komponentenaufbau abgeschlossen
- M2: Labor- und Flugzeugtests durchgeführt

Arbeitspaket 2: Implementierung ins Flugzeug und Messkampagne

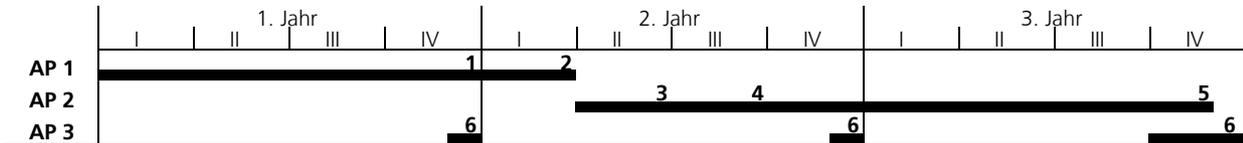
- M3: Messsystem auf Falcon installiert

- M4: Messkampagne abgeschlossen
- M5: Chemischen Signaturen der Partikel ausgewertet

Arbeitspaket 3: Dokumentation

- M6: Zwischenbericht bzw. Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|-----|-----|--------|------------------|------------|
| PJ | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 1 | 0 | 200 |

Die Weiterentwicklung und Implementierung kann nur von einem im Gebiet der Aerosolmesstechnik ausgewiesenen Wissenschaftler durchgeführt werden. Der Mitteleinsatz von einem Personaljahr ist daher gerechtfertigt.

Literatur

- Borrmann, S., S. Solomon, L. Avallone, and J.E. Dye,** On the occurrence of ClO in cirrus clouds and volcanic aerosol in the tropopause region, *Geophys. Res. Lett.* **24**, 2011-2014, 1997a.
- Borrmann, S., S. Solomon, J.E. Dye, D. Baumgardner, K.K. Kelly, and K.R. Chan,** Heterogeneous reactions on stratospheric background aerosols, volcanic sulfuric acid droplets, and type I PSCs: The effects of temperature fluctuations and differences in particle phase, *J. Geophys. Res.* **102**, 3639-3648, 1997b.
- Borrmann, S., S. Solomon, J.E. Dye, and B. Luo,** The potential of cirrus clouds for heterogeneous chlorine activation, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2133-2136, 1996.
- Kley, D., and J.M. Russell III,** The SPARC Water Vapor Assessment, in Vorbereitung, 2000.
- Murphy, D.M., D.S. Thomson, and M.J. Mahoney, In situ measurements of organics, meteoritic material, Mercury and other elements in aerosols at 5-19 km, *Science* **282**, 1664-1669, 1998.
- Schiller, C., A. Afchine, N. Eicke, C. Feigl, H. Fischer, A. Giez, P. Konopka, H. Schlager, F. Tuitjer, F.G. Wienhold, and M. Zöger, M.,** Ice particle formation and sedimentation in the tropopause region: A case study based on in situ measurements of total water during POLSTAR 1997, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2219-2222, 1999a.
- Schiller, C., J. Beuermann, J. Ovarlez, H. Ovarlez, H. Oelhaf, M. Stowasser, and A. Engel,** Intercomparison of European Hygrometers for the Lower Stratosphere, 5th Europ. Workshop on Strat. Ozone, St. Jean de Luz, France, 1999b.
- Schreiner, J., C. Voigt, A. Kohlmann, F. Arnold, K. Mauersberger, and N. Larsen, Chemical analysis of polar stratospheric cloud particles, *Science* **283**, 968-970, 1999.
- Zöger, M., A. Afchine, N. Eicke, M.-T. Gerhards, E. Klein, D.S. McKenna, U. Mörschel, U. Schmidt, V. Tan, F. Tuitjer, T. Woyke, and C. Schiller, C.,** Fast in situ stratospheric hygrometers: A new family of balloon-borne and airborne Lyman α photofragment fluorescence hygrometers, *J. Geophys. Res.* **104**, 1807-1816, 1999a.
- Zöger, M., A. Engel, D.S. McKenna, C. Schiller, U. Schmidt, and T. Woyke,** Balloon-borne in situ measurements of stratospheric H₂O, CH₄ and H₂ at midlatitudes, *J. Geophys. Res.* **104**, 1817-1825, 1999b.

4.3 Aerosol-Zirren-Messungen

4.3.1 INCA Feldmessungen

Fachkoordination Dr. R. Busen, DLR-PA
Zuordnung TP3 – Aerosol-Zirren-Messungen

Ziele

- Bestimmung der Unterschiede in den Eigenschaften von Zirren in Luftmassen mit niedriger und hoher Aerosolbelastung.
- Erstmalige Messung der mikrophysikalischen Eigenschaften junger Zirren in nördlichen und südlichen mittleren Breiten, in relativ sauberen und belasteten Luftmassen, unter ansonsten vergleichbaren Bedingungen.

Der Beitrag zum Gesamtprojekt liegt in der Eingrenzung des Zusammenhanges zwischen Eigenschaften von Aerosolen und den aus ihnen gebildeten Eispartikeln in jungen Zirren. Diese Eingrenzung ist Grundlage der Untersuchungen der Eisbildung (EP2.1), der Analyse von Satellitendaten hinsichtlich physikalischer und struktureller Wolkenparameter (EP3.3) und für die Initialisierung von numerischen Modellen, die eine weiterführende Interpretation der Ergebnisse erlauben (TP4).

Problemstellung

Der Einfluss von Aerosolen auf Eigenschaften von Wasserwolken war bereits Gegenstand früherer Untersuchungen. Über den Einfluss des Aerosols auf kalte (Eis-) Wolken ist dagegen nur wenig bekannt. Die Bildung von Eispartikeln kann entweder durch Gefrieren von Lösungstropfen (homogen) oder initiiert durch feste Teilchen erfolgen (heterogen). Beide Prozesse hängen stark von Temperatur, relativer Feuchte und dem Aerosol ab (z.B. Heymsfield and Miloshevich, 1995). Dabei können Ruß, Minerale, Sulfate, Staubteilchen und sogar Bakterien als Kondensationskerne wirken. Es ist unklar, welche Partikeltypen oder Komponenten die Eisbildung in Zirren dominieren (IPCC, 1999). Die alleinige Variation der Konzentration von Aerosolteilchen hat nur geringen Einfluss (Lin et al., 1998), dagegen zeigen Änderungen der Größenverteilung oder der chemischen Zusammensetzung messbare Effekte (DeMott et al., 1994).

Emissionen des Luftverkehrs lassen sich durch starke Korrelationen zwischen absorbierenden Teilchen und der Konzentration von Eiskristallen nachweisen (Ström und Ohlsson, 1998). Außerdem wird ein langsamer Anstieg der Zirrusbewölkung beobachtet, der möglicherweise mit dem Luftverkehr zusammenhängt (Boucher, 1999). Wegen der hemisphärisch asymmetrischen Verteilung des Flugverkehrs und der damit verbundenen Emissionen sind Unterschiede zwischen den Hemisphären zu erwarten. Aus Satellitendaten erkennt man für die Südhemisphäre eine deutlich niedrigere (Faktor 2 bis 5) Belastung mit Aerosolen und anthropogenen Spurengasen (Thornton et al., 1999). Unterschiede im Bedeckungsgrad von Zirren in den beiden Hemisphären können auch durch unterschiedliche meteorologische Bedingungen hervorgerufen werden. Ob die unterschiedliche Aerosolbelastung zu unterschiedlichen mikrophysikalischen Eigenschaften der Zirren führt, soll hier untersucht werden. Beispielsweise ist denkbar, dass Zirren in „sauberer“ Luft weniger aber größere Eispartikel enthalten als in „verschmutzter“ Luft. Dabei könnte die Eisübersättigung in Zirren mit kleinerer Partikelzahl größer sein.

Methoden

Instrumentierung (siehe Tabelle 1 in Kap. 1.2)

Die Flugzeuginstrumentierung besteht aus Messgeräten zur Messung der Eigenschaften von

- Eispartikeln (Größenverteilung, Konzentration, Phasenfunktion der Streuung, Eiswassergehalt),
- Aerosolpartikeln (Größenverteilung, Konzentration, Hinweise zur chemischen Zusammensetzung) innerhalb (interstitial aerosol) und außerhalb der Zirren,
- Eiskristallresiduen (Größenverteilung, Konzentration, Zusammensetzung)
- Luftmassen (Herkunft, Eigenschaften, Veränderungen).

Messstrategie

Die Messungen werden in Zirren in mittleren Breiten in Regionen mit hoher und niedriger Aerosolkonzentration (Punta Arenas im Rahmen des EU-Projekts INCA und Shannon im Projekt PAZI) bei sonst möglichst vergleichbaren Bedingungen (gleiche Breite, gleiche Jahreszeit, gleiches Messsystem, gleiche Messstrategie) durchgeführt, um so die Korrelation zwischen Aerosol- und Zirreigenschaften über einen möglichst großen Bereich von Aerosoleigenschaften zu bestimmen. Insgesamt sind 150 Flugstunden vorgesehen, davon werden 50 für Transfers benötigt, jeweils 50 Stunden stehen dann für Messflüge in Punta Arenas und Shannon zur Verfügung. Die Flugmuster für die einzelnen Missionen werden je nach Wettersituation und den meteorologischen und chemischen Vorhersagen festgelegt. Dabei werden die folgenden grundlegenden Überlegungen berücksichtigt:

- Zirren, die unter dem Einfluss großräumiger Hebung entstehen, bilden sich meist in der Nähe der Tropopause bei den niedrigsten Temperaturen. Die Messungen zur Bildung von Zirren werden an Warmfronten durchgeführt werden.
- Das Flugmuster soll so ausgelegt sein, dass Informationen über die horizontale und vertikale Variabilität der Messgrößen erfasst werden.
- Die Anbindung der Messungen sowohl an das Boden-Lidar (EP3.2) als auch an die Überflugzeiten von Satelliten (EP3.3) wird so weit wie möglich gewährleistet.
- Lagrange'sche Flugmuster, bei denen der Flugweg des Flugzeugs mit der Advektion eines Zirrenfeldes verlagert wird, sind vorgesehen, um Alterungseffekte im Detail zu untersuchen.
- Stationäre Leewellen über den Anden oder am schottischen Hochland können bei geeigneter synoptischer Luftströmung ebenfalls erreicht und vermessen werden.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

INCA wird voraussichtlich ab Januar 2000 von der EU gefördert. Die Messungen werden gemeinsam mit Dr. Johan Ström (Inst. of Applied Environmental Research, Stockholm University; Koordinator von INCA), Dr. Joelle Ovarlez (Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS) und Dr. Jean-Francois Gayet (Laboratoire de Météorologie Physique, Uni Clermont Ferrand) durchgeführt, außerdem tragen NILU mit meteorologischen Vorhersagen und die Universität Helsinki mit Modellrechnungen bei. Außer dem Fachkoordinator werden insbesondere Dr. H. Schlager (Stickoxide, Ozon, Kohlenmonoxid), Dr. A. Petzold (Aerosole) und Prof. U. Schumann (wissenschaftliche Koordination) mit weitere Mitarbeiter an diesem Vorhaben beteiligt sein. Dabei kann auf den Erfahrungen aus den Messungen bei AEROCONTRAIL, SULFUR1-6 und POLINAT aufgebaut werden (z.B. Schlager et al., 1999; Schumann et al., 2000). Prof. Schumann war bzw. ist wissenschaftlicher Koordinator der EU-Projekte AERONOX (1992-1994), POLINAT (1994-1996), POLINAT 2 (1996-1998) und EULINOX (1998-2000) und ist am EU-Projekt CHEMICON (1998-2000) beteiligt, das Prof. Zellner, Essen, koordiniert. Er war zudem Koordinator des DFG-Schwerpunktes „Grundlagen der Auswirkungen der Luft- und Raumfahrt auf die Atmosphäre“ (1992-1998). Zu allen diesen Projekten liegen Veröffentlichungen in Zeitschriften vor. Prof. Schumann war Co-ordinating Lead Author des Kapitel 3 zu

Aerosolen und Wolken des IPCC Reports (1999) und ist Mitglied des ‚Scientific Steering Committee‘ des ‚Global Energy and Water Cycle Experiment‘ (GEWEX), das sich u.a. mit der Rolle von Wasserdampf und Zirren im Klimasystem befaßt.

