

# DAS FORSCHUNGSFLUGZEUG HALO: WISSENSCHAFTLICHE NUTZUNG

H. Ziereis, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Institut für Physik der Atmosphäre

## Zusammenfassung

HALO (High altitude and long range research aircraft) basiert auf einem großen Business-Jet (G550) der Firma Gulfstream. Umfangreiche Modifikationen haben HALO in eines der modernsten und leistungsfähigsten Forschungsflugzeuge der Welt verwandelt. Die Kombination aus Reichweite (>8000 km), Gipfelhöhe (15.5 km), Nutzlast (3000 kg) und Modifikationsumfang eröffnen der Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung neue Möglichkeiten. Mit HALO werden Messungen in der Atmosphäre auf globalem Maßstab möglich: Von den Polen bis zu den Tropen und den abgelegenen Gebieten des Pazifiks. HALO wird von einem Konsortium von Partnern verschiedener wissenschaftlicher Einrichtungen aus Deutschland getragen. Zurzeit sind dreizehn Missionen für HALO für die nächsten Jahre in Planung. Zu den Fragestellungen gehören Themen der Atmosphärenchemie und Atmosphärenphysik, aber auch Erdoberflächenbeobachtung und Geophysik.

## 1. EINLEITUNG

Trotz zahlreicher Satelliten in der Erdumlaufbahn, einem umfangreichen Netz von Bodenmessstationen und immer zuverlässigeren Modellen sind Forschungsflugzeuge ein unverzichtbares Werkzeug für die Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung. Nur mit Forschungsflugzeugen kann man ein maßgeschneidertes Set von Instrumenten exakt an den Punkt der Atmosphäre bringen, den man untersuchen möchte. Darüber hinaus sind Messinstrumente auf Flugzeugen in Punkt-Messgenauigkeit, räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen Satellitenbeobachtungen in der Regel überlegen.

Die Beschaffung von HALO geht zurück auf eine Gemeinschaftsinitiative führender deutscher Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung. Bereits 1999 empfahlen Gutachter der Helmholtzklimaforschung die Beschaffung eines größeren Forschungsflugzeuges, damit Europa mit den USA auf diesem Gebiet wettbewerbsfähig wird. 2001 wurde federführend von DLR und MPG, mit Unterstützung von über 30 Partnern aus der HGF, den Universitäten und der WGL, ein Antrag beim BMBF für ein neues Flugzeug für die Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung gestellt. Im September 2004 wurde dieser Antrag genehmigt, der Auftrag an Gulfstream im Frühjahr 2005 erteilt.

Seit Januar 2009 befindet sich HALO beim DLR in Oberpfaffenhofen, dem Betreiber des Flugzeuges. Hier wird die Nutzerinfrastruktur von HALO vervollständigt. Eine erste Technomission soll noch

in diesem Jahr durchgeführt werden. Von 2011 an soll HALO für die Wissenschaft genutzt werden. Bereits jetzt liegen mehr als 13 Missionsvorschläge für die wissenschaftliche Nutzung von HALO vor.

Mit seinen vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten lässt sich der HALO für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Fragestellungen einsetzen. Um nur einige zu nennen: Wie verändert sich die Selbstreinigungskapazität der Troposphäre? Wie werden Spurenstoffe von der Troposphäre in die Stratosphäre transportiert? Welchen Einfluss hat der Flugverkehr auf die Bildung von Zirruswolken? Welche Regionen sind besonders sensitiv in Bezug auf die Bildung von Extremwetterereignissen?

Aber nicht nur Themen aus dem Bereich der Atmosphärenforschung sollen mit HALO untersucht werden. Die große Reichweite und die umfangreichen Modifikationen machen HALO auch zu einem idealen Träger für Aufgaben aus dem Bereich der Erdfernerkundung, so in der Beobachtung der Landnutzung und des Wasserkreislaufs, aber auch in der Geophysik bei der Bestimmung des Gravitations- und Magnetfelds der Erde.

Die großen Möglichkeiten von HALO haben auch die Entwicklung einer ganzen Reihe neuer Messgeräte angestoßen. An die fünfzig Instrumente für den Einsatz auf HALO sind in Bau oder Planung.

HALO wird während der kommenden Jahre einen Kristallisierungspunkt für die deutsche Atmosphärenforschung bilden, ist aber auch offen für internationale Nutzer.

## 2. HALO – PARTNER

Die Beschaffung von HALO wurde durch eine Gemeinschaftsinitiative finanziert und auch der Betrieb von HALO wird gemeinschaftlich getragen. Bereits im Sommer 2007 haben sich führende wissenschaftliche Einrichtungen auf eine Finanzierung des Basisbetriebes von HALO geeinigt.

