

100

Sonderheft

Mitteilungen des
Deutschen Zentrums für
Luft- und Raumfahrt

Februar 2001 / G 12625

DLR

NACHRICHTEN



25
Jahre
Falcon



UMWELT



25 Jahre Falcon 2

FORSCHUNG



Ein fliegendes Labor für Umwelt- und Klimaforschung 10

ATMOSPHERE



Spurenstoffe in der Atmosphäre: neue Ergebnisse 16



LIDAR-Messungen auf der Falcon 22



Das globale Nord-Süd-Experiment 26

ATMOSPHERE



Gewitter als Spurenstoffgenerator 30

KARTIERUNG



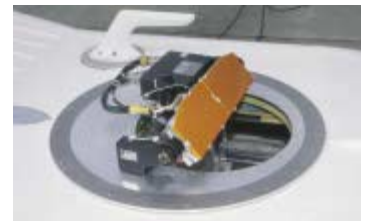
Umweltparametern auf der Spur 34

WETTER



Das Wetter über den Alpen 40

KOMMUNIKATION



Kommunikation für die zivile Luftfahrt 44

FORSCHUNG

Neue Business-Jets für den Einsatz in der Forschung? 48

Airborne Environmental Research 49

Wenn von Großforschungsanlagen die Rede ist, dann denken viele zumeist an Prüfstände und andere Testeinrichtungen auf dem Boden. Die Beiträge in diesem Sonderheft jedoch sind einer „Großforschungsanlage“ ganz eigener Art gewidmet, einem „fliegenden Labor“. Es handelt sich um das Forschungsflugzeug Falcon 20E, das vor 25 Jahren vom DLR in Betrieb genommen wurde. Es dient vielfältigen wissenschaftlichen Untersuchungen als Plattform und Instrumententräger – von der Atmosphärenforschung über die Fernerkundung der Erdoberfläche und der verschiedenen Gewässer bis hin zur Erprobung neuer Verfahren in der Nachrichtentechnik. Die Institute des DLR ebenso wie Partnerorganisationen –

Liebe Leserin, lieber Leser



zum Beispiel die Max-Planck-Gesellschaft, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen im In- und Ausland – nutzen die einzigartigen Möglichkeiten, die sich dank der Flexibilität in der Instrumentenauslegung, aber auch dank der Expertise der Betriebsmannschaften bieten.

So war die Falcon zur Klärung zahlreicher wissenschaftlich höchst interessanter oder auch ökologisch bedeutsamer Fragestellungen im Einsatz: Sie startete von Eis- und Schneepisten in der Arktis, um Aufschlüsse über die Schädigung der Ozonschicht in der nördlichen Polarregion zu erbringen, ihre Piloten flogen beinahe schon wagemutig in Gewitterfronten hinein, um die Entstehung von Stickoxiden durch Blitzschlag „vor Ort“ zu untersuchen. Nicht weniger spektakulär waren die Flugmanöver direkt im Abgasstrahl großer Verkehrsflugzeuge, die der Schadstoffanalyse von Triebwerken in Reiseflughöhe dienten. Bereits diese wenigen genannten Themen deuten an: Ohne In-situ-Untersuchungen, ohne authentische Messdaten wäre die Forschung hier einer gesicherten empirischen Grundlage beraubt. Doch auch als „Technologieträger“, etwa zur Erprobung neuer Antennensysteme für die zivile Luftfahrt oder zum Test künftiger Satelliten-Sensoren, fungierte die Falcon im Rahmen verschiedener Missionen.

Die folgenden Beiträge wollen über die Notwendigkeit und über Vielfalt dieser Anwendungen informieren. Starten wir also gewissermaßen zu einem gedanklichen „Rundflug“ an Bord der Falcon: Nehmen Sie im Cockpit Platz, und lesen Sie dieses Sonderheft als thematisches „Bordbuch“, das über die Möglichkeiten dieses einzigartigen „fliegenden Labors“ Auskunft gibt.

