

# Klimaforscher starten fliegende Kiste

Wertvolle Fracht an Bord: Der rund eineinhalb Tonnen schwere CARIBIC-Messcontainer im vorderen Laderaum verwandelt den Lufthansa Airbus A340-600 in ein Forschungsflugzeug, mit dem Wissenschaftler die Chemie der Atmosphäre studieren.



Wenn Sie sich demnächst mit Lufthansa auf einen Interkontinentalflug begeben sollten, dann achten Sie auf den Namen der Maschine. Ist es die Leverkusen, so nehmen Sie vielleicht an einem Forschungsflug teil. Seit Mai dieses Jahres nutzt nämlich ein Wissenschaftlerteam des Mainzer **MAX-PLANCK-INSTITUTS FÜR CHEMIE** unter der Leitung von **CARL BRENNINKMEIJER** den Jet regelmäßig als Plattform für Messungen in der Atmosphäre – ein ehrgeiziges Projekt mit Zukunft.

Am 13. Dezember 2004 flog Bundesumweltminister Jürgen Trittin von Frankfurt aus zur Weltklimakonferenz nach Buenos Aires. Es war kein Zufall, dass er ausgerechnet mit der *Leverkusen* den Atlantik überquerte, denn so konnten der Max-Planck-Forscher Brenninkmeijer und ein hochrangiger Vertreter der Lufthansa den Minister vor dem Abflug über das Projekt CARIBIC informieren. Der Urlaub und Entspannung verheißende Name steht für das ambitionierte Forschungsprogramm *Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrumented Container*, also etwa: Passagierflugzeuge für die regelmäßige Untersuchung der Atmosphäre mithilfe eines Instrumentencontainers. Hinter diesem komplizierten Namen verbirgt sich ein einfacher Gedanke: Täglich jetten unzählige Passagierflugzeuge um den Globus. Warum sie nicht als fliegende Messstationen benutzen?

Tatsächlich ist die Idee gar nicht so neu, einige Projekte hat es bereits in Europa und Japan gegeben. So haben Forscher im Rahmen von MOZAIC (*Measurement of Ozone and Water vapour by Airbus In-service Aircraft*) zwischen 1994 und 2004 auf Langstreckenflügen Ozon und Wasserdampf in der Atmosphäre gemessen. CARIBIC ist dagegen ein komplett ausgestattetes analytisches



Das globale Klima im Blick: CARIBIC-Projektleiter Carl Brenninkmeijer.

Labor, mit dem sich die Konzentrationen von mehr als 50 klimarelevanten Spurengasen sowie von Wasserdampf und Aerosolen mit großer Genauigkeit bestimmen lassen. „Die Datensätze, die wir mit CARIBIC erhalten, können Wetterballons, Bodenstationen oder Satelliten ebenso wenig liefern wie Kampagnen mit Forschungsflugzeugen“, sagt Carl Brenninkmeijer. Die CARIBIC-Messungen sind eine elegante, sehr sinnvolle und überdies preiswerte Ergänzung.

Im Prinzip lassen sich mit Satelliten bestimmte Spurengase präzise aufspüren. „Wir erwarten aber, dass die Ergebnisse von CARIBIC auch dazu beitragen, Satellitenbeobachtungen deutlich verlässlicher zu machen, und zwar durch den Vergleich der Ergebnisse beider Methoden“, erklärt Brenninkmeijer. Der Max-Planck-Wissenschaftler und seine Kollegen aus Frankreich bereiten gerade die Publikation eines solchen Vergleichs über Messungen von Kohlendioxid vor.

Genau genommen handelt es sich bei dem jetzigen Programm um die modernisierte und stark erweiterte Fortsetzung eines sehr erfolgreichen Vorläuferprojekts selben Namens, initiiert im Jahr 1993 von dem damaligen Direktor des Max-Planck-Instituts für Chemie und Nobelpreisträger Paul Crutzen. Ihm war es gelungen, das Reiseunternehmen LTU für die Atmosphärenforschung zu gewinnen. In eine umgebaute Boeing 767 konnten die Mainzer Forscher ihre Messanlage installieren und zwischen 1997 und 2002 auf vielen Linienflügen einsetzen. Dann aber geriet das Unternehmen in finanzielle Turbulenzen. Es erneuerte seine Flotte und verkaufte die Boeing 767; so stand für CARIBIC kein Flugzeug mehr zur Verfügung.