Die Messungen auf der Südhemisphäre werden international erstmalig durchgeführt. Bisher liegen südlich von 20°S keine In-situ-Messdaten von Zirren vor. Für die Messungen wird das Forschungsflugzeug Falcon des DLR genutzt, das bereits bei einer großen Zahl von Messflügen mit vergleichbaren Aufgaben eingesetzt worden ist. Die Instrumentierung ist gut erprobt und wurde bereits vorher erfolgreich angewendet (z.B. Petzold et al., 1997; Gayet et al., 1998; Schlager et al., 1999; Ovarlez and Velthoven, 1997; Ström and Ohlsson, 1998).

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Datenauswertung Experiment Punta Arenas

Die Messungen auf der Südhemisphäre in Punta Arenas/Chile werden im April 2000 durchgeführt und sind bei Beginn von PAZI bereits beendet, aber noch nicht im Detail ausgewertet. Vor Beginn der 2. Messphase in Shannon sollen die Ergebnisse soweit zusammengefasst und bewertet werden, dass eventuelle Fehler nicht wiederholt werden bzw. die Messstrategie optimiert werden kann.

- M1: Vorläufige Daten der Messkampagne Punta Arenas in Datenbank verfügbar
- M2: Strategie-Treffen der Partner

Arbeitspaket 2: Messkampagne Shannon

Die Messkampagne auf der Nordhemisphäre wird von Shannon/Irland aus durchgeführt. Vorgesehen sind ca. 50 Flugstunden inklusive der Transferflüge.

- M3: Abschluss des Messkampagne

Arbeitspaket 3: Datenauswertung Experiment Shannon

Die Rohdaten werden als Quicklook unmittelbar in einer Datenbank gespeichert. Die endgültigen Daten werden zunächst einer Nacheichung und einer Qualitätskontrolle unterzogen, bevor sie in der Datenbank abgelegt werden.

- M4: Quicklook-Daten verfügbar
- M5: Endgültige Daten beider Kampagnen in Datenbank verfügbar

Arbeitspaket 4: Datensynthese und wissenschaftliche Auswertung/Interpretation

Nach dem Vorliegen aller Daten werden bei einem Treffen aller beteiligten Wissenschaftler die Ergebnisse präsentiert und die weiteren Arbeitsschritte zur wissenschaftlichen Interpretation verabredet. Schwerpunkte bilden hierbei die hemisphärischen Unterschiede und der Einfluss unterschiedlicher Luftmassen auf die Bildungsmechanismen und Eigenschaften von Zirren. Ein Arbeitstreffen mit Gruppen, die die Zirrenbildung in numerischen Modellen behandeln, soll die weitere Nutzung der Messdaten stimulieren.

- M6: Arbeitstreffen zur Analyse der Ergebnisse
- M7: Arbeitstreffen zur Modellierung
- M8: Abschluss der wissenschaftlichen Auswertung

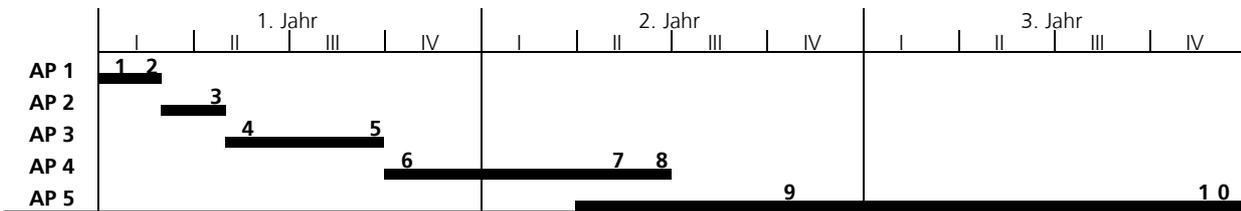
Arbeitspaket 5: Publikation der Ergebnisse und Schlussbericht

Sowohl für das EU-Vorhaben als auch für dieses Projekt werden detaillierte wissenschaftliche Ergebnisberichte erstellt, die neuen Erkenntnisse werden außerdem in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert. Darüber hinaus ist die Präsentation erster Ergebnisse auf der EGS-Tagung im Frühjahr 2001 geplant.

- M9: Abgabe Bericht EU-Projekt und der Datenbank mit Messdaten beider Kampagnen

- M10: Abgabe Endbericht

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 2.5 | 2 | 1 | 5.5 | 0 | 1.100 |

In EP3.1 müssen mehrere erfahrene Wissenschaftler und Techniker aus DLR-PA und DLR-FB mitarbeiten. Der erhöhte Aufwand in den beiden ersten Jahren ist zur Durchführung und Auswertung der Experimente notwendig. Die von der EU zur Durchführung der Feldexperimente für INCA bereitgestellten Mittel decken weniger als 50% der Flugkosten und nur ein Mannjahr pro Jahr (für 2 Jahre) an Personalkosten ab. Das DLR hat erhebliche Sachmittel für die Flugzeugmessungen eingeplant.

Literatur

- Boucher, O., Air traffic may increase cirrus cloudiness, *Nature* **397**, 30-31, 1999.
- DeMott, P.J., M.P. Meyers, and W.R. Cotton, Parameterization and impact of ice initiation processes relevant to numerical model simulations of cirrus clouds., *J. Atmos. Sci.* **51**, 77-90, 1994.
- Gayet, J.-F., F. Auriol, S. Oshchepkov, F. Schröder, C. Duroure, G. Febre, J.-F. Fournol, O. Crepel, P. Personne, and D. Daugereon, In situ measurements of the scattering phase function of stratocumulus, contrails and cirrus, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 971-974, 1998.
- Heymsfield, A.J. and L.M. Miloshevich, Relative humidity and temperature influences on cirrus formation and evolution: Observations from wave clouds FIRE II. *J. Atmos. Sci.* **52**, 4302-4326, 1995.
- IPCC, *Aviation and the Global Atmosphere, Special Report* [J.H. Houghton et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Lin, H, K.J. Noone, J. Ström, and A.J. Heymsfield, Small ice crystals in cirrus clouds: a model study and comparison with in situ observations. *J. Atmos. Sci.* **55**, 1928-1939, 1998.
- Ovarlez, J. and P. van Velthoven, Comparison of water vapor measurements with data retrieved from ECMWF analyses during POLINAT experiment, *J. Appl. Meteor.* **36**, 1329-1335, 1997.
- Petzold, A., R. Busen, F.P. Schröder, R. Baumann, M. Kuhn, J. Ström, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, D. Baumgardner, F. Arnold, S. Borrmann, and U. Schumann**, Near-field measurements on contrail properties from fuels with different sulfur content, *J. Geophys. Res.* **102**, 29867-29880, 1997.
- Schlager, H., P. Schulte, F. Flatoy, F. Slemr, P. van Velthoven, H. Ziereis, and U. Schumann**, Regional nitric oxide enhancements in the North Atlantic flight corridor observed and modeled during POLINAT 2 - A case study, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3061-3064, 1999.
- Schumann U., Schlager H., Arnold F., Baumann R., Haschberger P., and Klemm O.**: Dilution of aircraft exhaust plumes at cruise altitudes, *Atmospheric Environment*, **32**, 3097-3103, 1998.
- Schumann, U., H. Schlager, F. Arnold, J. Ovarlez, H. Kelder, Ø. Hov, G. Hayman, I.S.A. Isaksen, J. Staehelin, and P.D. Whitefield**, Pollution from aircraft emissions in the North Atlantic flight corridor: Overview on the POLINAT projects, *J. Geophys. Res.*, im Druck, 2000.
- Ström, J. and S. Ohlsson, In situ measurements of enhanced crystal number densities in cirrus clouds caused by aircraft exhaust. *J. Geophys. Res.* **103**, 11355-11361, 1998.
- Thornton, D. C., A.R. Bandy, B. W. Blomquist, A. R. Driedger, T. P. Wade, Sulfur dioxide distribution over the Pacific Ocean 1991-1996, *J. Geophys. Res.* **104**, 5845-5854, 1999.

4.3.2 Lidaranalyse von Zirren bei INCA

Fachkoordination Prof. Dr. O. Schrems, AWI-SPCA
Zuordnung TP3 – Aerosol-Zirren-Messungen

Ziele

Ziele dieses Einzelprojektes sind die Bestimmung der Auftrittshäufigkeit von Zirruswolken, die Untersuchung ihrer räumlichen Struktur und zeitlichen Variabilität, sowie eine mikrophysikalische Charakterisierung der Wolkenpartikel an Messstandorten in Korrelation mit In-situ- und Satelliten-Messungen in der Süd- und Nordhemisphäre. Diese Ziele sollen mit dem mobilen Aerosol-Raman-Lidar MARL des AWI (Schäfer et al., 1995) durch bodengestützte Beobachtungen von Zirruswolken und Aerosolen in der mittleren und oberen Troposphäre erreicht werden. Während einer Meridionalschnittfahrt des Forschungsschiffes „POLARSTERN“ und einer Messkampagne in den Tropen (Merida, Venezuela) sollen Erkenntnisse über tropische Zirruswolken und die Breitenabhängigkeit von Zirruseigenschaften und -häufigkeiten gewonnen werden. Zur Bestimmung von mikrophysikalischen Partikeleigenschaften werden Ergebnisse der In-situ-Messungen auf der Falcon (EP3.1), Satellitenbeobachtungen (EP3.3) und Wolkenkammerexperimente (EP2.1) herangezogen.

Problemstellung

Lidarmessungen liefern wichtige Aufschlüsse über vertikale Struktur und zeitlich-horizontale Variationen von Zirruswolken. Während auf der Nordhemisphäre eine gute Lidardatenbasis für Zirrusuntersuchungen existiert, sind Datensätze in entsprechender Quantität und Qualität auf der Südhemisphäre noch nicht verfügbar. Bisher gibt es nur wenige Messungen, bei denen Lidarmessungen gleichzeitig mit In-situ-Messungen genutzt wurden. Auf der Südhemisphäre fehlen solche korrelierten Messungen ganz (Platt et al., 1987; Sassen et al., 1989; Ansmann et al., 1992; Beyerle, et al., 1998). Von Satellitenmessungen ist bekannt, dass in mittleren Breiten und den Tropen optisch dünne Zirruswolken („subvisual cirrus“) sehr häufig auftreten. Ihre Bildungsmechanismen und mikrophysikalischen Eigenschaften sowie ihre Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt sind jedoch noch nicht genau verstanden. Auch der Einfluss von Teilchenform und -größe auf die beobachtete Aerosoldepolarisation und deren Wellenlängenabhängigkeit ist eine offene Frage.

Methoden

MARL liefert Höhenprofile des Rückstreukoeffizienten, des Extinktionskoeffizienten und der Volumendepolarisation bei Wellenlängen von 355 und 532 nm mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Minuten und einer vertikalen Auflösung von 10-100 m. Zur Zeit ist das Instrument für Nachtmessungen ausgelegt. Modifikationen an der Empfangsoptik sollen während der geplanten Messkampagnen auch die Durchführung von Tageslichtmessungen erlauben. Aus den primären Messgrößen lassen sich (zum Teil unter Verwendung von zusätzlichen Informationen) Rückstreuverhältnis, Aerosoldepolarisation, optische Dicke, Temperatur (oberhalb 25-30 km) und Wasserdampfmischungsverhältnis (unterhalb 5-8 km) berechnen. Aufschlüsse über die Form der Eispartikel sollen anhand der Wellenlängenabhängigkeit der Aerosoldepolarisation abgeleitet werden. Nach den Erfahrungen vergangener Kampagnen kann je Messwoche mit etwa 30-50 Messstunden (etwa 350-600 Einzelprofilen) gerechnet werden.

Die Messresultate werden mit folgender Zielsetzung analysiert:

Auftrittshäufigkeiten von Zirren

Werte des Rückstreuverhältnisses größer 1 weisen auf das Vorhandensein von Aerosolen oder Wolkenpartikeln hin. Treten in der Wolke Eiskristalle auf, ermöglicht die Analyse der Volumen- bzw. Aerosoldepolarisation, die Nachweisgrenze um mindestens eine Größenordnung zu verbessern (Sassen, 1991). Aus den Daten der 3 Messkampagnen wird die Auftrittshäufigkeit von Zirruswolken in Abhängigkeit von optischer Dicke, vom Farbverhältnis und von der geographischen Breite (während der „POLARSTERN“-Meridionalschnittfahrt) bestimmt.