Prof. Dr. Walter Kröll
Vorsitzender des Vorstands

Von Dietrich Heimann und Hans Volkert

Das Wetter über den Alpen

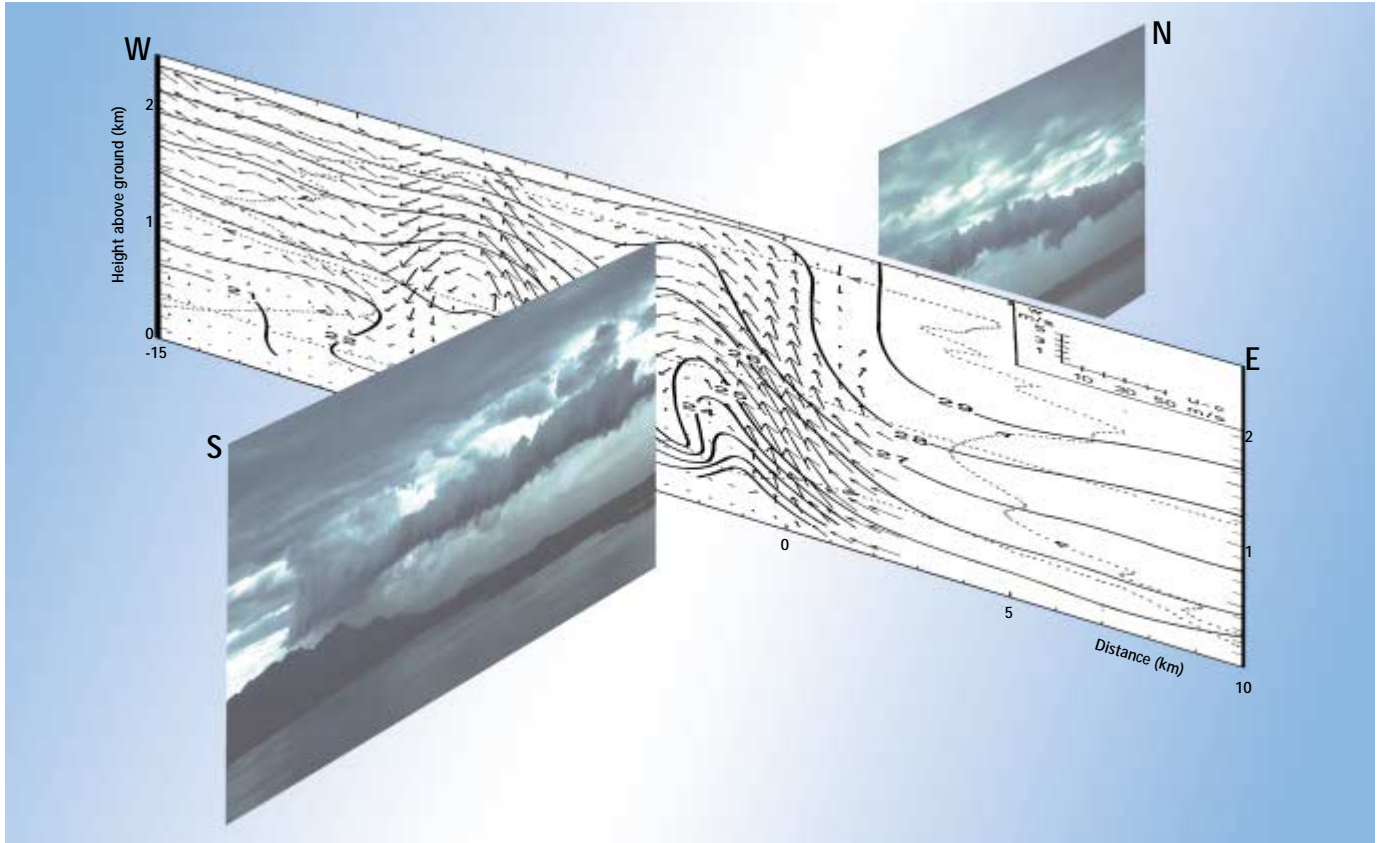
Hohe Gebirge wie die Alpen ragen weit in die Atmosphäre und verursachen oder beeinflussen daher meteorologische Prozesse in vielfältiger Weise. Sie können die Luftströmung blockieren, aber auch die Neubildung intensiver Tiefdruckwirbel und böige Winde bewirken, die wir je nach Lage zum Gebirge als Föhn, Bora oder Mistral kennen. Obwohl viele dieser Wettererscheinungen im Bereich alpiner Gebirge schon seit langem bekannt sind, lagen doch die Gründe für ihre Entstehung, die Komplexität ihrer dreidimensionalen Strukturen und ihre Bedeutung für das Wetter und das Klima im Allgemeinen noch bis vor wenigen Jahrzehnten vielfach im dunklen. Physikalische Vorgänge in der Atmosphäre kann man allerdings nur selten in Laboratorien unter genau kontrollierbaren Bedingungen untersuchen. Vielmehr ist man gezwungen, im Rahmen von Feldexperimenten die Atmosphäre selbst als ein natürliches Labor zu betrachten, in dem man die jeweils interessierenden Wettersituationen möglichst intensiv vermisst. Forschungsflugzeuge leisten hierbei einen wesentlichen Beitrag, da man sich mit ihrer Hilfe die dritte Dimension flexibel erschließen kann. Gerade ein etwa 750 Kilometer in der Stunde schnell und bis zu 13 Kilometer hoch fliegender Instrumententräger wie die Falcon ermöglicht die Erkundung eines großen Atmosphärenvolumens in kurzer Zeit. Dieser Beitrag spannt einen Bogen über die Erforschung des Gebirgseinflusses auf Wetter und Klima, zu der das Messsystem der Falcon im Rahmen großer Feldkampagnen zwischen 1982 und 2000 wichtige Beiträge lieferte. Der geografische Schwerpunkt lag dabei im Bereich der Alpen, aber auch in den benachbarten Pyrenäen. In jüngster Zeit konnten sogar über den nordskandinavischen Bergen die zuvor gewonnenen Erfahrungen für Detailstudien zum Ozonabbau in der Stratosphäre genutzt werden.