Carl Brenninkmeijer ließ sich davon nicht entmutigen und fragte bei Lufthansa an. „Die waren beeindruckt von den Möglichkeiten, die CARIBIC bietet, und haben zugesagt, obwohl das für sie einen erheblichen Aufwand bedeutete“, sagt der Atmosphärenforscher begeistert. Lufthansa hat sich schon häufiger an wissenschaftlichen Projekten beteiligt, die mit Luftfahrt und Atmosphäre zu tun hatten, unter anderem an MOZAIC. Mit dem guten Willen allein war es indes nicht getan. Das Einlasssystem, mit dem die Luftproben im Flug gesammelt werden,

FOTOS: AIRBUS LUFTHANSA / MPI FÜR CHEMIE / THOMAS BÜHRKE

muss außen am Rumpf der Maschine fest installiert werden – ein erheblicher technischer Aufwand. Vom Einlass gelangt die Luft zu einem Container mit den Messgeräten, der im Frachtraum installiert ist. Lufthansa Technik war für die Sicherheit und maßgeblich für den Einbau des Systems verantwortlich.

Hierbei half ein glücklicher Zufall. Für den Einbau benötigten die Techniker und Ingenieure zwei Wochen. Da jeder Tag, an dem eine Maschine am Boden steht, die Lufthansa sehr viel Geld kostet, hätte man diesen Zeitraum nie finanzieren können. Glücklicherweise musste die *Leverkusen* jedoch ohnehin in den Hangar, weil sie zusammen mit weiteren neuen Flugzeugen das *FlyNet* erhalten sollte, ein System, mit dem Passagiere während des Flugs über Wireless LAN im Internet surfen können. So ließ sich die Liegezeit gleichzeitig für den Einbau von CARIBIC nutzen.

kehr zugelassen sind. So musste in Tests für elektromagnetische Verträglichkeit sichergestellt werden, dass die elektronischen Geräte nicht die Fluginstrumente stören. Eine Reihe von leicht brennbaren Materialien, etwa Polyethylen, waren verboten. Und schließlich mussten die Mainzer nachweisen, dass der Instrumentencontainer Beschleunigungen bis zum Neunfachen der Erdbeschleunigung aushält – ein Wert, der nur bei Unfällen auftritt. Vorsichtshalber schützt zudem ein schockabsorbierender doppelter Boden die Instrumente im Container. „Für jedes einzelne Bauteil benötigten wir einen Zulassungsnachweis“, erinnert sich Brenninkmeijer. Insgesamt haben neben Lufthansa Technik fünf Firmen an dem Projekt mitgearbeitet.

Nach zwei Testflügen lief die Anlage perfekt und seit Mai geht sie etwa einmal pro Monat auf Reisen. Wenn die Maschine in Frankfurt

werden Luftproben in insgesamt 28 Glasbehältern gesammelt und später im Labor analysiert. Letzteres ist allerdings bei einigen Stoffen nicht möglich: „Ozon können wir nicht mit nach Hause nehmen, weil es zu schnell zerfällt“, sagt Brenninkmeijer. Auch Wasserdampf muss während des Flugs gemessen werden.

### LASERPULSE IN DER LUFTPROBE

Gerade für diese beiden Stoffe befinden sich sehr raffinierte Detektoren an Bord. Obwohl Feuchtigkeitsmesser in vielen Haushalten stehen, ist die genaue Ermittlung des Wasserdampfgehalts eine anspruchsvolle Aufgabe. Mit CARIBIC geschieht das auf zwei Arten: In einem Instrument befindet sich eine polierte Scheibe aus Gold; darin wird die Temperatur abgesenkt, bis der Taupunkt erreicht ist und Wasserdampf auf dem Metall auskondensiert. Aus diesem Temperaturwert ergibt sich die absolute Luftfeuchtigkeit. Eine zweite, neuere Methode steuern Forscher aus Ungarn bei. Sie schießen in die Luftprobe Laserpulse ein, welche die Wassermoleküle zum Vibrieren anregen. Dabei entsteht ein Geräusch, das empfindliche Mikrofone aufzeichnen. „Bei jedem Puls macht es popp“, sagt Brenninkmeijer. Und je lauter das „Popp“, desto mehr Wasserdampf. Damit die Messungen überhaupt funktionieren, muss das Einlasssystem geheizt werden. Andernfalls würde Wasserdampf an den Wänden gefrieren.

