

IMMER DEM WIND NACH

DLR-Wissenschaftler waren für die Aeolus-Mission über Island unterwegs

Von Manuela Braun

Angeblich kennen die Isländer mehr Worte für Schnee als die Inuit. Und auch bei Regen und Wind dürften sie weit vorn liegen. Drei Wochen sind DLR-Atmosphärenforscher und die Mannschaft der Forschungsfieger des DLR mit der Falcon auf Island, um den Wind zu vermessen – möglichst zeitgleich und auf derselben Route wie der Satellit Aeolus der europäischen Weltraumorganisation ESA, der seit 22. August 2018 mit dem Wind-Lidar „Aladin“ (Atmospheric Laser Doppler Instrument) den Globus umkreist. Während der Kampagne lernt das Team viele Arten von Regen und Wind kennen: Regen, den der Wind waagrecht ins Gesicht drückt, fieseln Nieselregen oder einfach feuchte Kälte, die im Hangar am Flughafen Keflavik vom nassen Boden aufsteigt. Meist liegt zudem eine dichte Wolkendecke wie eine Glocke über der Lava-Landschaft. Wechselnde Hoch- und Tiefdruckgebiete sorgen für variable Windgeschwindigkeiten und der Jetstream – ein sich immer wieder verlagerndes Band aus Starkwinden – ist häufig in der Nähe zu finden: ideale Bedingungen für die Kampagne AVATARI (Aeolus Validation Through Airborne Lidars in Iceland). Darin werden die Daten des ersten Wind-Lidars (light detection and ranging) auf einem Satelliten mit Messungen aus einem Flugzeug verglichen. Auf diese Weise sollen die Windprofile aus dem All validiert und Auswertungsalgorithmen verbessert werden.

Es ist kompliziert. Niemand kann derzeit genau sagen, wie schnell sich das Tiefdruckgebiet in den nächsten Tagen vorwärtsbewegen wird. Oder ob es vielleicht etwas Unvorhersehbares macht. „Wenn sich das Tief hier schneller entwickelt, verändert sich die Situation vollkommen“, sagt Andreas Schäfer vom DLR-Institut für Physik der Atmosphäre. Auch Oliver Reitebuch und Christian Lemmerz blicken konzentriert auf die Grafiken, die Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten und Wolkenbedeckungen der nächsten Tage zeigen. Die drei haben den Aufenthaltsraum des Hostels zum Besprechungsraum umfunktioniert und planen hier die nächsten Messflüge mit dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon 20E. Abends ist der Raum mit seinen gemütlichen und etwas abgenutzten Sesselchen, einem Couchtisch mit Stehlampe und einem kleinen Bücherregal in der Ecke der Treffpunkt für alle, um den Tag ausklingen zu lassen.

Eigentlich wird das 40 Kilometer von der Landeshauptstadt Reykjavik entfernt gelegene Hostel eher von Urlaubern genutzt, die entweder einen sehr frühen Flug vom isländischen Flughafen Keflavik nach Hause gebucht haben oder sehr spät auf Island angekommen sind. Früher lebte und arbeitete US-Militärpersonal auf der ehemaligen NATO-Basis Ásbrú. Heute ist das Gebiet offen zugänglich und in einigen der Wohngebäude haben sich einfache, praktische Hotels eingerichtet, aus deren Zimmern man bereits auf die Umzäunung des Flughafens blickt. Für das Aeolus-Team aus Wissenschaftlern, Piloten und Technikern ideal: Bis zum Hangar, in dem die Falcon 20E geparkt ist, sind es nur wenige Minuten mit dem Auto. Daher ist das Hostel für drei Wochen zum „Basislager“ für eine wissenschaftliche Messkampagne des DLR geworden.

AEOLUS

Die Mission Aeolus verdankt ihren Namen dem griechischen Windgott. Aeolus herrschte im Auftrag von Zeus, dem mächtigsten Gott im Olymp, über die Winde Boreas, Euros, Zephyros und Notos. In Homers Odyssee ließ er für König Odysseus für dessen Schiffsfahrt günstige Winde wehen und gab ihm die Winde in einem Sack mit auf die Reise. Als die Schiffsbesatzung den Windsack kurz vor der Ankunft im Heimathafen öffnete, wurde das Schiff durch die ungünstigen Winde wieder zu seinem Abfahrtsort zurückgetrieben.