Die Untersuchung atmosphärischer Prozesse über einer komplexen Topografie erfordert ein koordiniertes Zusammenwirken unterschiedlicher Beobachtungsmethoden. Der Einsatz eines Forschungsflugzeugs wie der Falcon ist daher meist nur dann sinnvoll, wenn gleichzeitig ein verdichtetes Netz konventioneller Messstationen, Fernerkundungsverfahren und unter Umständen weitere Forschungsflugzeuge mit unterschiedlichen Flugeigenschaften zur Verfügung stehen. Ein solch konzertiertes Vorgehen gelingt nur innerhalb internationaler Kampagnen, in deren Rahmen die Kapazitäten einer größeren Anzahl von Organisationen für ein definiertes Forschungsthema zusammengeführt werden können. In den nachfolgend aufgeführten Kampagnen zur Erforschung der Wechselwirkung von Gebirgen und Atmosphäre spielte die Falcon des DLR stets eine wichtige Rolle. Zugleich waren diese Kampagnen der Schlüssel zum Verständnis des Gebirgseinflusses auf Wetter und Klima:

- ALPEX 1982: die erste internationale Kampagne im Gesamttraum der Alpen, während der vor allem die Entstehung so genannter Leezyklonen, aber auch die Bora am Rande der Dinarischen Alpen untersucht werden konnten.
- PYREX 1987: ein internationales Feldexperiment im Bereich der Pyrenäen, bei dem die Anregung von Gebirgswellen bei der Überströmung eines langgestreckten Gebirges erforscht wurde.
- MAP-SOP 1999: die Feldkampagne des Mesoskaligen Alpen Programms, bei dem die Bildung von Stauniederschlägen so detailliert untersucht werden konnte, dass eine Validierung hochauflösender Wettervorhersagemodelle möglich wird.
- POLECAT, POLSTAR und SOLVE-THESEO, 1997-2000: mehrere Feldmessexperimente zum Ozonabbau über Skandinavien, bei dem unter anderem die Rolle von Gebirgswellen bei der Ausbildung kalter Bereiche in der Stratosphäre und die Entstehung polarer Stratosphärenwolken studiert werden konnte.