Auch Ozon wird mit mehreren Methoden, die Kollegen vom Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt haben, gleichzeitig gemessen. Das besonders schnell arbeitende Instrument Oscar funktioniert chemisch: In dem Messbehälter befindet sich auf einem Substrat ein organischer Farbstoff. Treffen Ozonmoleküle auf ihn, reagieren die Substanzen miteinander und leuchten. Aus der Helligkeit des Lichts ergibt sich die Ozonkonzentration. Das zweite Verfahren Omcal ist langsamer, dafür aber genauer. Es nutzt

indirekt die Eigenschaft des atmosphärischen Ozons, uns vor der UV-Strahlung der Sonne zu schützen. In die Luftprobe wird UV-Licht eingestrahlt, das die Ozonmoleküle absorbiert. Je stärker die Absorption, die sich mit einem Sensor messen lässt, desto höher die Ozonkonzentration.

Insgesamt spüren 20 wissenschaftliche Instrumente in dem Container Spurengasen und Aerosolen nach. Neu im Vergleich zur ersten Phase von CARIBIC ist auch eine winzige Kamera am Einlasssystem. Sie zeigt den Forschern, wann die *Leverkusen* Wolken durchfliegt. Während in der ersten Phase von CARIBIC nur Aerosole mit Durchmessern bis zu 25 Nanometer (millionstel Millimeter) registriert wurden, können die Forscher jetzt bis zu einen Mikrometer große Schwebeteilchen messen. Das Gerät dafür lieferte das Institut für Troposphärenforschung in Leipzig.

Aerosole spielen in der Atmosphäre eine große Rolle (MAXPLANCKFORSCHUNG 4/2004, S. 48 ff.). So können schwefelhaltige Partikel Sonnenlicht in den Weltraum zurückreflektieren; insbesondere in Gebieten mit hoher Luftverschmutzung kann dies der Erwärmung durch den Treibhauseffekt entgegenwirken. Außerdem dienen Aerosole als Kondensationskeime für Wasserdampf, womit sie zur Wolkenbildung beitragen. Diese Prozesse sind überaus komplex und hängen von chemischer Zusammensetzung, Form und Größe der Aerosole ab. Die Wirkungsweise der Schwebeteilchen beim Klima herauszufinden gehört zu den aktuellen Herausforderungen der Atmosphärenforscher.

CARIBIC bietet den Forschern hierbei einzigartige Möglichkeiten. So fliegt die *Leverkusen* auch in Bereichen, in denen es bislang sehr wenige oder gar keine Messungen gab. Dabei treten interessante Aspekte zu Tage: Die Mainzer Forscher konnten genau verfolgen, wie Industrie- und Autoabgase aus besonders belasteten Gebieten – etwa in China oder Indien – in große Höhen aufsteigen und bis in den Mittelmeerraum vordringen. „Das sahen wir auf



Spürröhre am Flugzeugrumpf: Durch das Einlasssystem gelangen Luft- und Aerosolproben in den Container mit den wissenschaftlichen Instrumenten.

den früheren Flügen in Richtung Sri Lanka regelmäßig während des Sommermonsuns“, sagt Carl Brenninkmeijer.

CARIBIC misst außerdem die mittlerweile verbotenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die Ozon zerstören. Da einige sehr lange Lebensdauer besitzen, werden sie nur langsam abgebaut. Diesen Vorgang wollen die Wissenschaftler langfristig verfolgen, um so die Selbstreinigungsfähigkeit der Erdatmosphäre zu beobachten. Gleichzeitig gibt es auch natürliche chlor- und bromhaltige Substanzen, die Ozon zerstören. Die häufigste Substanz,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ , kommt in Ozeanen und Mangrovenwäldern vor und gerät in die Atmosphäre. Auch diese Stoffe müssen quantitativ erfasst werden, will man das komplexe atmosphärenchemische Netzwerk entwirren.