- Deutsche Forschungsgemeinschaft
- Max-Planck-Gesellschaft
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Forschungszentrum Jülich
- Karlsruher Institut für Technologie
- Leibniz Institut für Troposphärenforschung
- Geoforschungszentrum Potsdam

## 3. FORSCHUNGSMÖGLICHKEITEN MIT HALO

HALO bietet für die wissenschaftliche Nutzung neue Möglichkeiten, die weit über das hinausgehen, was Forschungsflugzeuge in Deutschland bis jetzt bieten können. Das ist zunächst die enorme Reichweite von HALO. Abhängig von der Nutzlast kann das Flugzeug zwischen 8000 und 11 000 km weit fliegen. Nur zum Vergleich: Die Reichweite der Falcon des DLR, die bisher für diese Art von Aufgaben eingesetzt wurde, beträgt nur etwa 3000 km. Die große Reichweite von HALO ist ganz entscheidend für eine Reihe von Forschungsaufgaben auch in abgelegenen Gebieten der Erde. Damit sind Einsätze über den Polen möglich oder über entfernten Regionen der Weltmeere. Ein weltweiter Einsatz von HALO wird auch unserem geänderten Verständnis der Atmosphäre gerecht. Weg von einer regionalen Betrachtungsweise, hin zu einem globalen Verständnis der Atmosphäre und der Prozesse auf der Erdoberfläche. Es sind nicht mehr die Schadstoffströme aus dem Ruhrgebiet in den bayerischen Wald, die im Fokus stehen, sondern der Transport von Spurenstoffen auf interkontinentaler Ebene. Welche Schadstoffe werden großräumig von Nordamerika nach Europa, von Asien nach Nordamerika transportiert?

Die maximale Gipfelhöhe, die HALO erreichen kann, liegt bei 51 000 ft. Damit können auch Messungen in der untersten Stratosphäre außerhalb der Tropen durchgeführt werden. Die Tropopausenregion, also die Grenzfläche zwischen Troposphäre und Stratosphäre, ist für die Troposphärenforschung von großer Bedeutung. Sie reagiert besonders empfindlich auf Veränderungen; hier spielen sich großräumige Transportprozesse sowohl horizontal als auch vertikal ab.

Natürlich ist auch die Nutzlast selbst ein entscheidendes Kriterium für ein Forschungsflug-

zeug. Prozesse in der Atmosphäre sind oft sehr komplex und schließen eine Vielzahl von Parametern ein. Je vollständiger man diese erfassen kann, umso vollständiger wird das Bild, das man sich von bestimmten Vorgängen in der Atmosphäre machen kann. Mit einer Nutzlast von 3000 kg kann HALO mehr Instrumente tragen als die meisten anderen Forschungsflugzeuge in Europa.

Schließlich ist es auch der Modifikationsumfang von HALO selbst, der das Flugzeug zu einem einzigartigen Träger für die Forschung macht. Denn erst die zahlreichen Umbauten wie Deckendurchbrüche für Einlässe und optische Fenster, Haltepunkten unter dem Rumpf und unter den Tragflächen und anderes mehr machen aus einem großen Businessjet ein Forschungsflugzeug.

Die Kombination aus Modifikationsumfang, Reichweite, Gipfelhöhe und Nutzlast machen HALO zu einem der modernsten und leistungsfähigsten Forschungsflugzeuge der Welt.



BILD 1: HALO Im Anflug auf Oberpfaffenhofen (A. Minikin / DLR).

## 4. WISSENSCHAFTLICHE NUTZUNG

Von Anfang an bildeten die wissenschaftlichen Fragestellungen, die man mit HALO beantworten möchte, das Zentrum des gesamten Projektes. Sie waren die Triebfeder für den Antrag auf die Beschaffung von HALO und bilden den Kristallisierungspunkt für die Zusammenarbeit der verschiedenen Partner. Bislang wurden an die 50 Missionsvorschläge für HALO unterbreitet. Der wissenschaftliche Lenkungsausschuss, der sich aus führenden Wissenschaftlern aus den Hochschulen, der Max-Planck-Gesellschaft, den Helmholtzzentren und Einrichtungen der Leibnizgemeinschaft zusammensetzt, hat bisher 13 Missionen in eine engere Auswahl gezogen.

### 4.1. OMO – Oxidation Mechanism Observations

Im Sommer 2011 soll HALO für die erste große wissenschaftliche Mission abheben. Koordiniert vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und dem

Forschungszentrum Jülich wird mit dieser Mission die Selbstreinigungskapazität der Troposphäre untersucht.