Hinzu kamen aber noch weitere Einsätze der Falcon zur Erforschung von Wetterprozessen im Alpenraum, die nicht im Zusammenhang mit großen internationalen Kampagnen, sondern im Rahmen nationaler oder nur vom DLR betriebener Aktivitäten standen. Auch die Ergebnisse



dieser Messflüge trugen in spezifischer Weise zum Gesamtverständnis des Gebirgseinflusses auf die Atmosphäre bei. Zu nennen sind hier:

- Untersuchungen zum Föhn in den Jahren 1982 und 1985, bei denen die Struktur von Föhnwellen und der mit ihnen verbundene Impulstransport untersucht wurden;
- ein Feldexperiment im Rahmen des DFG-Schwerpunkts „Fronten und Orografie“ im Jahr 1987, bei dem die Beeinflussung von Kaltfronten durch Gebirge in Bezug auf Intensität und Zuggeschwindigkeit

Abb. vorherige Seite: Föhnstimmung gesehen vom Olympia-Berg in München Richtung Chiemgauer Alpen. Charakteristisch sind die linsenförmigen Wolken (*altocumulus lenticularis*) und die sehr gute Sicht auf die Alpen.

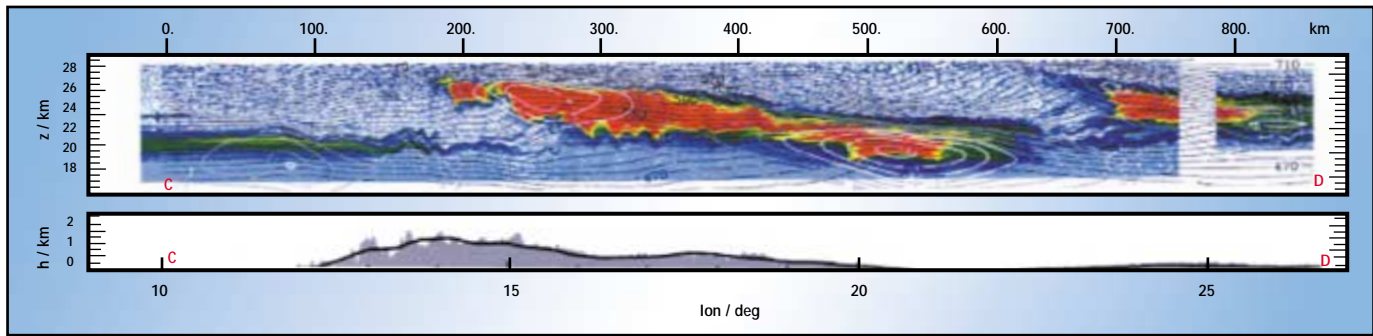
Abb. oben: Rollenwolke längs einer prä-frontalen Konvergenzlinie über dem Chiemsee am 8. Oktober 1987 und Messung der Relativbewegung (mit Radar; Pfeile) und der potenziellen Temperatur (mit zwei Flugzeugen, dicke Linien) quer dazu.

sowie der Zusammenhang zwischen Fronten und Föhn studiert wurden; - CLEOPATRA 1992, eine Messkampagne zur Untersuchung der Entstehung von Wolken und Niederschlag am Alpenrand.