Räumliche und zeitliche Variabilität

Lidarmessungen haben in der Vergangenheit die hohe räumliche und zeitliche Variabilität von Zirren dokumentiert (Platt et al., 1987, Ansmann et al., 1993). Horizontale Längenskalen von wenigen 100 m und vertikale Skalen von wenigen 10 m konnten beobachtet werden. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen insbesondere in den Tropen den hohen Anteil von optisch dünnen Zirrenschichten mit optischen Dicken von weniger als 0.03 bei 532 nm (Sassen et al., 1989).

Mikrophysikalische Charakterisierung

Die Bestimmung der Größe von Zirruswolkenpartikeln ist ein wichtiges Element für das Verständnis der Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt (Liou, 1986, Stephens et al., 1990). Kenntnis der Teilchenoberflächendichte ist relevant für die Abschätzung der Bedeutung heterogener chemischer Reaktionen an den Oberflächen von Eisteilchen (Borrmann et al., 1996). Mit Hilfe der In-situ-Messergebnisse (EP3.1) und der Streurechnungen für nicht-sphärische Teilchen (z.B.: T-Matrix-Verfahren, Verfahren der geometrischen Optik) sollen die Lidardaten, insbesondere die Wellenlängenabhängigkeit des Aerosolrückstreukoeffizienten und der Aerosoldepolarisation, interpretiert werden (Mishchenko et al., 1996). An ausgewählten Beobachtungsdaten sollen auf der Basis der Raman-Signale Höhenprofile des Aerosolextinktionskoeffizienten berechnet werden. Unter der Annahme, dass die Partikeldimensionen ein Vielfaches der Lidar-Wellenlängen von 355 und 532 nm betragen, soll aus dem Aerosolextinktionskoeffizienten das Verhältnis von Eiswassergehalt und effektivem Radius bestimmt werden. Die Experimente in EP2.1 erlauben erstmals die Bestimmung der Aerosoldepolarisation für verschiedene Streuwinkel an Eispartikeln unter kontrollierten Bedingungen. Auf der Basis dieser Daten soll ein besseres Verständnis der Lidardepolarisationsmessungen erreicht werden.

Vergleich mit Satellitendaten

Das Satelliteninstrument SAGE II liefert Höhenprofile des Aerosolextinktionskoeffizienten bei Wellenlängen von 1020 nm, 525 nm, 453 nm und 385 nm. Der fast 15 Jahre umfassende SAGE II-Datensatz ermöglicht es, die Ergebnisse der Messkampagnen in das längerfristige Klimageschehen einzuordnen. Hochauflösende Aufnahmen der satellitengetragenen AVHRR-Instrumente erlauben die zeitliche und räumliche Zuordnung von Satelliten- und Lidarmessung. Die Analyse der AVHRR-Daten soll durch Lidarmessungen von Wolkenhöhen und optischen Dicken unterstützt werden (EP3.3).

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Lidarmessungen sind ein integraler Bestandteil der Atmosphärenforschung am AWI. Seit mehr als 10 Jahren werden operationelle Beobachtungsprogramme an den AWI-Polarstationen durchgeführt. Als mobile Messplattform steht das Forschungsschiff „POLARSTERN“ zur Verfügung. Zur Interpretation der Beobachtungsdaten werden Atmosphärenmodelle unterschiedlicher Komplexität eingesetzt. AWI betreibt seit 1988 Lidar-Instrumente in der Arktis zur Beobachtung von stratosphärischen Aerosolen, polaren Stra-

tosphärenwolken und stratosphärischem Ozon. MARL hat an Messkampagnen an Bord von „POLARSTERN“ im Nord- und Südatlantik (ALBATROSS-Kampagne, Herbst 1996), in Südkalifornien (STRAIT'97-Kampagne im Frühjahr 1997 an der Table Mountain Facility/Jet Propulsion Laboratory) und in der Arktis (NAOMI-Kampagne im Winter 1997/98 in Ny-Ålesund, Spitzbergen) erfolgreich teilgenommen (Beyerle et al., 1998; 1999).

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Datenauswertung der Messkampagne Punta Arenas, Chile

- M1: Datensatz Punta Arenas

Arbeitspaket 2: Messkampagne "POLARSTERN"-Meridionalschnittfahrt

- M2: Vorbereitung und Durchführung
- M3: Datensatz Meridionalschnitt

Arbeitspaket 3: Messkampagne Shannon, Irland

- M4: Vorbereitung und Durchführung
- M5: Datensatz Shannon

Arbeitspaket 4: Messkampagne Merida, Venezuela

- M6: Vorbereitung und Durchführung
- M7: Datensatz Merida

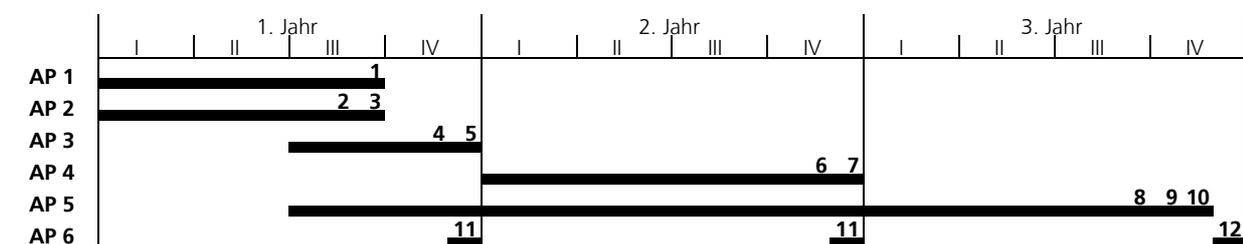
Arbeitspaket 5: Analysen und Vergleiche mit anderen Messungen

- M8: Analyse und Interpretation der Depolarisationsmessungen
- M9: Vergleich mit In-situ-Messungen (Flugzeug)
- M10: Vergleich mit Satellitendaten

Arbeitspaket 6: Dokumentationen

- M11: Zwischenberichte
- M12: Endbericht

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|-----|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 2 | 1.5 | 1 | 4.5 | 0 | 900 |

Während der ersten 1,5 Jahre der Projektlaufzeit werden zwei auf diese Kampagneneinsätze spezialisierte Wissenschaftler zur Vorbereitung und Durchführung der Messungen benötigt. In der zweiten Hälfte ist ein auf diesem Gebiet ausgewiesener Wissenschaftler für Auswertung und Dateninterpretation erforderlich. Ergänzende Grundfinanzierung: Für Investitionen, Verbrauchsmittel und Kampagnen 150 TDM während der Projektlaufzeit. Es erfolgt keine

Zusatzfinanzierung aus Drittmitteln. Dies rechtfertigt den Einsatz von insgesamt 4.5 Personaljahren in PAZI.

Literatur

- Ansmann, A., U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis, Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar, *Appl. Opt.* **31**, 7113-7131, 1992.
- Beyerle, G., H.-J. Schäfer, R. Neuber, O. Schrems,** and I. S. McDermid, Dual wavelength lidar observation of tropical high-altitude cirrus clouds during the ALBATROSS 1996 campaign, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 919-922, 1998.
- Beyerle, G., M.R. Gross, D.A. Haner, N.T. Kjöme, I.S. McDermid, T.J. McGee, J.M. Rosen, H.-J. Schäfer,** and O. Schrems, A lidar and backscatter sonde aerosol measurement campaign at Table Mountain during February-March 1997: Observations of stratospheric background aerosols and cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.* zur Veröffentlichung eingereicht, 1999.
- Borrmann, S., S. Solomon, J.E. Dye, and B. Luo, The potential of cirrus clouds for heterogeneous chlorine activation, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2133-2136, 1996.
- Liou, K., Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1167-1199, 1986.
- Mishchenko, M.I., L.D. Travis, and D.W. Mackowski, T-Matrix computations of light-scattering by nonspherical particles - A review, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **55**, 535-575, 1996.
- Platt, C.M. R., J.C. Scott, and A.C. Dilley, Remote sensing of high clouds. Part VI: Optical properties of midlatitude and tropical cirrus, *J. Atmos. Sci.* **44**, 729-747, 1987.
- Sassen, K., M.K. Griffin, and G.C. Dodd, Optical scattering and microphysical properties of subvisual cirrus clouds, and climatic implications, *J. Appl. Meteorol.* **28**, 91-98, 1989.
- Sassen, K., The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **72**, 1848-1866, 1991.
- Schäfer, H.-J., O. Schrems, G. Beyerle, B. Hofer, W. Mildner, F.A. Theopold, W. Lahmann, C. Weitkamp,** and M. Steinbach, A modular and mobile multi-purpose lidar system for observation of tropospheric and stratospheric aerosols, *SPIE EurOpto series* **2581**, 128-136, 1995.
- Stephens, G.L., S.C. Tsay, P.W. Stackhouse, and P.J. Flatau, The relevance of the micro-physical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climate feedback, *J. Atmos. Sci.* **47**, 1742-1753, 1990.

4.3.3 Satellitenfernerkundung von Zirren

Fachkoordination Dr. P. Wendling, DLR-PA
Zuordnung TP3 – Aerosol-Zirren-Messungen

Ziele

Ziel dieses Einzelprojektes ist die Bestimmung klimarelevanter Eigenschaften von Zirruswolken (Bedeckungsgrad, Höhe, optische Dicke und effektive Partikelgröße) mit Hilfe von Messungen satellitengetragener Instrumente in den für die Messkampagne INCA vorgesehenen Messgebieten sowie in weiteren Gebieten auf der Nord- und Südhemisphäre.

Problemstellung

Es gibt bisher keine auf Satellitenbeobachtungen beruhende und globale Erfassung der optischen und mikrophysikalischen Eigenschaften (optische Dicke, effektive Partikelgröße) von Zirruswolken, die im Hinblick auf die in der Nord- und Südhemisphäre unterschiedliche Aerosolbelastung der Atmosphäre analysiert wurde. Zwar liegt eine globale Übersicht für die genannten Größen von Han et al. (1997) auf der Basis von NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration / Advanced Very High Resolution Radiometer) Daten in den Spektralkanälen 1 und 3 für einzelne jahrszeittypische Monate vor, der Zusammenhang mit dem Aerosolangebot wurde allerdings nicht untersucht. Die Ergebnisse zeigen für optische Dicken größer als 10 und besonders für mittlere Breiten eine deutliche Korrelation zwischen effektiver Partikelgröße und Wolkentemperatur, eine Korrelation, die man aufgrund des mit der Temperatur anwachsenden Eisgehaltes erwarten würde. In den Tropen ergibt sich insbesondere bei konvektiver Bewölkung eine negative Korrelation der genannten Größen.

Die Bestimmung der effektiven Partikelgröße aus Satellitendaten ist für Zirruswolken durch die Vielfalt der in der Atmosphäre auftretenden Eispartikelformen äußerst schwierig und bis heute nur mit großen Unsicherheiten möglich. Vergleiche von aus Satellitenmessungen bestimmten Partikelgrößen mit solchen, die aus In-situ-Messungen abgeleitet wurden, zeigen, dass man nur dann eine relativ gute Übereinstimmung erhält, wenn man die optischen Eigenschaften auf der Basis der hexagonalen Struktur der Eiskristalle berechnet (Ou et al., 1995). Direkte, flugzeuggetragene Messungen des Streuverhaltens von Partikeln in Eiswolken deuten ebenfalls daraufhin, dass das Streuverhalten unter der Annahme kugelförmiger bzw. ellipsoidischer Wolkenpartikel nicht erklärt werden kann (Francis et al., 1998).

In den bisher gebräuchlichen Verfahren zur Bestimmung der effektiven Partikelgröße aus Satellitendaten werden die Streueigenschaften der Cirruspartikel mit Näherungsmethoden berechnet, wobei Ou et al. (1995) das Streuverhalten kleiner hexagonaler Eispartikel durch dasjenige ellipsoidischer oder großer hexagonaler Partikel mit Methoden der geometrischen Optik approximieren. Neuere Arbeiten berücksichtigen zwar in allen Größenbereichen die hexagonale Partikelstruktur, sind aber zur Berechnung der Streueigenschaften immer noch auf Näherungen angewiesen (King et al., 1996; Baran et al., 1999). Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Entwicklung eines exakten Verfahrens zur Berechnung des Streuverhaltens hexagonaler Eiskristalle, mit Hilfe dessen sich der Gültigkeitsbereich der genannten Näherungsmethoden bestimmen läßt. Ein solches Verfahren soll basierend auf der Arbeit von Rother (1998) entwickelt und in einem ebenfalls neu zu entwickelnden Retrieval zur Bestimmung von optischer Dicke und effektiver Partikelgröße aus Satellitendaten angewandt werden.