Die Lebensdauer von Schadstoffen und Treibhausgasen in der Atmosphäre ist begrenzt. Einer der wichtigsten Prozesse, der für den Abbau dieser Gase verantwortlich ist, stellt die Reaktion mit dem so genannten Hydroxyl-Radikal OH dar. Durch komplexe Reaktionsketten werden die Spurengase in wasserlösliche Substanzen umgewandelt, die durch Auswaschprozesse wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Der Bildungsprozess von OH und die folgenden Reaktionen stellen ein kompliziertes Netzwerk dar, zu dessen Erfassung eine umfangreiche Instrumentierung notwendig ist. Zu den Parametern, die während OMO gemessen werden sollen, gehören unter anderem: Ozon, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Peroxyradikale, ...

Vor allem die Messung der OH-Radikale stellt dabei eine besondere Herausforderung an die Messtechnik dar. Sie sind äußerst reaktionsfreudig, reagieren bereits innerhalb weniger Sekunden mit anderen Molekülen und gehen auch Reaktionen mit Oberflächen (z. B. von Messgeräten) ein. FZJ und MPI-C haben daher ein komplexes Einlasssystem entwickelt, das es erlaubt, OH-Radikale mit der Probenluft unzerstört in das Flugzeug zu leiten, wo sie nachgewiesen werden können.

Während OMO sind Flüge in Regionen mit unterschiedlicher Schadstoffbelastung geplant: Alpenraum, Nordskandinavien, Atlantik, östliches Mittelmeer, Nordafrika.

#### 4.2. CIRRUS-ML – Formation, Lifetime, Properties and Radiative/Chemical Impact of Mid-Latitude Cirrus Clouds

Zirren bestehen aus feinen Eiskristallen und treten bevorzugt in der oberen Troposphäre auf. Sie sind wichtige Faktoren des Strahlungshaushaltes der Erdatmosphäre. Zirren können sowohl das Licht von der Sonne als auch die Infrarotstrahlung der Erde beeinflussen. Durch Wechselwirkungen mit Spurengasen haben sie auch einen Einfluss auf die Atmosphärenchemie. Die Bildungs- und Umwandlungsprozesse von Zirren sind noch nicht im Detail verstanden. Auch der Einfluss des Flugverkehrs auf die Bildung von Eiswolken über Kondensstreifen ist noch nicht ausreichend quantifiziert.

Bei CIRRUS-ML, einer Mission im Herbst 2011, die vom Deutschen-Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen koordiniert wird, sollen die Eigenschaften von Zirren umfassend untersucht werden. Messgebiet sind Mitteleuropa und der nordatlantische Flugkorridor.

Auch bei dieser Mission werden große Anforderungen an die Messtechnik gestellt. Feine Eispartikel lassen sich auf einem Messflugzeug am Besten mit Messgeräten unter den Tragflächen untersuchen. Hier ist der Einfluss der Flugzeuggeschwindigkeit auf die umgebende Atmosphäre am Geringsten.

Bestens geeignet für die Untersuchung von Eiskristallen in der Atmosphäre sind auch die LIDAR-Systeme des DLR. Ein LIDAR sendet einen Laserimpuls in die Atmosphäre und empfängt mit einem Teleskop das zurück gestreute Signal, um daraus Informationen über den Konzentrationsverlauf von Aerosolpartikeln, Wasserdampf oder Ozon ober- oder unterhalb des Flugzeuges abzuleiten.

#### 4.3. TACTS – Transport and Composition in the upper Troposphere/lowermost Stratosphere

Die Region der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre spielt eine wichtige Rolle für die Chemie und das Strahlungsbudget der Atmosphäre. Sie reagiert besonders sensibel auf Veränderungen. Spurenstoffe wie Wasserdampf, Stickoxide, FCKWs und andere werden hier in die untere Stratosphäre transportiert.

Die TACTS-Mission, die federführend von der Universität Frankfurt vorbereitet wird, soll der Untersuchung dieser Region dienen. In verschiedenen Jahreszeiten und bei unterschiedlichen geographischen Breiten soll diese Atmosphärenregion sondiert werden. Die große Gipfelhöhe von HALO erlaubt dabei Messungen in der unteren Stratosphäre außerhalb der Tropen.

Neben der in-situ Messung von Spurenstoffen, die charakteristisch für die Troposphäre bzw. Stratosphäre sind, kommt bei TACTS auch ein neuartiges Fernerkundungsmessgerät zum Einsatz. Gemeinsam entwickeln KIT und FZJ ein abbildendes Fourierpektrometer, das im thermischen Infrarotbereich arbeitet. Dieses GLORIA-AB genannte Messsystem wird unter dem Rumpf von HALO befestigt und durch einen großen Unterrumpfbehälter gekapselt.