Auf der Satellitenspur unterwegs

Die erste Woche verlief so gut, dass das Kampagnen-Team es kaum glauben konnte: Schon beim Überführungsflug am 9. September 2019 vom heimischen Oberpfaffenhofen nach Island schalteten die Wissenschaftler die Instrumente an Bord der Falcon ein und folgten der Spur des Aeolus-Satelliten nördlich von Schottland. Zum einen zeichnete mit dem Lidar A2D ein Instrument die Windgeschwindigkeit auf, das über dieselbe Systemarchitektur und Empfangsoptik wie „Aladin“ auf Aeolus verfügt, zum anderen war mit „2-µm wind lidar“ ein erprobtes und bewährtes Instrument im Einsatz, das genauere Messungen zu den Windgeschwindigkeiten liefert. Der erste AVATARI-Datensatz zum Vergleich mit den Aeolus-Daten war somit schon nach dem Transferflug gespeichert. In den folgenden Tagen ging es Schlag auf Schlag: Nahezu täglich hob die Falcon ab, um möglichst synchron mit dem Satelliten den Wind zu vermessen.

Windgeschwindigkeiten mit bis zu 60 Metern in der Sekunde, gemischte Bewölkung – und dann noch der Flug am 17. September durch den Jetstream mit seinen starken Winden. „Ein Traum“, sagt Oliver Reitebuch, wissenschaftlicher Leiter des Aeolus-DISC am DLR.

Hoffen auf ideale Bedingungen

Nun, in der zweiten Woche der AVATARI-Kampagne, bröckelt der Traum ein wenig: Beim Kalibrierungsflug über dem grönländischen Eis macht eine Sicherung am Wind-Lidar Probleme, sodass nicht alle Messungen wie geplant durchgeführt werden können und nach der Rückkehr in den Hangar die Fehlerbehebung ansteht. Und dann wird das Wetter über Island unberechenbar. Zwei Mal am Tag ruft Meteorologe Andreas Schäfler die Vorhersagen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage ab (ECMWF; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

DAS INSTRUMENT ALADIN:

ALADIN ist das erste Lidar (light detection and ranging) auf einem Satelliten zur entfernungs aufgelösten Messung von Windgeschwindigkeiten. Kurze Laserpulse werden ausgesandt. Mit Hilfe des aus der Atmosphäre zurückgestreuten Lichts wird die Wellenlängenverschiebung mit Spektrometern bestimmt. Über den Dopplereffekt ist diese proportional zur Windgeschwindigkeit entlang des Laserstrahls.

- Laserwellenlänge: 355 Nanometer
- Laserenergie: 60 Millijoule
- Pulswiederholrate: 50 Hertz
- Teleskopdurchmesser: 1,5 Meter
- Vertikale Auflösung: 500 Meter–2 Kilometer
- Horizontale Auflösung 10–90 Kilometer
- Spezifizierte Messgenauigkeit:
2–3 Meter/Sekunde zufälliger Fehler
0,7 Meter/Sekunde systematischer Fehler

LASER-INSTRUMENT MIT KNOW-HOW AUS DEUTSCHER INDUSTRIE UND WISSENSCHAFT

Der Erdbeobachtungssatellit Aeolus ist am 22. August 2018 vom ESA-Raumflughafen in Kourou (Französisch-Guyana) gestartet und umkreist die Erde in einer Höhe von 320 Kilometern. Die Mission ist Bestandteil des „Living Planet“-Programms der ESA, bei dem Deutschland starker Partner und Beitragszahler ist. Das DLR Raumfahrtmanagement in Bonn steuert im Auftrag der Bundesregierung die deutschen ESA-Beiträge. Mit Aeolus und insbesondere dem Laser-System Aladin kann die mittelfristige Wettervorhersage verbessert werden. An der Entwicklung des Laser-Instrumentes sind die deutsche Industrie und die Forschung beteiligt. Die OHB System AG in München hat die Sendee- und Empfangsoptik für den UV-Laserstrahl entwickelt. Die Tesat-Spacecom GmbH in Backnang hat neben dem Kommunikationssystem auch den Referenzlaser für das Aladin-Instrument der Mission gebaut. Airbus in

