

25 Jahre

Falcon

Von Volkert Harbers und Ulrich Schumann

Das Forschungsflugzeug Falcon 20E mit dem Kennzeichen D-CMET wurde im Jahr 1976 in Betrieb genommen. Seit 25 Jahren ist die Falcon eines der wichtigsten Hilfsmittel der deutschen und europäischen Forschung zur Erkundung von Erde und Atmosphäre. Um das Flugzeug entwickelte sich eine Mannschaft und Infrastruktur, die allen Anforderungen von Experimenten auf international anerkanntem Niveau gerecht wurden. Die Falcon bietet ein günstiges Kosten-/Leistungsverhältnis, eine Flexibilität wie wenige andere Flugzeuge und fliegt oft höher als Verkehrsflugzeuge. Sie erreicht in mittleren Breiten die untere Stratosphäre, kann aber auch in geringen Höhen effektiv eingesetzt werden. Sie ist äußerst robust und wendig, was Messungen sowohl in Gewittern als auch in nur 50 m Entfernung hinter den Triebwerken eines Verkehrsflugzeugs erlaubte.



Mit der Falcon wurden wissenschaftliche Spitzenergebnisse erzielt. Erste Messungen der Turbulenz in Stratuswolken über der Nordsee gelangen bereits 1978 im Projekt JASIN (Joint Air Sea Interaction). Im Rahmen eines großen internationalen Experiments ALPEX (Alpines Experiment) wurde 1982 die Gebirgsüberströmung der Alpen vermessen. Erstmals wurden dabei die Bedingungen für die Bildung kalter Fallwinde wie der Bora über den Bergen Kroatiens bestimmt. In einem Schwerpunktprogramm „Fronten und Orographie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) hat die Falcon 1986 die Dynamik von Kaltfronten vermessen. Im Wolken- und Niederschlags-Experiment CLEOPATRA lieferten Messungen

neue Einsichten, die zu einer deutlichen Verbesserung der Wettervorhersage führten. In den letzten Jahren wurde das Flugzeug maßgeblich für Ozon- und Klimaforschung eingesetzt. Über den Bergen Norwegens wurden polare stratosphärische Wolken vermessen, die zumindest in mäßig kalten Wintern maßgeblich zum Ozonabbau beitragen.

Mit dem Flugzeug haben Wissenschaftler des DLR im europäischen Verbund den Einfluss von Emissionen aus den Triebwerken von Flugzeugen auf die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt. In einer Serie von Experimenten (SULFUR eins bis sieben) wurde die Bildung von Kondensstreifen in Abhängigkeit des Schwefelgehalts im Treibstoff bestimmt. Dazu wurden die Emissionen aus dem DLR-Flugzeug ATTAS sowie mehreren Verkehrsflugzeugen im Flug vermessen.

Die Lufthansa und die Deutsche Luftwaffe flogen hierzu ihre Flugzeuge vom Typ A310, B737, A340 und B707 im Verbund mit der Falcon. Die Messungen zeigten, dass etwa drei Prozent des Schwefels aus dem Treibstoff im Abgas in Schwefelsäure umgewandelt wird. Im Abgas bilden sich daraus viele kleine Partikel, deren Zahl von Ionen abhängt, die bei der Verbrennung in Brennkammern entstehen. Ein kleiner Teil der Partikel gefriert und beeinflusst so den Kondensstreifen und die daraus entstehenden Zirruswolken.

Über dem Nordatlantik wurde im Projekt POLINAT (Pollution in the North Atlantic Flight Corridor) die Zusammensetzung der Atmosphäre in den stark frequentier-

Abb.: Ein Flugzeug im Dienste der Umweltforschung: Die Falcon untersucht den Abgasstrahl von Verkehrsflugzeugen.



ten transatlantischen Flugkorridoren vermessen. Dabei wurden erstmalig Beiträge des Luftverkehrs zu der Zusammensetzung der Atmosphäre nicht nur in einzelnen Abgasfahnen, sondern auch großräumig bestimmt. Häufiger als bisher erwartet, wurden Spurengase aus Quellen am Boden auf dem nordamerikanischen Kontinent gefunden, was den Einfluss von Flugzeugemissionen relativiert.