#### 4.4. POLSTRACC – The Polar Stratosphere in a Changing Climate

Die vom KIT koordinierte Mission zielt auf die Untersuchung der arktischen Stratosphäre. Seit den achtziger Jahren wurden in dieser Region intensive Messungen durchgeführt, um den Ozonabbau im Winter zu verstehen. Mit POLSTRACC wird man nun in diese Region zurückkehren, um zu untersuchen, welchen Einfluss das sich ändernde

Klima auf die physikalisch/chemischen Prozesse der arktischen Stratosphäre hat. Bei dieser Mission wird der Schwerpunkt der Instrumentierung auf Fernerkundungsmessgeräten liegen, wie die oben erwähnten LIDAR und GLORIA-AB Messsysteme. Aber auch Partikelmesssonden werden zur Messausrüstung gehören.

#### 4.5. Weitere HALO-Missionen

Zurzeit sind dreizehn Missionen für HALO in einem fortgeschrittenen Planungsstadium. Weitere Missionsvorschläge, auch mit internationaler Beteiligung, befinden sich in der Diskussion.

Zu den Fragestellungen dieser Missionen gehören unter anderem auch die Untersuchung der Auswirkung von Aerosolen auf Wolken, Niederschlag und Klima (ACRIDICON). Während NEPTUN soll die Entwicklung von Zyklonen im Mittelmeerraum untersucht werden.

Neben Vorgängen in der Atmosphäre sollen mit Methoden der Erdbeobachtung auch Veränderungen und Prozesse auf der Erdoberfläche untersucht werden (EO-HALO). Die Mission GEOHALO zielt auf die Untersuchung der Europäisch-Afrikanischen Kollisionszone in der Ägäis mit geophysikalischen Methoden wie der Gravimetrie.

Mission	Koordination	Missionsziel
OMO	MPI-C FZJ	Untersuchung der Oxidationsfähigkeit der extratropischen Troposphäre. Transport und Umwandlungsprozesse von Schadstoffen in der freien Troposphäre
ML-CIRRUS	DLR	Bildung, Lebenszeit und Eigenschaften von Zirruswolken in mittleren Breiten. Untersuchung der Auswirkung des Flugverkehrs auf die Bildung von Wolken.
POLSTRACC	KIT	Untersuchung der unteren Stratosphäre und oberen Troposphäre in der Arktis. Untersuchung chemischer, dynamischer und mikrophysikalischer Prozesse.
TACTS / SALSA	Uni Frankfurt	Untersuchung der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre: Transport, Zusammensetzung, Kopplung zwischen Stratosphäre und Troposphäre, Chemie-Klima Kopplung, jahreszeitliche

		Variabilität.
EO-HALO	FU Berlin	Quantifizierung der Treibhausgasemissionen von natürlichen Quellen in hohen Breiten. Untersuchungen über russischen Permafrost-Böden, Feuchtgebieten und Borealen Wäldern.
ACRIDICON	MPI-C / Uni Mainz	Beeinflusst die Wechselwirkung von natürlichen und anthropogenen Aerosol mit Wolken und Niederschlag die Bildung und die Dynamik von konvektiven Wolken- systemen und das Ausmaß von Extremwetterereignissen?
GEOHALO	TU Dresden	Geophysikalische Untersuchungen der Europäisch-Afrikanische Kollisionszone in der Ägäis.
NEPTUN	KIT	Dynamische Struktur und Entwicklung von Zyklonen im westlichen Mittelmeerraum und ihre Auswirkung auf Extremregenereignisse und großräumigen Transport von Staub.
NARVAL - ACPC	MPI-M	Beitrag zu „Aerosols, Clouds, Precipitation and Climate: Barbados Field Study“. Untersuchung der Verteilung und Struktur der Passatstrom – Konvektion.
NARVAL	Uni Hamburg	North Atlantic Rainfall Validation. Validierung von konvektiven Niederschlägen auf Rückseiten nordatlantischer Tiefdruckgebiete.
CIRRUS - RS	FZJ	Weitreichender Transport (insbesondere Wasser) aus der tropischen Troposphäre in die unterste Stratosphäre und damit zusammenhängendes Auftreten klimarelevanten subvisueller Zirren.
T-NWADEX	DLR	Untersuchung der Anregung von Störungen planetarer Wellen, deren Entwicklung über dem Nordatlantik und deren Auswirkung über Europa, dem Mittelmeerraum und Nordafrika.
HYMEX-GER	KIT	Beitrag zur französischen Hymex-Initiative: (HYdrological cycle in the Mediterranean Experiment). Untersuchung des hydrologischen Zyklus und verwandter Prozesse im Mittelmeerraum.

TAB 1: HALO - Missionen