Methoden

Zur Berechnung der optischen Eigenschaften von Eispartikeln wird ein exaktes Verfahren entwickelt, das auf der Verallgemeinerung der Methode der Separation der Variablen (Rother, 1998) beruht und besonders effektiv im Rayleigh- und Resonanzbereich arbeitet. Bei dieser Methode werden die bekannten separablen Lösungen der Helmholtzgleichung zur Entwicklung der internen und externen Streufelder verwendet sowie die Stetigkeitsbedingungen der tangentialen Feldkomponenten an der Streueroberfläche zur Ableitung eines Gleichungssystems zur Bestimmung der Entwicklungskoeffizienten genutzt.

In Verbindung mit einem vorhandenen Strahlungstransportmodell, das auf der Matrix Operator Methode (Plass et al., 1973) beruht, soll weiter ein neues Verfahren zur Fernerkundung wolkenphysikalischer und optischer Parameter von Eiswolken (optische Dicke und effektive Partikelgröße) entwickelt und angewandt werden. Für das Verfahren sollen sowohl Spektralkanäle der Satelliteninstrumente NOAA/AVHRR, ERS-2/ATSR-2 (European Remote Sensing Satellite; Along Track Scanning Radiometer) und später auch MSG/SEVIRI (Meteosat Second Generation; Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) im solaren (0.6 und 1.6 μm) als auch im terrestrischen Spektralbereich (3.6, 10 und 11 μm) aufbauend auf den Arbeiten von Twomey und Seton (1980) und Ou et al. (1995) genutzt werden. Die während INCA vorgesehenen wolkenmikrophysikalischen In-situ- und Lidarmessungen bieten die Möglichkeit zur Validierung des neuen Retrievals.

Zur Bestimmung des Wolkenbedeckungsgrades ist bereits ein Verfahren als Teil des Wolken-detections- und -klassifizierungsalgorithmus APOLLO (AVHRR Processing of Clouds over Land and Ocean, Kriebel et al., 1989) vorhanden und durch langjährigen Einsatz erprobt. Gebiete mit Kondensstreifen, also Gebiete mit hoher, flugverkehrsbedingter Aerosolbelastung werden in den Satellitendaten mit Hilfe eines von der DLR entwickelten rechnergestützten Algorithmus (Mannstein et al., 1999) automatisch erkannt. Die in den entsprechenden Gebieten sich ausbreitenden Cirruswolken können dann hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert werden. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Zusammenarbeit mit EP 4.2.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Der Fachkoordinator besitzt langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Strahlungsübertragung der Atmosphäre, Strahlungsmessung in der bewölkten Atmosphäre und der Anwendung der geometrischen Optik zur Berechnung der Streueigenschaften hexagonaler Eiskristalle. Während der vergangenen Jahre hat er grundlegende Arbeiten zur Charakterisierung der Kondensstreifenbewölkung unter Nutzung von Satelliten- und flugzeuggetragenen In-situ-Messungen durchgeführt (Mannstein et al., 1999; Strauss et al., 1997). Die dabei gewonnenen Ergebnisse haben maßgeblich zum Bericht des IPCC über die Auswirkungen des Luftverkehrs beigetragen (IPCC, 1999; Meerkötter et al., 1999). Der Fachkoordinator ist Mitglied der Radiation Commission der International Association of Meteorology and Atmospheric Physics.

Die in EP3.3 weiter beteiligten Mitarbeiter (R. Meerkötter, DLR-PA; T. Rother und K. Schmidt, DLR-DFD) besitzen langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Modellierung des Strahlungstransportes (Meerkötter et al., 1999) und bei der Behandlung der Streuung elektromagnetischer Wellen an nicht-sphärischen Teilchen, insbesondere an Eiskristallen in Zirren (Rother, 1998; Rother et al., 1999). Von Rother und Schmidt sind darüberhinaus die theoretischen Voraussetzungen zur exakten Lösung des Streuproblems an beliebig geformten Teilchen, die keine Symmetrie in ihrer Form mehr aufweisen, geschaffen worden.

Zur Analyse von Satellitendaten wurde das APOLLO-System zur Wolkenerkennung, -klassifizierung und -parameterbestimmung in AVHRR Daten entwickelt (Kriebel et al., 1989) und dieses wird gerade hinsichtlich der Nutzung von ATSR Daten erweitert. APOLLO wird seit etwa 10 Jahren von DLR-PA und DFD betrieben und weiterentwickelt (Kriebel et al., 1999). Zur Zeit wird damit eine 15-jährige, hochaufgelöste Wolkenklimatologie für Europa erstellt. Von H. Mannstein, der ebenfalls an dem Vorhaben mitarbeitet, wurden grundlegende Arbeiten zur Erkennung und Analyse von Kondensstreifen aus Satellitendaten (Mannstein et al., 1999) durchgeführt.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Unterstützung der INCA Feldmessungen

Die erfolgreiche Durchführung von Flugzeugmessungen erfordert vor allem in Gebieten, deren Atmosphärenzustand nicht durch dichte Radiosondenmessungen bekannt ist, die Unterstützung der Missionsplanung durch die Daten von Wettersatelliten. Die speziellen Anforderungen für die Missionsplanung werden durch die Standardprozessierung üblicher Satellitenempfangssysteme meist nicht erfüllt. Gleichzeitig sollen alle Satellitendaten (NOAA/AVHRR- und ATSR2-Daten) für die spätere Auswertung gesichert werden.

- M1: Satellitendaten Punta Arenas prozessiert
- M2: Satellitendaten Shannon prozessiert

Arbeitspaket 2: Analyse wolkenphysikalischer und optischer Parameter von Zirren

Auf der Basis einer neuen Theorie zur Beschreibung der Streuung elektromagnetischer Wellen an endlichen hexagonalen Eiskristallen (Rother, 1998) und unter Nutzung eines Strahlungstransportmodells wird ein neues Verfahren zur Bestimmung der optischen Dicke und der effektiven Partikelgröße für Zirruswolken aus Satellitendaten entwickelt. Hierfür werden sowohl Spektralkanäle im sichtbaren wie auch im terrestrischen Spektralbereich genutzt. Das neue Verfahren wird mit den während der Messkampagne INCA gewonnenen In-situ-Messungen validiert und dann auf Satellitendaten der Nord- und Südhemisphäre angewandt. Für das Retrieval wird in der Anfangsphase des Vorhabens zur Berechnung der optischen Eiskristalleigenschaften zunächst eine Approximation verwendet (Rother et al., 1999). Die Interpretation der aus den Satellitendaten bestimmten Wolkenparameter erfolgt in Zusammenarbeit mit EP 4.2

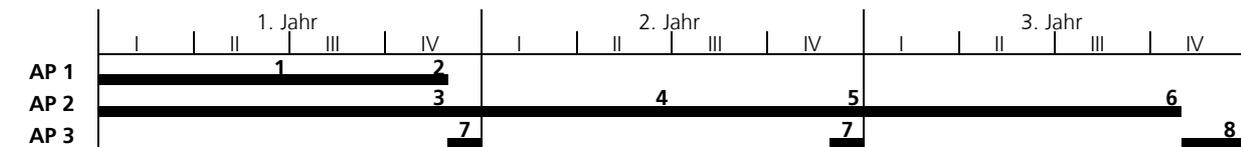
- M3: approx. Retrieval für optische Dicke, Partikelgröße entwickelt und validiert
- M4: exakte Streutheorie entwickelt und getestet
- M5: exaktes Retrieval für optische Dicke, Partikelgröße entwickelt und validiert
- M6: Analyse, Interpretation der Cirrusparameter, Vergleich mit In-situ- und Lidarmessungen

Arbeitspaket 3: Berichte und Publikationen

Erstellen von Zwischenberichten und Endbericht; Teilnahme an Tagungen und Workshops; wissenschaftliche Publikationen.

- M7: Zwischenbericht fertig
- M8: Endbericht mit Beschreibung der archivierten und analysierten Satellitendaten fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 600 |

Das Vorhaben benötigt mehrere erfahrene Wissenschaftler und die Zusammenarbeit mit dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum. Dafür ist der Personalaufwand erforderlich.

Baran, A.J., S.J. Brown, J.S. Foot, D.L. Mitchell, Retrieval of tropical cirrus thermal optical depth, crystal size, and shape using a dual-view instrument at 3.7 and 10.8 μm . *J. Atmos. Sci.* **56**, 92-110, 1999.

Francis, P.N., P. Hignett, and A. Macke, The retrieval of cirrus cloud properties from aircraft multi-spectral reflectance measurements during EUCREX'93. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **124**, 1273-1291, 1998.

Han, Q., J. Chou, and R.M. Welch, Ice cloud microphysics and temperature dependence retrieved from satellite data. *SPIE* **3220**, 39-44, 1997.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Aviation and the Global Atmosphere. Special Report, Cambridge University Press., 1999.

Kriebel, K.T., R.W. Saunders, G. Gesell, Optical properties of clouds derived from fully cloudy AVHRR pixels. *Contr. Atmos. Phys.* **8**, 165-171, 1989.

Kriebel, K.T., G. Gesell, M. Kästner, H. **Mannstein**: The Cloud Analysis Tool APOLLO: Improvements and Validations, DLR IPA Report 128, eingereicht bei *Int. Journal of Remote Sensing*, 1999.

King, M.D., S.C. Tsay, S.E. Platnick, M. Wang, K.N. Liou, Cloud retrieval algorithms for MODIS: Optical thickness, effective particle radius, and thermodynamic phase. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-05, pp. 63, 1996.

Mannstein, H., R. **Meyer**, and P. **Wendling**, Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing* **20**, 1641-1660, 1999.

Meerkötter, R., U. Schumann, D.R. Doelling, P. Minnis, T. Nakajima, Y. Tsushima, Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophysicae*, **17**, 1080-1094, 1999.

Ou, S.C., K.N. Liou, Y. Takano, N.X. Rao, Q. Fu, A.J. Heymsfield, L.M. Miloshevich, B. Baum, and S.A. Kinne, Remote sounding of cirrus cloud optical depth and ice crystal sizes from AVHRR data: verification using FIRE II IFO measurements. *J. Atmos. Sci.* **52**, 4143-4158, 1995

Plass, G.N., G.W. Kattawar, and F.E. Catchings, Matrix operator theory of radiative transfer. 1: Rayleigh scattering. *Appl. Opt.* **12**, 314-329, 1973.

Rother, T., Generalization of the separation of variables method for non-spherical scattering on dielectric objects, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **60**, 335-353, 1998.

Rother, T., S. Havemann, and K. **Schmidt**, Scattering of plane waves on finite cylinders with non-circular cross-sections. In Kong, J. A. (ed.), *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, **23**, EMW Publishing Cambridge, Massachusetts, USA, 79-105, 1999.

Strauss, B., R. Meerkötter, B. Wissinger, P. **Wendling**, M. Hess, On the regional climatic impact of contrails: microphysical and radiative properties of contrails and natural cirrus clouds. *Ann. Geophysicae* **15**, 1457-1467, 1997.

Twomey, S. and K.J. Seton, Inference of gross microphysical properties of clouds from spectral reflectance measurements. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1065-1069, 1980.

4.4 Aerosol-Zirren-Modellierung

4.4.1 Prozessmodellierung Aerosole und Zirren

Fachkoordination Priv.-Doz. Dr. B. Kärcher, DLR-PA
Zuordnung TP4 – Aerosol-/Zirren-Modellierung

Ziele

Das Ziel dieses Einzelprojektes ist die Interpretation der Gefrierexperimente in der Aerosol-Wolkenkammer AIDA des FZK (EP2.1) sowie die Übertragung der Messergebnisse auf atmosphärische Bedingungen unter Berücksichtigung der In-situ-Messungen aus TP2. Damit trägt EP4.1 zur Erforschung der Aerosol-Zirren-Wechselwirkung, einem wichtigen Ziel des Gesamtprojektes, durch numerische, prozess-orientierte Simulationen bei.