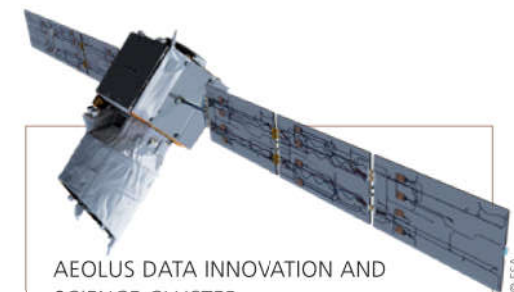
Friedrichshafen war für das elektrische System auf der Satellitenplattform zuständig. Einen technischen Durchbruch erzielten eine Reihe von kleinen und mittelständischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen bei der Qualifizierung der Laseroptiken für den Betrieb im Vakuum. Die Firmen Layertec (Mellingen) und Laseroptik (Garbsen) lieferten Optiken und Beschichtungen, das Laser-Laboratorium Göttingen, das Laser Zentrum Hannover sowie das Institut für Technische Physik des DLR in Stuttgart führten die Testmessungen durch. Diese Einrichtungen trugen wesentlich dazu bei, dass eine Optik in das Instrument eingebaut werden konnte, die trotz der hohen Laserleistung die geplante dreijährige Lebensdauer des Satelliten zuverlässig arbeitet.

➔ Mehr Informationen unter: t1p.de/tuey

Ein idealer Messflug muss mehrere Bedingungen erfüllen: Die Bewölkung unterhalb der vorhergesagten Satellitenbahn sollte weder zu hoch noch zu dicht sein, da die Laserpulse aus dem All dichte Wolkendecken nicht durchdringen können. „Allerdings sind einige Wolken auf der Messstrecke wiederum ganz gut, um die Reaktion des Aeolus-Instruments auf Wolken zu beobachten“, ergänzt der Meteorologe. Da der Satellit die Erde in Nord-Süd-Bahnen umkreist und nur seitlich zur Flugrichtung misst, lassen sich Ost-West-Winde am besten erfassen. Um detaillierte Windprofile berechnen zu können, eignen sich hohe Windgeschwindigkeiten besonders, gerne auch abwechslungsreich in verschiedenen Höhen über dem Boden. Besonders interessant für die Atmosphärenforscher ist daher der Jetstream mit seinen Starkwinden. „Wir wollen anspruchsvolle Szenarien, die eine Herausforderung für den Satelliten sind“, betont Kampagnen-Koordinator Christian Lemmerz. Dabei darf die Flugroute der Falcon keinesfalls in den südlich von Island gelegenen nordatlantischen Flugkorridor reichen, in dem sich ein Großteil des Flugverkehrs von Europa nach Nordamerika abspielt. Kommt die Falcon zu dicht an diesen Bereich heran, fordert die Air Traffic Control zur Umkehr auf. Bei der Planung der Messflüge ist es außerdem wichtig, die Ruhezeiten der Besatzung sowie der Piloten Roland Welser und Thomas van Marwick zwischen den Flügen einzuhalten.

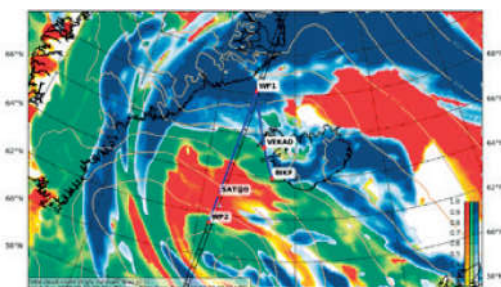
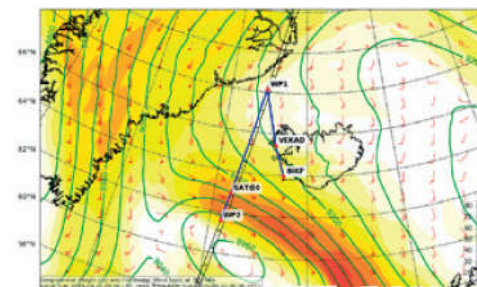
Lückenfüller für die Wettervorhersage