Die Ergebnisse all dieser Experimente haben in den letzten zwei Jahrzehnten das Verständnis der komplizierten Zusammenhänge zwischen den Prozessen in der Atmosphäre und der Topografie als unterer Randbedingung erheblich erweitern können. Zudem ist es gelungen, die Wirkung des Gebirges auf das Wetter in den Alpen und deren näherer Umgebung zu studieren und sogar den Beitrag der Gebirge zum globalen Impulshaushalt zu quantifizieren, dem eine sehr wichtige Rolle im Klimasystem der Erde zukommt. Schließlich wurden umfangreiche Erfahrungen im koordinierten Einsatz unterschiedlicher Messsysteme gewonnen, seien es ortsgebundene oder flugzeuggetragene Systeme, „In-situ“ - oder Fernerkundungsverfahren. Diese können in künftigen Kampagnen oder beim Entwurf neuer Messsysteme, insbesondere auch neuer Forschungsflugzeuge, genutzt werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Gebirgseinfluss auf Wetter und Klima zusammengefasst, die ohne den Ein-

satz eines Forschungsflugzeugs wie der Falcon kaum hätten gewonnen werden können.

Gebirge, die von unten in die Atmosphäre ragen, beeinflussen die Luftströmung so ähnlich wie ausgefahrene Störklappen auf der Oberfläche von Flugzeugflügeln. Sie erhöhen den Widerstand und wirken als Bremse. Im Falle der Atmosphäre führt dies zu einem Druckunterschied zwischen der Luv- und der Leeseite eines Gebirges, aus dem sich der Widerstand ableiten lässt, den das Gebirge auf die Luftströmung ausübt. Vertikale Wellenbewegungen, die oberhalb der Gebirge unter dem Einfluss der Schwerkraft ausgelöst werden, ermöglichen einen nach unten gerichteten Impulstransport, bei dem die Atmosphäre Impuls verliert und somit abgebremst wird. „Föhnlinen“, wie die *altocumulus lenticularis* Wolken auch genannt werden, machen bei ausreichender Luftfeuchte die Wellenberge sichtbar. Die Erddrehung wiederum bewirkt zusammen mit dem physikalischen Gesetz der Drehimpulserhaltung unter bestimmten, nun verstandenen Bedingungen die Entstehung von Leezyklonen, also Tiefdruckgebieten auf der Rückseite großer Gebirge. Im Alpenraum ist es vor



allein die Genua-Zyklone, die sich bei einer Nordwestüberströmung der Alpen über dem Golf von Genua bildet und von dort aus weiterzieht. Ein solcher Tiefdruckwirbel beeinflusst nicht nur das Wetter in seiner unmittelbaren Nähe, sondern stellt, wie das Gebirge selbst, eine Störung in der Strömung dar und wirkt somit bremsend. Im Klimasystem unserer Erde stellen Gebirge also auf mehrfache Weise eine Senke für Impuls dar, sind also ein wichtiger Einflussfaktor im globalen Impulshaushalt. Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationssystem, wie man sie zwischen Nord- und Südhemisphäre beobachtet, sind eine Folge der Ungleichverteilung der großen Gebirge auf beiden Erdhälften. Dies hat nicht zuletzt Konsequenzen für die regelmäßige Ausbildung des so genannten Ozonlochs am Ende der Polarnacht, das über dem Südpol stabiler und ausgeprägter ist als über dem Nordpol.

Flugzeuge wie die Falcon messen entlang der Flugstrecke, d.h. einer eindimensionalen Linie, die aber auch geknickt oder in unterschiedlichen Höhen verlaufen kann. Mehrere, gleichzeitig fliegende Messflugzeuge ermöglichen bereits eine höher aufgelöste Erfassung der Atmosphäre. Die räumliche „Dimensionalität“ des Messsystems Flugzeug kann durch Fallsonden erhöht werden, die vom fliegenden Flugzeug in regelmäßigen Intervallen abgeworfen werden, an einem