Auch die Blitze in Gewittern tragen zu Stickoxiden in der Atmosphäre bei. Deren Beitrag wurde über Europa im Projekt EULINOX (European Lightning Nitrogen Oxides Experiment) bei Messungen innerhalb und im Umfeld von Gewittern bestimmt.

Abb.: Von der Arktis bis zur Antarktis: Weltweit ist die Falcon im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte im Einsatz.

Um den Unterschied zwischen Wolken in sauberer und verschmutzter Luft zu bestimmen, flog die Falcon kürzlich bis nach Punta Arenas in Südchile. Die europäische Union finanziert diese Messungen im Rahmen des Projekts INCA (Interhemispheric Differences in Cirrus Properties from Anthropogenic Emissions). Auf der Südhalbkugel wurden in der Atmosphäre deutlich weniger Spurengase und Partikel gefunden als auf der Nordhalbkugel.

Die ersten Stunden der Flugforschung

Die Auswahl des Flugzeuges vom Typ Fan Jet Falcon 20E erfolgte in den frühen 70er Jahren. Der Kaufvertrag mit der AMD (Avions Marcel Dassault) wurde im Dezember 1974 abgeschlossen. Der Kaufpreis für das Flugzeug und die Modifikationen betrug insgesamt 9,8 Mio. DM. Die DFG hatte für Nutzer aus Universitäten die

Übernahme der Flugkosten für bis zu 100 Flugstunden pro Jahr zugesagt. Das „grüne Flugzeug“ wurde am 29.9.1975 in Bordeaux abgenommen, am 30.9.1975 in München-Riem verzollt und anschließend in Melun-Villaroche bei Paris zum Forschungsflugzeug modifiziert. Die Flugerprobung fand in Istres statt, wo das fertige Flugzeug am 16. Juli 1976 von Dipl.-Ing. Ferdinand Schatt, dem damaligen Leiter des Flugbetriebs, Dr. Manfred Reinhardt, dem Direktor des Instituts für Physik der Atmosphäre, und Rechtsanwalt Jürgen Sellmer, dem Leiter der Rechtsabteilung, übernommen und von den Piloten Robert Rahn und Hans-Gerd Christner nach Oberpfaffenhofen überführt wurde. Dort nahmen es der damalige Vorstandsvorsitzende, Prof. Dr. Hermann Jordan, und Vertreter aus Forschung, Wirtschaft, von Behörden und der Bundeswehr in Empfang. In einem Festakt schilderte Prof. Dr. Heinz Fortak, damals Co-Direktor am Institut für Physik der Atmosphäre, die bis in die 50er Jahre



zurückgehenden Phasen der wissenschaftlichen Begründung und die Zielsetzung für die als Meteorologisches Forschungsflugzeug beschaffte Falcon. Seitdem ist sie ständig als Forschungsplattform zur Erkundung von Erde und Atmosphäre im Betrieb.

Die Falcon war zum Zeitpunkt der Beschaffung mit ca. 13 Tonnen maximalem Abfluggewicht einer der großen Businessjets am Markt. Sie ist ein zweistrahliger Düsenflugzeug mit einer Sonderzulassung für maximale Flughöhe von 45.000 feet (13,7 Kilometer) und konnte eine maximale Reichweite von 2.800 Kilometer und eine Geschwindigkeit bis zu 850 km/h erreichen. Die Gesamt-Nutzlast war 1.630 Kilogramm. Diese Maximalwerte waren die Kenngrößen für das Standardflugzeug bei Auslieferung, sie werden jedoch durch die Modifikationen am Flugzeug, durch den Anbau von Außenlasten

und durch die jeweils herrschenden Atmosphärenbedingungen beeinflusst. So konnte damals nur eine Flughöhe bis zwölf Kilometer tatsächlich erreicht werden.

Die Falcon wurde mehrfach dem jeweiligen Stand der Technik angepasst und entsprechend den steigenden Anforderungen der Nutzer weiter modifiziert. Zur genaueren Navigation und für schnellere und flexiblere Reaktionen der Piloten während des Fluges wurde 1989 ein neues modernes Avioniksystem EFIS installiert. 1993 wurden je zwei Montagestationen für Instrumente an den Flächen und 1996 ein zusätzliches Beobachtungsfenster an der Rumpfoberseite eingebaut. Das Einsatzspektrum der Falcon konnte dadurch wesentlich ausgedehnt werden. Dank einer Investition von ca. 7 Millionen DM durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) konnte 1995, genau zum Zeitpunkt der notwen-