Mit Aeolus fliegt eine Mission, die Lücken in der mittelfristigen Wettervorhersage füllen soll. Sie stand lange oben auf der Wunschliste der World Meteorological Organization (WMO), einer Sonderorganisation der Vereinten Nationen, zu der auch der Deutsche Wetterdienst gehört. „Von den oberen Stockwerken der Atmosphäre liegen uns nur wenige Windmessungen vor“, sagt DLR-Atmosphärenforscher Oliver Reitebuch. Bislang werden Messungen in Bodenhöhe, punktuelle Windmessungen mit Ballonen oder Radiosonden über Land genutzt. Aber was sich in den globalen Luftschichten abspielt, ist nicht ausreichend vermessen. „Auf der Südhälfte der Erde, in den Tropen und über den Ozeanen fehlen uns die Daten.“ Der Wind ist aber für die Zirkulation in der Atmosphäre entscheidend. Eine dünne Datenlage macht Vorhersagen beispielsweise von tropischen Zyklonen ungenau, aber auch die Vorhersage von Windgeschwindigkeiten im Jetstream für den Flugverkehr.



Das DLR koordiniert das Aeolus DISC, das von der ESA gefördert wird. Zusammen mit zehn internationalen Partnern hat es die Aufgabe, das Aladin-Instrument an Bord des Satelliten Aeolus und die Qualität der Datenprodukte zu überwachen und verbessern. Zudem entwickelt es Algorithmen und Prozessoren weiter, um die Detektorsignale des Wind-Lidars zu Wind- und Aerosolprodukten zu verarbeiten. Außerdem führt das Cluster Experimente mit numerischen Modellen zu Wettervorhersagen durch, um den Einfluss der Aeolus-Daten auf die mittelfristige Vorhersage zu untersuchen.

Ende der Achtzigerjahre fand der erste Workshop zur Mission bei der ESA statt, um die Rahmenbedingungen festzulegen. Mit der Entwicklung des Doppler-Lidars „Aladin“ wurde Neuland betreten – schließlich wurde beschlossen, einen Prototypen des Instruments auf Flugzeugen zu testen. 2009 startete die erste Mission mit einem Demonstrator an Bord der DLR-Falcon. Heute, nachdem der Satellit seinen Betrieb im All aufgenommen hat, erfasst dieser Vergleichswerte, um die Daten aus 320 Kilometer Höhe zu validieren. Reitebuch begleitet die Aeolus-Mission seit zwei Jahrzehnten, „eigentlich den Großteil meines Berufslebens“. Das DLR hat dabei vor allem eine Aufgabe: die Algorithmen und Prozessoren zu entwickeln, die die Detektorsignale, die vom Satelliten zur Erde gefunkt werden, in Endprodukte umwandeln.



Die Vorhersagen des European Centres for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) für Wind (Bild 1) und Wolken (Bild 2) für den 22. September 2019 zeigen hohe Windgeschwindigkeiten und relativ geringe Bewölkung. Der Satellit Aeolus – dessen voraussichtliche Spur die DLR-Wissenschaftler als schwarze Linie in die Wetterkarten eingetragen haben – wird ein Tiefdruckgebiet südlich von Island überfliegen. Bild 1 zeigt farbig kodiert die Windgeschwindigkeiten in rund zehn Kilometer Höhe. Die blaue Linie markiert die Strecke der Falcon von Keflavik aus, ihren Flug unter dem Satelliten (WP2 bis WP1) sowie die Rückkehr nach Keflavik. Bild 2 zeigt die Wolkenbedeckung, wie man sie vom Satelliten aus sehen würde. Hohe Wolken sind blau, mittelhoch Wolken grün und tiefe Wolken rot dargestellt.