Problemstellung

Die homogene Nukleation von Eiskristallen in flüssiger Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$) wurde im Labor eingehend untersucht (Koop et al., 1998) und kann im Einzelfall Feldmessungen zur Zirrenbildung erklären (Jensen et al., 1994). Details über die chemische Zusammensetzung von Aerosolen im Bereich der Tropopause, die die Gefrierereigenschaften der Partikel wesentlich bestimmt, sind jedoch kaum bekannt (Kärcher and Solomon, 1999). In-situ-Messungen zeigen, dass Partikel in der oberen Troposphäre im wesentlichen (zu etwa 75%) aus Sulfat bestehen und dass die oberhalb von 5 km selten vorkommenden Eiskerne (IN) zu 3/4 aus Silikaten bestehen (Sheridan et al., 1994). Neuere Partikelanalysemethoden zeigen weitere chemische Komponenten, darunter organische Substanzen und Ruß (Murphy et al., 1998). Es ist unklar, ob und wie solche gelösten Spurenstoffe das Gefrierverhalten der Aerosolteilchen modifizieren. Über die Rolle ammonisierter Sulfataerosole bei der heterogenen Initiierung der Eisphase ist ebenfalls nur wenig bekannt. Heterogenes Gefrieren kann zu sehr verschiedenen mikrophysikalischen Eigenschaften der Zirren gegenüber homogenem Gefrieren führen (DeMott et al., 1997). Die Anzahl aktiver IN in der oberen Troposphäre ist nicht immer vernachlässigbar klein (etwa <1 IN/Liter) (Rogers et al., 1998); bereits geringe Mengen können die Zirruseigenschaften modifizieren. Eine wichtige, möglicherweise als heterogene Gefrierkerne wirkende Teilchenart, stellen Rußteilchen aus Flugzeugen dar (Kärcher et al., 1996).

Modellrechnungen weisen darauf hin, dass selbst kurzlebige Kondensstreifen die spektrale und chemische Verteilung eines Aerosolgemisches stark verändern können (Yu and Turco, 1998). Die anfängliche Größenverteilung der ultrafeinen Flugzeugpartikel wird durch die Eiskristallbildung (bei der Wasserübersättigung überschritten wird) modifiziert und zu größeren Partikeldurchmessern hin verschoben. Dadurch besitzen diese Partikel eine längere Lebensdauer in der Atmosphäre und somit ein größeres Potential, als effektive IN zu wirken. Solche Effekte könnten auch in Zirren im Bereich der Tropopause auftreten. Unklar ist aber beispielsweise, ob die Gegenwart von Zirren die Aerosole „auswäscht“ (vergleichbar mit der nassen Deposition von Partikeln in Wasserwolken) oder (ähnlich wie vermutlich in Kondensstreifen) das Größenspektrum der Aerosolpartikel verändert. Dieser wichtige Teilaspekt der Aerosol-Zirrus Wechselwirkung ist bislang kaum beachtet worden. Eine weitere offene Frage ist, ob und unter welchen Bedingungen die Spurengasaufnahme (z.B. HNO_3) durch Aerosole mit der durch Eiskristalle in Zirren konkurrieren kann. Solche Phänomene hängen von den mikrophysikalischen Eigenschaften der Zirren ab, die von eiskeimbildenden Eigenschaften der Aerosolpartikel maßgeblich bestimmt werden.

Methoden

Zum Einsatz bei der Aerosol-/Wolkenmodellierung kommt ein mikrophysikalischer Simulationscode, der wahlweise als Boxmodell für stationäre Luftpakete, entlang atmosphärischer Trajektorien oder für experimentell bestimmte, thermodynamische Bedingungen der AIDA-Kammer betrieben wird. Das numerische Programm soll folgende Hauptmerkmale aufweisen:

- Größenaufgelöste, mehrkomponentige Aerosolpartikel- und Eiskristallmode
- Partikelneubildung aus der Gasphase und Gefrieren von Wassereis
- Heteromolekulare Kondensation und Verdampfung
- Thermische Koagulation innerhalb und zwischen den Partikeltypen
- Vereinfachte Gasphasenchemie für Aerosolvorläufer.

Zum Erreichen der Ziele kann auf einem komplexen numerischen Code aufgebaut werden, der bisher hauptsächlich zum Studium der Chemie und Mikrophysik in Flugzeugnachläufen eingesetzt wurde (Kärcher, 1998). Zur Behandlung der weiterführenden Fragestellungen in PAZI muss der Code jedoch in einigen wesentlichen Aspekten modifiziert werden.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Der Fachkoordinator widmet sich seit 1992 aktiv der Untersuchung der Chemie und Partikelbildung im Nachlauf von Flugzeugen sowie den chemischen Wirkungen dieser Partikel in der Atmosphäre (Kärcher, 1999). Er erstellte gemeinsam mit Prof. P. Fabian (Uni München) im Auftrag des Umweltbundesamtes eine Studie zur Bewertung der Umweltauswirkungen des Luftverkehrs (Fabian und Kärcher, 1997), wirkte bei der Begutachtung internationaler Assessments mit (Brasseur et al., 1998; Kawa et al., 1999) und agierte als Lead Author bei der Erstellung des IPCC Berichtes "Aviation and the Global Atmosphere" (IPCC, 1999). Weitere Arbeitsschwerpunkte bilden die Untersuchung physiko-chemischer Eigenschaften von Aerosolen, der Bildung und Eigenschaften unsichtbarer Zirren und heterogener chemischer Prozesse im Bereich der Tropopause (Kärcher and Solomon, 1999). Die in PAZI geplanten Arbeiten sind integraler Bestandteil eines längerfristig angelegten Forschungskonzeptes, welches zu einem tieferen Verständnis der Aerosol-Wolkenprozesse im Bereich der Tropopause beitragen soll. Der Fachkoordinator beteiligt sich mit Beiträgen zu diesen Themen an der Erstellung des IGAC Integration and Synthesis Documents als Contributing Author zum Kapitel „Atmospheric Aerosols“.

Der Fachkoordinator hat sich fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet der Modellierung des atmosphärischen Aerosols erworben, die er hier einbringt. Durch seine aktive Mitarbeit bei der Planung von Feldmesskampagnen und deren Auswertung im Team ist gewährleistet, dass die geplanten Experimente mit sehr guten Erfolgssaussichten theoretisch begleitet werden. Das breite Arbeitsfeld stellt sicher, dass die Arbeiten in EP4.1 ausgewogen in übergeordnete Forschungsthemen (Beiträge natürlicher und anthropogener Einflüsse zum Klimawandel, Charakterisierung von Partikeln an der Tropopause) eingebettet werden. Neben nationalen Forschungsprojekten stellen laufende Kooperationen des Fachkoordinators mit Forschungsgruppen des MPI Mainz, NOAA Aeronomy Laboratory, NASA Ames, der University of California in Los Angeles, der Atmospheric Environmental Research AER und der Aerodyne Research ARI die für eine erfolgreiche Bearbeitung dieses Einzelprojektes nötige Vernetzung her.

Das bestehende Boxmodell wurde bereits für erste Pilotstudien zur Eisbildung in AIDA eingesetzt. Dabei wurden das homogene Gefrierverhalten von $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ bei Temperaturen zwischen 210-230K und Drücken zwischen 100-300hPa simuliert. Die Ergebnisse wurden auf einem Workshop am 26.3.99 in Heidelberg diskutiert und unterstreichen die Möglichkeit, mit

AIDA erfolgversprechende Gefrierexperimente unter Kondensstreifen- und Zirrus-Bedingungen durchzuführen.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Modellweiterentwicklung

Partikelwachstums- und Koagulationsschema werden modifiziert, um die zuverlässige Simulation mehrerer Wachstums- bzw. Gefrierzyklen mit abwechselnder Bildung und Verdampfung von Eispartikeln zu ermöglichen. Das Wachstumsschema muss weitgehend (numerisch) diffusionsfrei sein, um artifizielle Eisbildung im simulierten Aerosol zu unterbinden. Ferner muss die Information über die Größenverteilung der Residuen der Eispartikel nach deren Auflösung erhalten bleiben; somit kann keine rein stationäre Gitterstruktur verwendet werden. Die Modifikationen greifen in die Grundstruktur des bestehenden Codes ein und sind zeitaufwendig, weswegen geprüft wird, ob eine Neuentwicklung sinnvoller ist als die beschriebenen Modifikationen. Die Rechenzeit muß optimiert werden, da die Simulationsdauern deutlich länger sind als bei früheren Anwendungen.

- M1: Über mögliche Neuentwicklung entschieden
- M2: Wachstums- und Koagulationsschema modifiziert / neu aufgebaut
- M3: Thermodynamik und Nukleationsparameter ergänzt
- M4: Laufzeitoptimierung und Tests abgeschlossen

Arbeitspaket 2: Prozessstudien zu Gefriermessungen

Geplant sind Simulationen der AIDA Gefrierexperimente, zusammen mit einer Analyse der je nach Aerosoltyp gefundenen Temperaturen und Eisübersättigungen, bei denen Eisbildung im Aerosol nachweisbar einsetzt. Nach der Kalibrierung mit Schwefelsäure-Aerosol, dessen Gefriereigenschaften gut bekannt sind, wird ein Schwerpunkt der Modellierung auf den Gefriereigenschaften von Rußpartikeln unter möglichst realen atmosphärischen Bedingungen liegen. Dabei wird Ruß mit unterschiedlichen $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ Beladungen zur Simulation eines Beschichtungseffektes betrachtet. Je nach experimentellen Möglichkeiten werden auch andere Partikel-Konfigurationen untersucht. Es ist geplant, geeignete Eisnukleationsraten zum Gebrauch in Modellen abzuleiten.

- M5: Simulationen des Schwefelsäureaerosols und des unbehandelten Rußaerosols abgeschlossen
- M6: Simulationen von Beschichtungseffekten des Ruß-Schwefelsäure-Systems abgeschlossen
- M7: Simulationen weiterer chemischer Komponenten abgeschlossen
- M8: Eisnukleationsraten aus den Messungen und Simulationen abgeleitet

Arbeitspaket 3: Prozessstudien unter atmosphärische Bedingungen

Hier werden die Ergebnisse der Gefriermessungen und abgeleiteter Nukleationsraten auf atmosphärische Bedingungen übertragen. Ergänzend bieten die In-situ-Messungen mit Partikelspektrometern und Lidar wertvolle Anhaltspunkte bei der Auswahl der zu untersuchenden Prozesse und Randbedingungen. Der Schwerpunkt in AP3 liegt auf dem Studium der Aerosolprozessierung in Zirren und Kondensstreifen und der Partitionierung von Spurenstoffen zwischen Gas- und Partikelphase.

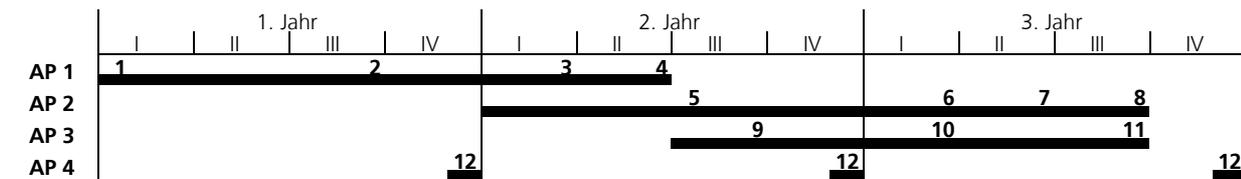
- M9 : Ergebnisse der Feldexperimente und Definition von Fallstudien gesichtet
- M10: Effekte der Prozessierung von Aerosolen in Zirren und Kondensstreifen bestimmt
- M11: Partitionierung von Spurengasen zwischen Aerosol- und Eisphase bestimmt

Arbeitspaket 4: Berichte und Publikationen

Erstellen von Zwischenberichten und Endbericht. Aktive Teilnahme an Tagungen und Workshops zu diesem Thema. Publikation der Forschungsergebnisse in referierten Fachzeitschriften.

- M12: Zwischenbericht bzw. Endbericht fertig

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 600 |

Zur Durchführung der beschriebenen Arbeiten sind neben spezifischen Kenntnissen zur Aerosol- und Eismikrophysik und Luftchemie auch Erfahrungen im Umgang mit komplexen numerischen Modellen erforderlich. Dies rechtfertigt den Einsatz eines Personaljahres je Projektjahr. Zusatzmittel zur Bearbeitung weiterführender Fragestellungen wurden beim BMBF im Rahmen von AFO2000 beantragt.