digen Generalüberholung für die Triebwerke, die Falcon auch mit neuen, leiseren und leistungsfähigeren Triebwerken ausgerüstet werden (damit wandelte sich der Typ in Falcon 20-E5). Die Einsatz-Flughöhe wurde um ca. einen Kilometer vergrößert, die Reichweite auf 3.700 Kilometer verlängert und die elektrische Versorgung wesentlich verstärkt. Bis heute ist die Falcon international eines der wenigen Forschungsflugzeuge, die in der Lage sind, in Höhen bis 13 Kilometer und damit oberhalb eines Großteils des regelmäßigen Linienflugverkehrs, Messungen vorzunehmen, sie kann aber auch dicht über Land und See im Tiefflug sehr wirkungsvoll für Messungen eingesetzt werden. Sie erfüllt heute hinsichtlich Lärm und Emissionswerten alle Umweltschutzanforderungen. Mit der grundüberholten Zelle und ihrer neuen Lackierung kann das Flugzeug nun noch für viele Jahre genutzt werden.



Als Forschungsflugzeug wurde die Falcon von Anfang an von den Nutzern positiv aufgenommen und wird seit 1976 bis heute intensiv genutzt. Seit Inbetriebnahme sind fast 6.000 Flugstunden geleistet worden, das sind statistisch 240 Stunden pro Jahr, was fast der wirtschaftlichen Kalkulationsbasis von 250 Flugstunden pro Jahr entspricht. Das Flugzeug wird heute für 5.789 DM pro Belegtag und 5.658 DM pro Flugstunde am Markt angeboten.

Mit der Falcon „um die Welt“

Inzwischen erfolgte der Einsatz des Flugzeugs weltweit. Die Reichweite reicht aus, um z.B. von Oberpfaffenhofen aus Ziele wie Shannon in Irland oder Spitz-

Abb.: Diese Air to air-Aufnahme der Falcon entstand im Rahmen des Umweltprojektes SULFUR44.

bergen und Kiruna im Norden ohne Zwischenstopp zu erreichen. Längere Expeditionen, wie die bis zu den Seychellen im Indischen Ozean oder über USA bis nach Punta Arenas an der Spitze Südamerikas, wurden mit wenigen Zwischenstopps erreicht.

Als typische Nutzlast kann die Falcon heute ca. 1.500 Kilogramm für wissenschaftliche Instrumente und Beobachter aufnehmen. Besonders in den letzten Jahren war die Kabine oft bis auf den letzten freien Innenraum mit Instrumenten belegt, um eine Vielzahl von Parametern gleichzeitig messen zu können. Die Instrumente werden teils in Messbehältern unter die Flügel, teils unter den Rumpf gehängt, nutzen den Nasenmast für Turbulenzmessungen und Einlässe zur Analyse der Luftzusammensetzung mit Instrumenten in der Kabine. Am Rumpf lassen sich Antennen montieren. Für Kameras und Lidarsysteme zur Fernmessung hat die Falcon an der Rumpfober-

und -unterseite spezielle optische Fenster. Für Mikrowellenantennen kann seitlich ein Fenster durch eine Scheibe ersetzt werden, die für Mikrowellen transparent ist. Für Messungen im fernen Infrarot wird das Messgerät in einem Fenster druckdicht umbaut, sodass auf die sonst störende Scheibe verzichtet werden kann.

Nutzer kamen von den Max-Planck-Instituten für Meteorologie in Hamburg, für Chemie in Mainz, für Kernphysik (Gruppe Atmosphärenphysik) in Heidelberg, von den DFG-Sonderforschungsbereichen in Mainz/Frankfurt und Hamburg, von Instituten an den Universitäten in München, Bremen, Hannover, Karlsruhe, Bonn, von den Instituten der Helmholtz-Gemeinschaft in Jülich, Karlsruhe, Geesthacht und Bremerhaven, von einem Institut der Leibniz-Gesellschaft in Leipzig und dem Fraunhofer Institut für Atmosphärische Umweltforschung in Garmisch.