### SCHADSTOFFE AUF VERSCHLUNGENEN PFADEN

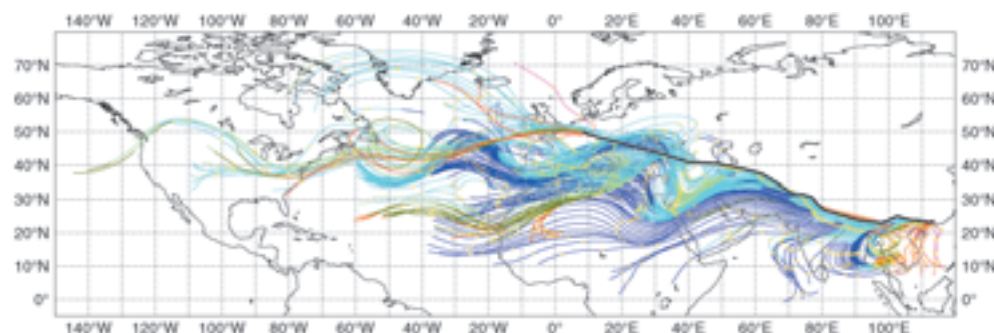
Um die Wege der Schadstoffe über mehrere Tage zurückzuverfolgen, erhalten die Forscher Informationen vom Niederländischen Königlichen Meteorologischen Institut. Das berechnet, woher und auf welchen Wegen jene Luft gekommen ist, welche die *Leverkusen* durchquert hat. So wird deutlich, welche Luftmassen zuvor Bodenkontakt hatten und daher Abgase mitgeschleppt haben.

Interessant sind aber auch Luftpakete, die von oben gekommen sind. Auf diese Weise können die Forscher

herausfinden, wie stark der Luftaustausch zwischen unterschiedlichen Atmosphärenschichten ist – ein insbesondere für die Ozonforschung bedeutsamer Aspekt. Denn die von unten aufsteigenden schädlichen Stoffe bewegen sich durch die Troposphäre hindurch und dringen in etwa 12 Kilometer Höhe in die darüber liegende Stratosphäre ein. Die zwischen diesen beiden Bereichen befindliche Tropopause behindert zwar einen starken Luftaustausch, aber ganz verhindert sie ihn nicht. Für die Klimaforscher ist eine quantitative Analyse dieser Vorgänge von großer Bedeutung. Die regelmäßigen Flüge haben zudem den Vorteil, dass sich der jahreszeitliche Gang atmosphärischer Vorgänge beobachten lässt. Auch der Einfluss von Einzelereignissen, wie El Niño oder Vulkanausbrüchen, lässt sich verfolgen.

Aber es müssen nicht immer Schadstoffe und Ozonkiller sein, über deren Messung sich die Forscher freuen. Lehrreich sind auch die Flüge in Südamerika von São Paulo nach Santiago, wenn die *Leverkusen* die Anden überquert. „Dort haben wir die sauberste Luft ohne Industrieabgase“, sagt Brenninkmeijer. Diese natürlichen Reinraumbedingungen bilden eine Herausforderung für die Nachweisempfindlichkeit der Instrumente. Das wird hoffentlich noch lange Zeit möglich sein, hofft der Mainzer Wissenschaftler. Denn Klimaforschung benötigt einen langen Atem.

THOMAS BÜHRKE



Für jeden Flug werden die Luftbewegungen der vergangenen Tage dargestellt. Violette und rote Bahnen kennzeichnen Luftpakete, die aus Bodennähe gekommen sind, blaue Linien zeigen Höhenwinde.

Und daran erinnert sich Brenninkmeijer sehr gern: „Das war eine Spitzenleistung!“, sagt er. „Alle haben perfekt gearbeitet und der Testflug war summa cum laude.“ Überhaupt kommt der geborene Niederländer ins Schwärmen, wenn es um deutsche Ingenieurskunst geht. „In Deutschland wird vieles schlechtgeredet, dabei gibt es wirklich so viele brillante Leute“, sagt er – und meint damit auch sein eigenes Team.

Das hatte schon während der Konstruktion alle Hände voll damit zu tun, nur solche Materialien und Bauteile auszuwählen, die auch im Luftver-

zum Zwischenstopp landet, bleibt dem Mainzer Max-Planck-Team etwa eine halbe Stunde Zeit, um den anderthalb Tonnen schweren Container im vorderen Laderaum unterzubringen, die Verbindungen zum zweieinhalb Meter entfernten Einlasssystem herzustellen und die Elektronik zu aktivieren.

Im Flug arbeiten alle Instrumente vollautomatisch, insgesamt ist die Maschine pro Messkampagne drei Tage unterwegs. Da muss alles perfekt funktionieren. Einige Spurengase und Aerosole werden unmittelbar im Container gemessen, zusätzlich

KARTE: KNMI/PETER VAN VELTHOVEN

FOTO: LUFTHANSA