Rendezvous mit Aeolus

Im Aufenthaltsraum des Hostels fällt die Entscheidung: Am Sonntagmorgen sehen die Bedingungen für einen Messflug am günstigsten aus: Ein Band aus südöstlichen Winden befindet sich in Reichweite und der Punkt, an dem die Falcon auf den vorhergesagten Satellitentrack einschwenken kann, scheint in einer Region mit höheren Windgeschwindigkeiten zu liegen. Auch wenn der Satellit mit einer Geschwindigkeit von 7,5 Kilometern pro Sekunde seine Bahn auf 320 Kilometer Höhe zieht und die Falcon in rund zehn Kilometer Höhe „nur“ mit 200 Metern in der Sekunde fliegt, haben die Instrumente dieselbe Blickrichtung. Daraufhin übernehmen die Mitarbeiter des DLR-Flugbetriebs: Die Piloten erhalten für ihre Flugplanung die Positionsdaten und Koordinator Frank Probst meldet Flug und Route bei der Air Traffic Control an. Gegen 7 Uhr morgens soll die Falcon abheben, das „Rendezvous“ mit dem Satelliten wird um 8.28 Uhr Ortszeit stattfinden.

Das erste Team ist bereits um 4.10 Uhr am Hangar. Die Instrumente sind empfindlich. Sie müssen vor dem Flug eingeschaltet und auf die richtige Temperatur gebracht werden. Im Hangar war es nachts kalt. Christian Lemmerz quetscht sich zwischen Instrumentenracks und die Ausrüstung zur Steuerkonsole des Laserinstruments. Noch eine Anlage mehr und in der Falcon würde kein Wissenschaftler mehr Platz finden. Jeder für die Forschung verfügbare Zentimeter wurde ausgenutzt. Mehrere Tage hatte es gedauert, bis in Oberpfaffenhofen alles für die Flugkampagne eingebaut und auf Funktion und Sicherheit geprüft worden war. Kampagnen-Koordinator Christian Lemmerz kennt die Instrumente in- und auswendig. Schalter werden umgelegt, die Laserkühlung gestartet, Programme aktiviert. Nach und nach erwachen A2D und 2-µm zum Leben. Techniker Christoph Grad kontrolliert den Nasenmast der Falcon, in dem Sensoren während des Fluges Informationen zu Windrichtung und -geschwindigkeit sowie zu Temperaturen und Feuchtigkeit aufzeichnen. Für die Wissenschaftler sind dies zusätzliche Informationen, mit denen sie ihre Windmessungen in Richtung Boden in den Flugverlauf einordnen können.

Um 5 Uhr trifft mit den Piloten und dem Wissenschaftler, der das 2-µm-Instrument während des Fluges betreut, der Rest des heutigen Teams im Hangar ein. Vor den großen Metalltoren ist es immer noch dunkel. Der Regen fällt stetig. Pilot Thomas van Marwick legt seine Tasche im Flieger ab und das für den dreieinhalbstündigen Flug geschmierte Brot bereit. Bei dieser Kampagne sind keine anspruchsvollen Flugmanöver gefragt. Roland Welser ist seit Jahrzehnten am Steuerknüppel der Falcon unterwegs, Thomas van Marwick ist vor sechs Jahren als Pilot ins DLR gekommen. „Für uns ist das kein aufregender Flug“, sagt er. Da bleibt auch Zeit, zwischendurch zu frühstücken. „Aber über Island und Grönland zu fliegen ist immer ein unvergleichlicher Anblick.“ Ruhig und konzentriert werden die letzten Vorbereitungen durchgeführt. Jeder kennt den Zeitplan. Verschiebungen sind nicht möglich, denn das Forschungsflugzeug muss sich in die Abflüge der großen Verkehrsflieger einreihen. Schließlich wird die Falcon aus dem Hangar geschoben. Um 6.58 Uhr hebt sie ab.