Die Falcon zieht aber auch immer mehr internationale Forschergruppen an. Die Leistungsfähigkeit von Flugzeug und Flugbetrieb wurde 1995 durch Anerkennung der Falcon als Europäische Large Scale Facility mit einem finanzierten Nutzungsprogramm durch die EU eindrucksvoll demonstriert. Einsätze der Falcon im Mesoskaligen Alpenen Programm (MAP) 1999 wurden von der National Science Foundation der USA bezahlt, was als weitere Anerkennung der Qualität zu werten ist. Die japanische Raumfahrtagentur NASDA hat Vergleichsmessungen mit der Falcon zur Überprüfung von Spurengas-messungen mit dem Satelliten ADEOS genutzt. Für die NASA und die ESA hat das DLR das Shuttle mit dem Lidarexperiment LITE unterflogen und Vergleichsmessungen mit einem Aerosol-Lidar durchgeführt. Für EUMETSAT, die europäische Betreiberorganisation von meteorologischen Satelliten, wurden Eichfaktoren des Satelliten METEOSAT gemessen.

Eine wichtige Aufgabe der Falcon ist die Erprobung und Eichung von Instrumenten für den Einsatz auf Satelliten. Ein Beispiel ist das deutsch/französische Doppeler-Wind-Lidar (Projekt WIND), dessen erfolgreiche Entwicklung und Erprobung es der ESA ermöglichte, jetzt eine „Explorer-Mission“ zur Atmosphärendynamik mit einem Wind-Lidar ADM/ÄOLUS auf einem Satelliten anzugehen. Ein Lidar funktioniert ähnlich wie ein Radar. Es sendet Lichtblitze aus, die von Partikeln und Molekülen in der Atmosphäre reflektiert werden. Mit einem Teleskop wird das reflektierte Licht gemessen. Daraus kann man auf die Konzentration der Partikel schließen. Das im DLR entwickelte Ozon- und Wasserdampf-Lidar, das vertikale Profile dieses Spurengases nach dem Prinzip des Differential-Absorptions-Lidars (DIAL) misst, wurde ebenfalls auf der Falcon auf zukünftige Satelliten-Missionen vorbereitet. Mit Mikrowelleninstrumenten und mit einem Heterodyn-Spektrometer für Messungen im fernen Infrarot wurden

Spurengase in der Stratosphäre gemessen und mit den Experimenten MAHRSI und CRISTA auf einer vom Shuttle ausgesetzten Raumplattform verglichen. Nach dem Start des Umweltsatelliten ENVISAT Mitte 2001 ist eine Validierung und Kalibrierung der Spurengasmessungen der Instrumente MIPAS und SCIAMACHY mit dem DIAL und mit In-situ-Messsystemen geplant. Für Messungen in der mittleren Stratosphäre, in Höhen bis 22 Kilometer, werden Fernmesssysteme auf der Falcon gemeinsam mit In-situ-Instrumenten auf der Geophysika eingesetzt.

Die Zukunft der Atmosphärenforschung

Kennzeichnend für die Atmosphärenforschung der Zukunft ist die Integration in einen systemaren Ansatz, in dem disziplinübergreifend und international die Prozesse in der Atmosphäre in ihrer Wechselwirkung mit dem Menschen und



der Biosphäre untersucht werden. Ein zentrales Thema ist die Untersuchung des Vertikalaustausches in der Atmosphäre und der Prozesse in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Diese Region spielt eine kritische Rolle in den Wechselwirkungen zwischen Klima und den anthropogenen Veränderungen der Atmosphäre. Sie ist besonders in niedrigeren Breiten noch weitgehend unerforscht, nicht zuletzt, weil geeignete Messflugzeuge für diesen Bereich bisher fehlen. Ein weiteres wichtiges Thema ist die integrierte Untersuchung der Wech-

selwirkungen Chemie-Klima-Biosphäre-Mensch in Schlüsselregionen, in denen sich dramatische Veränderungen abspielen, die sich auf die globale Umwelt auswirken. Beispiele hierfür sind:

- Der eurasische Raum, insbesondere die Borealzone, in der schon jetzt eine bisher ungekannt rasche Klimaveränderung zu beobachten ist und daher die Gelegenheit besteht, die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Biosphäre und Atmosphärenchemie zu untersuchen.
- Das Amazonasbecken, wo großräumige Landnutzungsänderung und Entwaldung die Prozesse der Selbstreinigung der Atmosphäre und des energetischen Antriebs der globalen atmosphärischen Zirkulation empfindlich stören werden.
- Der südostasiatische Raum, mit dem Fokus auf der direkten Belastung der Atmosphäre durch rapides Bevölkerungswachstum, Industrialisierung und Urbanisation.