Literatur

- Brasseur, G.P., R.A. Cox, J. Hauglustaine, I.S.A. Isaksen, J. Lelieveld, D.H. Lister, R. **Sausen**, U. **Schumann**, A. Wahner, and P. Wiesen, 1998: European Scientific Assessment on the Atmospheric Effects of Aircraft Emissions. *Atmos. Environ.* **32**, 2327-2422.
- DeMott, P.J., D.C. Rogers, and S.M. Kreidenweis, 1997: The susceptibility of ice formation in upper tropospheric clouds to insoluble aerosol components. *J. Geophys. Res.* **102**, 19575-19584.
- Fabian, P. and B. **Kärcher**, 1997: The impact of aviation upon the atmosphere - An assessment of present knowledge, uncertainties, and research needs. *Phys. Chem. Earth* **22**, 503-598.
- IPCC, 1999: Intergovernmental Panel on Climate Change, Aviation and the Global Atmosphere. Special Report, Cambridge University Press.
- Jensen, E.J., O.B. Toon, D.L. Westphal, S. Kinne, and A.J. Heymsfield, 1994: Microphysical modelling of cirrus, 1. Comparison with 1986 FIRE IFO measurements. *J. Geophys. Res.* **99**, 10421-10442.
- Kärcher**, B., 1998: Physico-chemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles, 1. Model description. *J. Geophys. Res.* **104**, 17111-17128.
- Kärcher**, B., 1999: Aviation-produced aerosols and contrails. *Surv. Geophys* **20**, 113-167.
- Kärcher**, B., Peter, Th., Biermann, U.M., and **Schumann**, U., 1996: The initial composition of jet condensation trails. *J. Atmos. Sci.* **53**, 3066-3083
- Kärcher**, B. and S. Solomon, 1999: On the composition and optical extinction of particles in the tropopause region. *J. Geophys. Res.* **104**, 27441-27459
- Kawa, S.R. (Assessment Chair), 1999: Assessment of the Effects of High-Speed Aircraft in the Stratosphere 1998. NASA/TP-1999-209237, GSFC, Greenbelt, MD.
- Koop, Th., H.P. Ng, L.T. Molina, and M.J. Molina, 1998: A new optical technique to study aerosol phase transitions: The nucleation of ice from H₂SO₄ aerosols. *J. Phys. Chem.* **A102**, 8924-8931.
- Murphy, D.M., D.S. Thomson, and M.J. Mahoney, 1998: Organics, meteoritic material, mercury, and other elements in high altitude aerosols. *Science*, **282**, 1664-1669.
- Rogers, D.C., P. deMott, S.M. Kreidenweis, and Y. Chen, 1998: Measurements of ice-nucleating aerosols during SUCCESS. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1383-1386.
- Sheridan, P.J., C.A. Brock, and J.C. Wilson, 1994: Aerosol particles in the upper troposphere and lower stratosphere: Elemental composition and morphology of individual particles at northern midlatitudes. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2587-2590.
- Yu, F. and R.P. Turco, 1998: Contrail formation and impacts on aerosol properties in aircraft plumes: Effects of fuel sulfur content. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 313-316.

4.4.2 *Wolkenauflösende Modellierung*

Fachkoordination Dr. K. Gierens, DLR-PA
Zuordnung TP4 – Aerosol-Zirren-Modellierung

Ziele

Ziel dieses Einzelprojekts ist es, mit Hilfe wolkenauflösender, numerischer Simulationen folgende Fragen zu beantworten:

Führt Aerosol aus Flugzeugen in Luftmassen, in denen sich Eisübersättigung einstellt, zu früherer Zirrenbildung als natürliches Aerosol und erhöht damit die globale Bedeckung mit hoher Bewölkung?

Wie hängen die Strahlungseigenschaften von Zirren von den an der Eisbildung beteiligten Aerosoltypen ab?

Wie lassen sich die Effekte des natürlichen und des Flugzeugaerosols auf Bedeckungsgrad, Eisgehalt und optische Eigenschaften von Zirren für globale Zirkulationsmodelle parametrisieren?

Die Beantwortung dieser Fragen dient einerseits einem besseren Verständnis der mikrophysikalischen Vorgänge und erlaubt es, die Resultate der Fallstudien aus den Messkampagnen in einem größeren Rahmen zu interpretieren. Weiter bilden die Arbeiten die Grundlage für eine Parameterisierung des indirekten Klimaeffektes des Luftverkehrs für ECHAM.

Problemstellung

Das übergeordnete Problem, dem sich dieses Einzelprojekt widmet, ist die Frage nach den indirekten klimatischen Auswirkungen des Flugverkehrs. Dies beinhaltet zweierlei: Zum einen ist die Frage offen, ob der Flugverkehr zu einer Erhöhung des Bedeckungsgrades hoher Eiswolken führt (Boucher, 1999). Zum anderen ist es gegenwärtig nicht möglich, den Strahlungsantrieb durch die zusätzlichen Zirren, beziehungsweise der in ihren Eigenschaften durch Flugverkehrsemissionen veränderten Zirren, abzuschätzen. Dabei handelt es sich um erhebliche Beiträge zum gesamten Klimaeffekt des Luftverkehrs (IPCC, 1999).

Methoden

Die Untersuchungen im EP4.2 bestehen aus numerischen Simulationen der Entstehung und des Lebenszyklus von Zirren mit dem Modell MESOSCOP (Schumann et al., 1987). Je nach Fragestellung wird MESOSCOP sowohl mit einer „bulk“-Mikrophysik (prognostische Variablen sind Anzahldichten von Aerosolpartikeln und Eiskristallen, und Massenkonzentration von Eis) als auch mit der spektral auflösenden Mikrophysik des NASA Ames Research Centers (Jensen et al., 1994) kombiniert. Ferner kommt der Strahlungsmodul DART (Gierens, 1993) zum Einsatz. Die zeitaufwendige Auswertung der Datenmengen aus den mehrdimensionalen Simulationen erfolgt mittels eigener Auswertesoftware für Dynamik, Mikrophysik und Strahlung, die entsprechend weiterzuentwickeln ist.

Zur Beantwortung der Frage, ob und unter welchen Bedingungen das Aerosol des Luftverkehrs früher zur Bildung von Zirren führt, als dies mit nur dem natürlichen Hintergrundaerosol erfolgen würde (Kärcher et al., 1996; Jensen and Toon, 1997), muss sowohl das schon in Kondensstreifen prozessierte Aerosol, das ohne Kondensstreifeneinwirkung generierte Flugzeugaerosol, als auch natürliches Hintergrund-Aerosol betrachtet werden. Die vorgesehenen

Parameterstudien umfassen die Zirrenbildung unter Variation wichtiger Einflussgrößen wie Temperatur, Feuchte, Aerosoltyp und deren Größenverteilung, vertikale Auftriebsgeschwindigkeit und Gefriereigenschaften der Partikel. Die Ergebnisse tragen zur Entwicklung einer verbesserten Parameterisierung der Zirreneigenschaften in ECHAM bei, die erstmals eine Kopplung der Zirrenbildung mit dem simulierten Aerosol im globalen Klimamodell ermöglichen soll.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

In den vergangenen Jahren wurde MESOSCOP zur Simulation von Kondensstreifen eingesetzt, zunächst mit dem Ziel, deren horizontale Ausbreitung und optische und mikrophysikalische Eigenschaften, insbesondere das Wachstum des Eisgehaltes, zu ergründen (Gierens, 1996). Gierens und Ström (1998) zeigten, dass selbst die von Flugzeugen ausgelösten Luftbewegungen ausreichen, um in eisübersättigter Luft das Gefrieren von Aerosolpartikeln auszulösen. Es wurde weiter die unterschiedliche mikrophysikalische Entwicklung des Eises im primären (Wirbelkerne) und sekundären Nachlauf (sog. Vorhang) von großen Verkehrsflugzeugen untersucht. Sussmann und Gierens (1999) konnten zeigen, dass oftmals nur das Eis im sekundären Nachlauf später langlebige Kondensstreifen bildet, während die Hauptmasse des Eises in den absinkenden Wirbelkernen verdampft. Dabei können die ursprünglichen Partikel aus den Flugzeugtriebwerken wieder freigesetzt werden und später zur Zirrenbildung beitragen. Dieses prozessierte Aerosol kann andere Gefriereigenschaften aufweisen als das im unmittelbaren Nachlauf eines Flugzeugs gebildete Aerosol. Die Umwandlung eines Kondensstreifens in einen Zirrus wurde erstmals von Gierens und Jensen (1998) mit MESOSCOP simuliert.

Gegenwärtig nimmt MESOSCOP (mit „bulk“-Mikrophysik und Strahlungstransport) am „Idealised Cirrus Model Comparison Project“ der Working Group 2 der GEWEX Cloud System Study teil. Das Ziel dieser Aktivität ist die Verbesserung von Zirrusmodellen und die Förderung der Verbesserung von Parametrisierungen von Zirren in globalen Modellen durch Identifikation und Quantifikation von Faktoren, die zu signifikanten Unterschieden in den Modellergebnissen führen.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Aufrüstung und Anpassung der Programme

Zunächst muss der vorhandene Mikrophysik-Modul hinsichtlich der Repräsentation verschiedener Aerosoltypen und deren Gefriereigenschaften angepasst und mit MESOSCOP gekoppelt werden. Zur Zeit berechnet das Modul die homogene Nukleation von Eiskristallen aus Sulfataerosol; hier ist eine Erweiterung auf Ruß-/Sulfatgemische und eine Aktualisierung der Gefriereraten (über EP2.1 und EP4.1) erforderlich. Da auch Strahlungseigenschaften der Eiskristalle berechnet werden, wird ein effizienter Strahlungstransportcode eingesetzt sowie geeignete Absorptions- und Streukoeffizienten und Randbedingungen bereitgestellt.

- M1: Mikrophysikmodul erweitert, eingebaut und getestet
- M2: Strahlungsmodul erweitert, eingebaut und getestet

Arbeitspaket 2: Durchführung und Auswertung numerischer Simulationen

Zur Erstellung der Parameterisierung von Zirren in ECHAM wird eine hinreichend große Anzahl von Parameterstudien durchgeführt, um die mögliche Variationsbreite der Schlüsselparameter der entstehenden Zirren (vor allem effektiver Eiskristallradius, optische Dicke) zu erfassen. Diese Rechnungen werden mit dem „bulk-Mikrophysik“-Ansatz durchgeführt. Mit dem überarbeiteten Programmcode werden Simulationen zur Bildung von Zirren aus natürli-

chem Hintergrundaerosol, gealtertem Flugzeugaerosol, verdampften Kondensstreifen und persistenten Kondensstreifen durchgeführt. Dabei werden in Sensitivitätsstudien die Aerosolparameter und deren Gefrieraten variiert, sofern der entsprechende Parameterbereich nicht durch In-situ-Messungen eingeschränkt ist.

- M3: Erstellen einer Parameterisierung für ECHAM
- M4: Simulationen zur Zirrenbildung

Arbeitspaket 3: Berichte und Publikationen

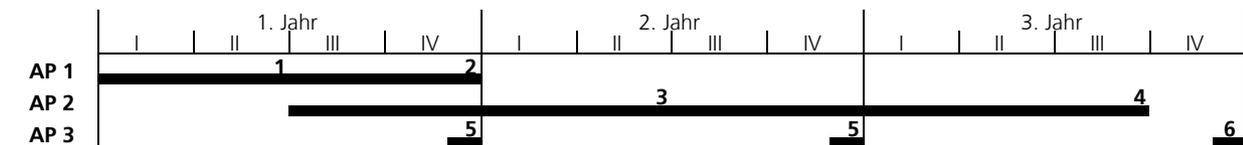
Erstellen von Zwischenberichten und Endbericht. Aktive Teilnahme an Tagungen und Workshops zu diesem Thema. Publikation der Forschungsergebnisse in referierten Fachzeitschriften.

- M5: Zwischenbericht fertig
- M6: Endbericht fertig

Aufgrund der zu bearbeitenden Inhalte bestehen enge Verbindungen zu EP4.3, da die geplanten Simulationen zur Ableitung einer Parameterisierung der Eiskernung in Zirren zur Verwendung im globalen Modell ECHAM eingesetzt werden (in Zusammenarbeit mit EP4.1). Die Simulationen profitieren auch vom Erkenntnisgewinn der Feldmessungen.

Weitere Zusammenarbeit besteht mit Dr. Eric Jensen (NASA Ames) bezüglich des weiteren Ausbaus des Mikrophysikmoduls, mit Dr. Bernhard Mayer (NCAR, ab Januar 2000 im DLR-PA) bezüglich des Strahlungsmoduls und mit dem FZJ (über das EU-Vorhaben MOZAIC) und anderen Partnern in einem für AFO2000 vorgeschlagenen Projekt bezüglich der Erforschung eisübersättigter Regionen, in denen die in Frage stehenden Phänomene auftauchen und wirksam werden können. Zu diesem Thema hat der Fachkoordinator jüngst wichtige Forschungsbeiträge geliefert (Gierens et al., 1999a,b; Gierens und Spichtinger, 1999).