Nach der Landung um 10.30 Uhr steht fest: Die Entscheidung, den Flug durchzuführen, war die richtige. Auf der Satellitenspur gab es nur im nördlichen Teil die unerwünschten hohen Wolken, ansonsten blickten die Instrumente auf einige Wolken in den niedrigen Schichten über dem Boden. Die Windgeschwindigkeit reichte von moderaten bis hin zu höheren Geschwindigkeiten von etwa 50 Metern pro Sekunde. Eine Festplatte mit Daten wandert aus der Falcon in die Hände von Stephan Rahm. Der hat sich in seinem Hostelzimmer ein Bodensegment aufgebaut, in dem die frischen Daten für einen ersten Eindruck prozessiert und begutachtet werden können. 200 Gigabyte neue Daten für den Abgleich mit den Satellitendaten und für die Optimierung der Auswertungsalgorithmen kommen so mit jedem Flug hinzu. „Die Kollegen fliegen die Falcon ja gerne, bis sie fast hinunterfällt“, sagt Rahm scherzhaft und verschwindet mit der Daten-Ausbeute in Richtung Rechner.



Die Messinstrumente sind empfindlich – jeder Ausfall während des Fluges bedeutet den Verlust von Forschungsdaten. Oliver Reitebuch kontrolliert vor dem Flug, ob alle Instrumente startklar sind.



Auf engstem Raum bereitet Kampagnen-Koordinator Christian Lemmerz (rechts) mit Uwe Marksteiner in der Falcon die Instrumente für den anstehenden Messflug vor

© DLR



Die Piloten Roland Welser (links) und Thomas van Marwick gehen die letzten Prozeduren durch, bevor die Falcon mit Instrumenten und Wissenschaftlern abhebt



Christoph Grad ist dafür zuständig, dass die Falcon mit ihren eigenen Messinstrumenten während des Fluges Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit oder auch Windrichtung erfassen kann

Erfolgreiche Bilanz für AVATARI

„Wir benötigen solche Kampagnen des DLR aus mehreren Gründen“, erläutert Thorsten Fehr von der ESA. „Zum einen haben sie vor dem Start geholfen, die Mission vorzubereiten. Zum anderen verbessern sie jetzt die Mission durch die Kalibrierung und Validierung der Satellitendaten.“ Und auch die Definition einer möglichen Nachfolge-mission kann nur erfolgen, wenn Schwachstellen, Erfolge und Bedarfe sorgfältig analysiert wurden. Neben dem DLR hat derzeit nur ein ausgewählter Kreis von internationalen Wetterdiensten Zugriff auf die Aeolus-Daten aus dem All. Erst wenn die Qualität der Daten gewährleistet und ihre Prozessierung optimal sind, können die globalen Windprofile in die bestehenden Modelle zur Wettervorhersage einfließen. Voraussichtlich ab Anfang 2020 sollen die Daten der wissenschaftlichen Community zur Verfügung gestellt werden.

Am Ende der AVATARI-Kampagne wird die Falcon mit den Instrumenten an Bord insgesamt zehn Mal der Spur des Aeolus-Satelliten gefolgt sein. Zwei Mal konnten die Wissenschaftler ihre Instrumente bei Flügen über dem grönländischen Eis kalibrieren. Insgesamt zwölf Flüge sind das Ergebnis. „Das ist mehr als bei allen Kampagnen, die wir zuvor für die Aeolus-Mission durchgeführt haben“, zieht DLR-Atmosphärenforscher Oliver Reitebuch Bilanz. Und auch mehr, als man bei der Wittersituation während der Kampagne erwartet hätte. Damit ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zu einer genaueren mittelfristigen Wettervorhersage getan. Die Windprofile, die Aeolus zum Beispiel in den Tropen erfasst, werden global die Vorhersagen verbessern. „Beim Wetter ist letztendlich alles miteinander verwoben“, sagt Oliver Reitebuch.

Manuela Braun ist für die strategische Kommunikation der Raumfahrtforschungsthemen verantwortlich.



Nicht immer waren Wetter und Wind günstig – letztendlich aber konnten die Wissenschaftler auf einer Rekordzahl von Messflügen umfangreiche Datensätze gewinnen: Mit diesen können sie nun Satellitendaten auf die Probe stellen und neue Auswertungsalgorithmen entwickeln.