Fallschirm nach unten schweben und in ihrer Gesamtheit sozusagen einen Datenvorhang bilden, der an der Flugbahn aufgehängt ist und bis zum Boden reicht. Während MAP-SOP wurde dieses Verfahren von der Falcon aus erfolgreich eingesetzt. Eine vollständig zweidimensionale Erfassung gelingt durch die Installation von Fernerkundungsverfahren im Flugzeug. Mit Laserlicht-Rückstreu-Verfahren (LIDAR) kann die Verteilung Aerosolen (Wasserdampf, Wolkenpartikeln) in einer Schnittebene unterhalb oder auch oberhalb des Flugzeugpfads ermittelt werden. Über den skandinavischen Gebirgen konnte mit dieser Methode die vertikale Verteilung so genannter polarer Stratosphärenwolken erfasst werden, die sich über zehn Kilometer oberhalb der Flughöhe der Falcon befanden. Diese Wolken, englisch PSC abgekürzt, stehen im Zusammenhang mit vertikal sich nach oben ausbreitenden Gebirgswellen, innerhalb derer es lokal zu sehr niedrigen Temperaturen kommt. Diese wiederum führen zur Kondensation von Schwefelverbindungen und stehen im Verdacht, das Ozongleichgewicht in der Stratosphäre besonders effektiv zu stören. Ein neuartiges Verfahren, das während MAP-SOP erstmals auf der Falcon installiert war, ist das Wind-Lidar, mit dessen Hilfe die Höhenabhängigkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung unterhalb der Flugbahn in hoher Auflösung aus der Bewegung von Aerosolteilchen bestimmt werden kann.

Viele Fragestellungen lassen sich aber erst dann zufriedenstellend beantworten, wenn vollständig dreidimensionale Datenfelder vorliegen. Diese können mit Messflugzeugen zur Zeit noch nicht gewonnen werden. Einen Ausweg bietet die Kombination der Ergebnisse von Flugzeugmessungen mit den Resultaten dreidimensionaler numerischer Modelle der Atmosphäre. Die wissenschaftliche Erfor-

schung der Entstehung von Leezyklonen, der Beeinflussung des Verhaltens von Kaltfronten am Gebirge, der Wechselwirkung von Föhn und Fronten und der Bildung von Starkniederschlägen in und an den Alpen, die immer wieder zu katastrophalen Überschwemmungen und Murenabgängen führen, gelang nur mit Hilfe der Ergänzung der Flugzeugmessdaten durch numerische Simulationen. Umgekehrt ermöglichen hochaufgelöste Ergebnisse von Flugzeugmessungen auch die Validierung und stetige Verbesserung der numerischen Wettervorhersage- und Klimamodelle.

Die Falcon des DLR hat mit ihren spezifischen Flugeigenschaften, d.h. als schnell und hoch fliegender Instrumententräger, im Verbund mit anderen Messflugzeugen, den unterschiedlichsten boden- und satellitengestützten Messverfahren und numerischen Simulationsmodellen in erheblichem Maße dazu beigetragen, unser Systemverständnis zu Wetter und Klima – und hier im besonderen Maße die Rolle alpiner Gebirge – entscheidend zu vertiefen. Dennoch haben sich aber auch immer wieder Schwächen im „System Falcon“ gezeigt. Hierzu gehören zum einen die relativ geringe Reichweite, die eine häufige Rückkehr zur Basis erzwingt und somit einen flexiblen Einsatz beeinträchtigt, und zum anderen die relativ geringe Ladekapazität, die die mögliche Anzahl gleichzeitig operierender Messsysteme stark limitiert. Ein allfälliges Nachfolgemodell der Falcon sollte Einschränkungen dieser Art nicht mehr aufweisen, freilich ohne die im Vergleich zu anderen Forschungsflugzeugen vorhandenen Vorteile der Falcon in Bezug auf Gipfelhöhe und Geschwindigkeit zu verlieren.

Dr. habil. Dietrich Heimann und Dr. Hans Volkert sind Wissenschaftler am Institut für Physik der Atmosphäre, Abteilung Dynamik der Atmosphäre. ◀

Abb.: Ausgedehnte polare Stratosphärenwolken im Höhenbereich 18 bis 29 Kilometer über dem nordskandinavischen Gebirgsrücken am 20. Januar 2000. Oben: Rückstreuintensität der Lasermessung aus dem Forschungsflugzeug Falcon (farbig) überlagert mit einer Computersimulation der Strömungslinien (schwarz) und Kälteinseln unterhalb des Frostpunktes (weiß). Unten: Realistisches Gebirgsprofil (grau) und geglättete Gebirgshöhen in der Simulation (schwarze Linie).