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|---|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 600 |

Die Aufrüstung der benötigten Computerprogramme, die Durchführung und die Auswertung der Simulationen sind sehr zeitaufwendige Arbeiten, die das Mitwirken eines erfahrenen Wissenschaftlers erforderlich machen. Eine mögliche Zusatzfinanzierung ergäbe sich durch die Bewilligung eines im Rahmen von AFO 2000 vorgeschlagenen Projekts.

Literatur

Boucher, O., Influence of air traffic on cirrus occurrence. *Nature* **397**, 30-31, 1999.

IPCC, Aviation and the global atmosphere, J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland (eds.), Cambridge University Press, 373 pp., 1999.

Gierens, K.M., A fast six-flux radiative transfer method for application in finite cloud models. *Contr. Atmos. Phys.* **66**, 73-88, 1993.

Gierens, K.M., Numerical simulations of persistent contrails. *J. Atmos. Sci.* **53**, 3333-3348, 1996.

- Gierens**, K., E. Jensen, A numerical study of the contrail-to-cirrus transition. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 4341-4344, 1998.
- Gierens**, K., and P. **Spichtinger**, On the size distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratosphere. Eingereicht bei *Ann. Geophysicae*, 1999.
- Gierens**, K., U. **Schumann**, M. Helten, H. Smit, and A. Marengo, A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements. *Ann. Geophysicae* **17**, 1218-1226, 1999a.
- Gierens**, K., U. **Schumann**, M. Helten, H. Smit, and P.-H. Wang, Ice-supersaturated regions and sub visible cirrus in the northern midlatitude upper troposphere. Eingereicht bei *J. Geophys. Res.*, 1999b.
- Jensen, E.J., O.B. Toon, D.L. Westphal, S. Kinne, and A.J. Heymsfield, Microphysical modelling of cirrus, 1, Comparison with FIRE IFO measurements. *J. Geophys. Res.* **99**, 10421-10442, 1994.
- Jensen, E.J., and O.B. Toon, The potential impact of soot particles from aircraft exhaust on cirrus clouds, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 249-252, 1997.
- Kärcher**, B. Th. Peter, U.M. Biermann, and U. **Schumann**, The initial composition of jet condensation trails, *J. Atmos. Sci.* **53**, 3066-3083, 1996.
- Schumann**, U., T. **Hauf**, H. **Höller**, H. **Schmidt**, and H. **Volkert**, A mesoscale model for simulation of turbulence, clouds, and flow over mountains: Formulation and validation examples. *Contr. Atmos. Phys.* **60**, 413-446, 1987.
- Sussmann, R., K. **Gierens**, Lidar and numerical studies on the different evolution of vortex pair and secondary wake in young contrails. *J. Geophys. Res.* **104**, 2131-2142, 1999.
- Ström, J, and S. Ohlsson, In situ measurements of enhanced crystal number densities in cirrus clouds caused by aircraft exhaust. *J. Geophys. Res.* **103**, 11355-11361, 1998.

4.4.3 Globale Modellierung mit ECHAM

Fachkoordination Priv.-Doz. Dr. R. Sausen, DLR-PA
Zuordnung TP4 - Aerosol-Zirren-Modellierung

Ziele

- Bestimmung des Einflusses luftverkehrsinduzierter Aerosole auf den Bedeckungsgrad sowie die optischen Eigenschaften von Kondensstreifen und Zirren
- Bestimmung der damit verbundenen globalen Klimaveränderung

EP4.3 soll Antworten auf eine zentrale Frage des Gesamtvorhabens liefern: Kann der Luftverkehr durch Modifikationen des atmosphärischen Aerosols das Klima signifikant beeinflussen?

Problemstellung

Eine Vielzahl von Studien verdeutlicht die Klimarelevanz von Zirruswolken und deren potentielle Sensitivität bezüglich der Menge und Eigenschaften atmosphärischer Aerosole. So wird die globale Strahlungsbilanz sowohl durch natürliche Zirrus-Bewölkung (z.B. IPCC, 1996) als auch durch anthropogene Zirrus-Komponenten wie Kondensstreifen (IPCC, 1999) wirksam beeinflusst. Die Art der Klimabeeinflussung durch Eiswolken hängt vom Bedeckungsgrad sowie von deren optischen Eigenschaften und damit von ihrer mikrophysikalischen Struktur ab. Letztere Faktoren können stark durch die Eigenschaften der bei der Eiswolkenbildung involvierten Aerosole beeinflusst werden. Auch die Bildungswahrscheinlichkeit von Zirren hängt von der Verfügbarkeit und den Charakteristika von Aerosolen ab. In diesem Zusammenhang wurde die Hypothese aufgestellt, dass durch den Luftverkehr generierte Aerosole die Bildung von Eiswolken (zusätzlich zu Kondensstreifen) signifikant beeinflussen (Boucher, 1999). Die Wirkung der durch luftverkehrsinduzierte Aerosole bedingten Modifikationen der Zirrusbewölkung auf den globalen Strahlungshaushalt und das globale Klima sind zur Zeit noch gänzlich ungeklärt.

Methoden

Dieses Einzelprojekt nähert sich den genannten Zielen durch numerische Simulationen mit globalen Klimamodellen, die im Hinblick auf die zu beschreibende Aerosol- und Wolkenphysik durch geeignete Parametrisierungen ergänzt werden müssen. Als Basismodell dient ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) in den Versionen mit 19 vertikalen Schichten und mit 39 Schichten (ECHAM4.L39(DLR); Land et al., 1999). Später, mit der Verfügbarkeit von ECHAM5 und ECHAM5.L39(DLR), soll mit diesen Modellen weitergearbeitet werden. In ECHAM4 sind die Eiswolken durch Bedeckungsgrad und Eiswassergehalt beschrieben, welche diagnostisch aus der relativen Feuchte bzw. dem Gesamtwolkenwassergehalt abgeleitet werden. In ECHAM5, mit einer weiterentwickelten Wolkenphysik wird der Eiswassergehalt als separate prognostische Variable behandelt (Lohmann und Roeckner, 1996). Ein Parametrisierungsschema für die interaktive Wechselwirkung von Wolken und Aerosolen steht bisher nur für Wasserwolken (Lohmann et al., 1999), nicht aber für Eiswolken zur Verfügung.

Eigene Erfahrungen und Vorarbeiten

Der Leiter dieses Einzelprojektes ist seit zwanzig Jahren durch Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Modellierung und Analyse großräumiger atmosphärischer Prozesse und Klimaänderungen, insbesondere der Entwicklung und Anwendung des ECHAM-Modells, ausgewie-

sen. Das Team für die globalen Modellierungsaktivitäten setzt sich zusammen aus Fachleuten für Aerosolphysik, Atmosphärenphysik und Atmosphärenchemie.

Neben Studien zur zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Ozonschicht wurden (und werden) von DLR-PA die globalen Auswirkungen des Luftverkehrs auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und auf das Klima untersucht. Insbesondere wurde in einer Pilotstudie (Ponater et al., 1996) gezeigt, dass Kondensstreifen das Potential zu signifikanten Klimaänderungen haben. Mehrere Studien zur diagnostischen Bestimmung des Bedeckungsgrades durch Kondensstreifen (Sausen et al., 1998; Gierens et al., 1999) und zur Parametrisierung von Kondensstreifen, basierend auf mikrophysikalischen Studien (Ponater et al., 1997; Ponater und Gierens, 1997), wurden durchgeführt. R. Sausen war Co-ordinating Lead Author für das Klimakapitel des IPCC Special Reports „Aviation and the Global Atmosphere“. Im Aerosolförderschwerpunkt (AFS) des BMBF wurde ein Lagrange'sches Transportschema für Aerosole, speziell für die Anwendung in ECHAM, entwickelt und validiert.

Die Teams der externen Partner umfassen u.a. Dr. Feichter und Dr. Roeckner (MPI-M: MPI für Meteorologie, Hamburg) sowie Dr. Lohmann (DUH: Dalhousie University Halifax, Kanada). Diese sind ausgewiesene Experten für die Modellierung von Wolken- und Aerosolprozessen, speziell für das ECHAM-Modell.

Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Aufbereiten von anthropogenen Aerosolquellen

Aerosol-Emissions-Dateien und Daten zu Aerosol-Vorläufersubstanzen für einige anthropogene Quellen, insbesondere für den Luftverkehr und den bodengebundenen Verkehr, sollen zur Nutzung in ECHAM aufbereitet werden. Diese Dateien sollen zusammen mit Daten zu anderen Quellen (z.B. Industrie, Verbrennung von Biomasse, Freisetzung aus Ozeanen) gemeinsam mit dem MPI-M in einer Datenbank bereitgehalten werden.

- M1: Erster Emissionsdatensatz fertig
- M2: Überarbeiteter Emissionsdatensatz fertig

Arbeitspaket 2: Aerosol-Modellierung in ECHAM

Der luftverkehrsgenerierte Anteil an den globalen Aerosolverteilungen kann nicht durch Messungen, sondern nur durch Modellsimulationen quantifiziert werden. Hierbei sind die wichtigsten Aerosolkomponenten aus verschiedenen Quellen zu berücksichtigen. Für diese Aufgabe soll auf Arbeiten in anderen Projekten (z.B. AFS und AFO 2000) zurückgegriffen werden. Verschiedene Aerosol-Module können zum Einsatz kommen und für unsere Problemstellung angepasst werden, z.B. die modalen Ansätze MADE (Ackermann et al., 1998) und M3 (Wilson et al., 1999). Die Auswahl des geeigneten Moduls erfolgt in der Anfangsphase des Projektes. (Wesentliche Teile hierzu werden vom MPI-M durchgeführt.)

- M3: Neues Aerosolmodul in ECHAM implementiert

Arbeitspaket 3: Parameterisierung der Eisbildung in Zirren und Kondensstreifen

Analog zu der existierenden Parameterisierung für Wasserwolken (Lohmann et al., 1999) wird eine Parameterisierung für Eiswolken entwickelt und in ECHAM implementiert (Aufgabe von MPI-M und DUH). DLR-PA wird sich um die Parameterisierung der Eisbildungsrate als Funktion von Aerosolparametern und meteorologischer Größen sowie um die Berücksichtigung von Kondensstreifen kümmern. Für diese Arbeiten wird auch auf Ergebnisse aus EP 4.1 (Prozessmodellierung) und EP 4.2 (wolkenauflösende Simulationen) zurückgegriffen.

- M4: Parameterisierung fertig

Arbeitspaket 4: Parameterisierung des Bedeckungsgrades von Zirren und Kondensstreifen

Derzeit ist der Bedeckungsgrad in ECHAM lediglich eine Funktion der relativen Feuchte (und der Höhe). Die Berücksichtigung von Kondensstreifen und eventuell auch anderer luftverkehrsbedingter Wolken erfordert jedoch, dass der Bedeckungsgrad noch von weiteren Größen wie der Anzahl der Flugbewegungen, dem Schmidt-Appleman-Kriterium und Aerosolparametern abhängt. Eine derartige Parameterisierung wird entwickelt und in ECHAM implementiert.