Gutachter der Klimaforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft empfahlen daher 1999 die Beschaffung eines Forschungsflugzeugs, das über eine deutlich größere Reichweite verfügt und eine erheblich größere Nutzlast transportieren kann als das gegenwärtig zur Verfügung stehende Flugzeug. Im Mai 2000 trafen sich Vertreter der deutschen Atmosphärenforschung aus Einrichtungen der deutschen Universitäten, der Max-Planck-Gesellschaft, der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz und der Fraunhofer-Gesellschaft, um ein Konzept für die Zukunft der flugzeuggetragenen Atmosphärenforschung in Deutschland zu entwickeln. Die Teilnehmer kamen einstimmig zu dem Schluss, dass die Beschaffung eines modernen Forschungsflugzeuges mit wesentlich besserer Leistung in Bezug auf Gipfelflughöhe, Reichweite und Nutzlast eine wesentliche Voraussetzung für die Forschung der

Abb.: Bei Experimenten in der Arktis und über dem Indischen Ozean hat die Falcon mit dem LIDAR Wolken in der Stratosphäre und an der tropischen Tropopause vermessen und diente gleichzeitig für die Kommunikation mit der Geophysica (Bild oben), die jetzt vom DLR mit europäischen Partnern für die Validierung der Instrumente auf dem ENVISAT-Satelliten und der Stratosphärenforschung eingesetzt wird.



nächsten Jahrzehnte und für eine weiterhin führende Rolle deutscher Wissenschaftler in diesem Gebiet ist.

Mehrere Disziplinen haben hier Bedarf an einem derartigen Flugzeug. Beispiele hierfür sind:

- die Fernerkundung und In-situ Messung, besonders bei Vorbereitung, Einsatz und Validierung von Sensoren auf Satelliten;
- die Meteorologie und Klimaforschung, etwa zum dringend erforderlichen besseren Verständnis der Dynamik in Wolken sowie der Mechanismen der Niederschlagsbildung und deren Einfluss auf regionale Wasserkreisläufe;
- die Ozeanographie und Polarforschung, z.B. bei der Untersuchung der Meereisverteilung;
- die Forschung zur Beurteilung der Emissionen des Verkehrs am Boden und in der Luft auf die Zusammensetzung der oberen Troposphäre, speziell die Bildung klimawirksamer Aerosole und Wolken.

Aus den wissenschaftlichen Zielsetzungen ergeben sich konkrete technische Anforderungen: Eine große Reichweite (>8.000 Kilometer bzw. ca. zehn Flugstunden), um transkontinentale Experimente und entsprechend lange Messzeiten zu ermöglichen, eine Gipfelflughöhe von mehr als 15 Kilometer, um im Tropopausenbereich, auch in den Tropen, arbeiten zu können, eine hohe Nutzlast (ca. drei Tonnen) und eine große Kabinengrundfläche (20 bis 30 m²), damit Messungen mit zahlreichen Experimenten und wissenschaftlichem Personal aus mehreren Gruppen (multidisziplinär, international) durchgeführt werden können. Die geforderten Messmöglichkeiten könnten den Nutzern mit modernen Businessjets mit maximalen Abfluggewichten von ca. 40 Tonnen angeboten werden, zum Beispiel mit der Gulfstream G-V oder der Global Express. Die Erfahrungen mit der Falcon ermöglichen es dem DLR, hier wiederum eine Spitzen-Infrastruktur für zukünftige Forschung zur Verfügung zu stellen. Damit

könnten europäische Nutzer auch mit der DC-8 der NASA konkurrieren, die mit ca. acht Stunden Flugzeit über eine interkontinentale Reichweite und bis zu acht Tonnen Nutzlast verfügt.

Seit 25 Jahren wird die Falcon in internationalen Forschungsprojekten vielseitig eingesetzt. Im Laufe dieser Zeit haben viele Mitarbeiter die erfolgreiche Entwicklung der Falcon zu einem der wichtigsten Messträger – von der Wartung über den Betrieb bis hin zur wissenschaftlichen Nutzung – mit großem Engagement unterstützt.

*Prof. Dr. Ulrich Schumann, Direktor des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre.
Volkert Harbers, Leiter der DLR-Flugbetriebe. ◀*