- M5: Parameterisierung fertig

Arbeitspaket 5: Modellvalidierung

Verschiedene Messdatensätze (Partikel- und Spurengasmessungen) sollen so aufbereitet werden, dass sie zur Validierung der verwendeten Parameterisierungen zur Aerosol- und Wolkenphysik eingesetzt werden können. Die Rohdaten existieren zum Teil (POLINAT/SONEX, „Schadstoffe in der Luftfahrt“) oder werden in naher Zukunft gewonnen (INCA, ENVISAT). Zu allen Datenquellen hat DLR-PA primären Zugang. Unter Nutzung dieser Daten und weiterer Beobachtungs-/Analysedaten (z.B. ECMWF-Analysen) werden die in AP 3 und 4 entwickelten Parameterisierungen sowie ECHAM mit diesen Parameterisierungen validiert. (Durchführung mit MPI-M und DUH)

- M6: Erste Messdatensätze aufbereitet
- M7: Alle Messdaten aufbereitet
- M8: Modell validiert

Arbeitspaket 6: Sensitivitätsexperimente

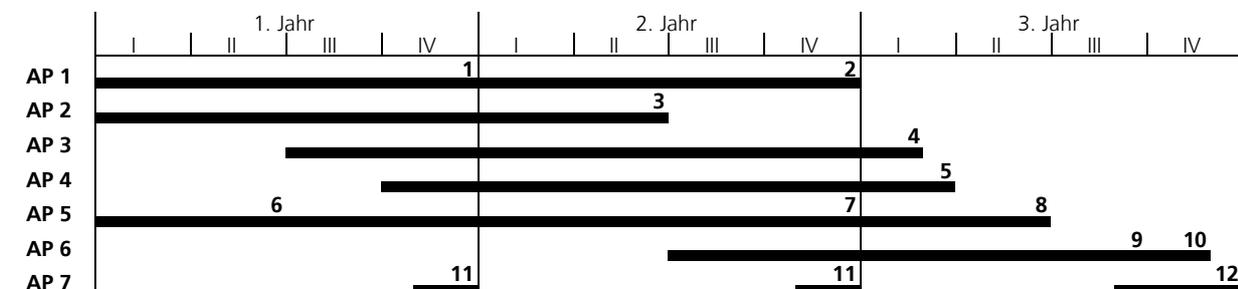
Es wird der Einfluss der luftverkehrsgenerierten Aerosole auf den Bedeckungsgrad und die optischen Eigenschaften der Zirren und die daraus resultierende Veränderung des globalen Klimas quantitativ bewertet. Sensitivitätsstudien und Szenarienrechnungen zur Abhängigkeit dieser Effekte von Faktoren wie der Flughöhe, des Flugverkehrsaufkommens oder der Zusammensetzung des Emissionsgemisches werden durchgeführt. Die Bedeutung der unterschiedlichen luftverkehrsgenerierten Aerosoltypen für die modellierten Klimaveränderungen wird im Einzelnen bewertet. Schließlich wird die Boucher-Hypothese (1999) überprüft.

- M9: Boucher-Hypothese überprüft
- M10: Sensitivitätsexperimente abgeschlossen und ausgewertet

Arbeitspaket 7: Dokumentation

- M11: Zwischenbericht
- M12: Endbericht

Zeitplan und beantragte Ressourcen



| Jahr | 1 | 2 | 3 | Gesamt | Investition, TDM | Summe, TDM |
|------|-----|---|---|--------|------------------|------------|
| PJ | 1.5 | 2 | 2 | 5.5 | 0 | 1100 |

Die oben dargestellten schwierigen und umfangreichen Aufgaben erfordern einen Personalaufwand, der über die im PAZI-Einzelprojekt beantragten Ressourcen hinausgeht. Daher soll dieses Einzelprojekt durch weitere Projekte sowie Mittel aus der Grundfinanzierung unterstützt werden. Hinzu kommen noch Ressourcen von MPI-M und DUH. Nicht berücksichtigt ist der erhebliche Bedarf an DV-Ressourcen (Kosten für Hochleistungsrechner und für Datenarchivierung).

Dieses Einzelprojekt wird durch externe Vorhaben unterstützt: AFS-Projekte „Globaler Transport von Aerosolen“ (DLR-PA) und „Bestimmung des Klimaeinflusses von Aerosolen mit dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM auf der Basis dynamisch berechneter Aerosolverteilungen“ (MPI-M); ggf. neue Projekte in AFO2000.

Literatur

- Ackermann, I.J., H. Hass, M. Memmesheimer, A. Ebel, F.S. Binkowski, and U. Shankar, Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmos. Environ.* **32**, 2981-2999, 1998.
- Boucher, O., Air traffic may increase cirrus cloudiness. *Nature* **397**, 30-31, 1999.
- IPCC, *Climate change 1995 - The science of climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 572pp, 1996.
- IPCC, *Aviation and the Global Atmosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 373pp., 1999
- Gierens, K., R. Sausen, and U. Schumann**, A diagnostic study of the global distribution of contrails part II: Future air traffic scenarios. *Theor. Appl. Climatol.* **63**, 1-9, 1999.
- Land, C., **M. Ponater**, and **R. Sausen**, The ECHAM4.L39(DLR) atmosphere GCM - Technical description and model climatology. DLR-FB-1999-31, 45 pp, 1999.
- Lohmann, U. and E. Roeckner, Design and performance of a new cloud microphysics scheme developed for the ECHAM4 general circulation model. *Clim. Dyn.* **12**, 557-572, 1996.
- Lohmann, U., J. Feichter, C.C. Chuang, and J.E. Penner, Prediction of the number of cloud droplets in the ECHAM GCM. *J. Geophys. Res.* **104**, 9169-9198, 1999.
- Ponater, M.** and **K. Gierens**, Quantification of key parameters for treating contrails in a large scale model. DLR-Mitteilung 97-04, 207-213, 1997.
- Ponater, M., S. Brinkop, R. Sausen, and U. Schumann**, Simulating the global atmospheric response to aircraft water vapor emissions and contrails - a first approach using a CTM. *Ann. Geophys.* **14**, 941-960, 1996.
- Ponater, M., S. Brinkop, R. Sausen, and U. Schumann**, Parametrization of contrails in a comprehensive climate model. *Proc. of the Int. Colloq.: Impact of Aircraft Emissions upon the Atmosphere*, 15.-18. October 1996, Paris, ONERA, 373-378, 1997.
- Roeckner, E. et al., The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. MPI für Meteorologie, Report No. 218, 90 pp, 1996.
- Sausen, R., K. Gierens, M. Ponater, and U. Schumann**, A diagnostic study of the global distribution of contrails. Part I: Present day climate. *Theor. Appl. Climatol.* **61**, 127-141, 1998.
- Wilson, J.J., F. Raes, and A. Saltelli, M3: A multi modal model for aerosol dynamics. *J. Aerosol Sci.*, im Druck, 1999.

5 Verzeichnis der Abkürzungen

| Abkürzung | Erläuterung |
|-------------------|---|
| 2DC | Twodimensional Array Cloud Probe |
| AERO- CONTRAIL | EU-Projekt: Aviation-Induced Contrails |
| AERONET | EU-Thematic Network |
| AERONOX | EU-Projekt: The Impact of NO _x Emissions From Aircraft Upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km (1992-1994) |
| AEROTRACE | EU-Projekt: Aeroengine Induced Trace Substances |
| AFO 2000 | Atmosphärenforschungsprogramm 2000 des BMBF |
| AFS | Aerosolförderschwerpunkt des BMBF |
| AIDA | Aerosol- und Wolkenkammer des FZK-IMK |
| APE | EU-Projekt: Arctic Polar Experiment |
| APOLLO | AVHRR Processing of Clouds Over Land and Ocean |
| AT | Institut für Antriebstechnik des DLR |
| ATSR | Along Track Scanning Radiometer |
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Infrared, Sensor auf den NOAA-Satelliten |
| AWI | Alfred Wegener Institut |
| BKM | Brennkammermodellierung, ein internes DLR-Projekt |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BRR | BMW-Rolls-Royce |
| CARS | Coherent Anti-Stokes Raman scattering |
| CFD4C | EU-Projekt: Computational Fluid Dynamics for Combustion |
| CHEMICON | EU-Projekt: Chemistry and Condensation in Aircraft Plumes |
| CLOUDMAP | EU-Projekt: Cirrus and contrail cloud-top maps from satellite for weather forecasting and climate change analysis |
| CPC | Condensation Particle Counter |
| CVI | Counterflow Virtual Impactor |
| CYPRESS | EU-Projekt: Cycle Prediction and Emission Studies (beantragt) |
| DERA | Defence and Evaluation Research Agency, Pyestock, UK |
| DFD | Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum des DLR |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| DIAL | Differential-Absorptions-Lidar |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DMA | Differential Mobility Analyzer |
| DMPS | Differential Mobility Particle Sizer |
| EASOE | EU-Projekt: European Arctic Stratospheric Ozone Experiment |
| ECHAM | Hamburg Version of the ECMWF model (Klimamodell) |
| ECMWF | European Centre for Medium Range Weather Forecasts |
| ENVISAT | Europäischer Umweltsatellit |
| EP | Einzelprojekt in PAZI |
| ERS | European Remote Sensing Satellite |
| EU | Europäische Union |
| EULINOX | EU-Projekt: European Lightning Nitrogen Oxides Project |
| FISH | Lyman-alpha-Fluorescence-Hygrometer |
| FSSP | Forward Scattering Spectrometer Probe |
| FTIR | Fourier Transform Infrared Spectrometer |
| FZJ | Forschungszentrum Jülich |
| FZK | Forschungszentrum Karlsruhe |
| GC-MS | Gaschromatografie-Massenspektrometrie |
| HIMSPEC | EU-Projekt: High and Mid-latitude Specification of the N, Cl, and H Chemical Families by Airborne Measurements |
| HGF | Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren |
| HPLC | High performance liquid chromatography |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| ICG | Institut für Chemie und Geophysik des FZJ |
| IfT | Institut für Troposphärenforschung, Leipzig |
| IMK | Institut für Meteorologie und Klimaforschung des FZK |
| INCA | EU-Projekt (in Verhandlung): Interhemispheric Differences in Cirrus Properties From |

| Abkürzung | Erläuterung |
|-----------------------|--|
| | Anthropogenic Emissions |
| IOMAS | Ionization Mass Spectrometer des MPI für Kernphysik, Heidelberg |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| KEROMIX | BMBF-Projekt zur Rußbildung |
| LH | Lufthansa |
| LI | Arbeitsgruppe Lidar im Institut PA des DLR |
| LIF | Laser-Induced Fluorescence |
| LII | Laser-Induced Incandescence |
| LMD | Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, Palaiseau, France |
| MARL | Mobiles Aerosol-Raman-Lidar |
| MASP | Multi-Angle Aerosol Spectrometer Probe |
| MOZAIC | EU-Projekt: Measurement of Ozone by Airbus In-Service Aircraft |
| MPI / MPG | Max-Planck-Institut / Max-Planck-Gesellschaft |
| MSG | Meteosat Second Generation |
| MTU | Motoren und Turbinen Union |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO |
| NEPAIR | EU-Projekt: New Emission Parameter Covering the Whole Aircraft |
| NILU | Norsk Institutt for Luftforskning, Lillestrom, Norway |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| ONP | Ozonforschungsprogramm des BMBF |
| OP | Oberpfaffenhofen |
| PA | Institut für Physik der Atmosphäre des DLR |
| PARTEMIS | EU-Projekt (in Verhandlung): Measurement and Prediction of Aerosols and Gaseous Precursors From Turbine Engines |
| PAZI | Partikel aus Flugzeugtriebwerken und ihr Einfluss auf Kondensstreifen, Zirkuswolken und Klima, ein Strategiefondsprojekt der HGF |
| PCASP | Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe |
| PJ | Personaljahr (entspricht HGF-intern DM 200.000) |
| POLECAT | BMBF-Projekt: Polare Stratosphärische Wolken, Leewellen, Aerosole und Transport |
| POLINAT, POLINAT 2 | EU-Projekte: Pollution From Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor, 1994-1996 and 1996-1998 |
| POLSTAR | BMBF-Projekt: Polar Stratospheric Aerosol Experiment |
| SAGE | Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (NASA Satelliteninstrument) |
| SEM | Scanning Electron Microscope |
| SESAME | EU-Projekt: Second European Arctic and Mid-Latitude Experiment |
| SEVERI | Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager |
| SMPS | Scanning Mobility Particle Sizer |
| SONEX | NASA-Projekt: Subsonic Assessment Ozone and Nitrogen Oxides Experiment |
| SPCA | Sektion für Physik und Chemie der Atmosphäre des AWI |
| SPLAT | Single Particle Laser Ablation Time-of Flight Mass Spectrometer |
| SULFUR 1-6 | Experimentserie des DLR zum Schwefeleinfluss auf Aerosole |
| TDM | 1000 Deutsche Mark |
| THESEO | EU-Projekt: Third European Arctic Stratospheric Ozone Experiment |
| TOFMS | Time-of-Flight Mass Spectrometer |
| TP | Teilprojekt in PAZI, setzt sich aus Einzelprojekten zusammen |
| Uni | Universität |
| VT | Institut für Verbrennungstechnik des DLR |

6 Anlagen: Briefe von Partnern

Die hier beteiligten externen Partner haben ihre Unterstützung bei dem PAZI-Workshop am 24./25.11.1999 in Oberpfaffenhofen zum Ausdruck gebracht. Dies wird durch anliegende Briefe bestätigt. Bei einigen Partnern sind entsprechende Briefe vorbereitet, aber noch in der jeweiligen Administration abzustimmen. Nachgänge werden bei der Begutachtung vorgelegt.