

ATMOSPÄRENPHYSIK

GLORIA am Horizont

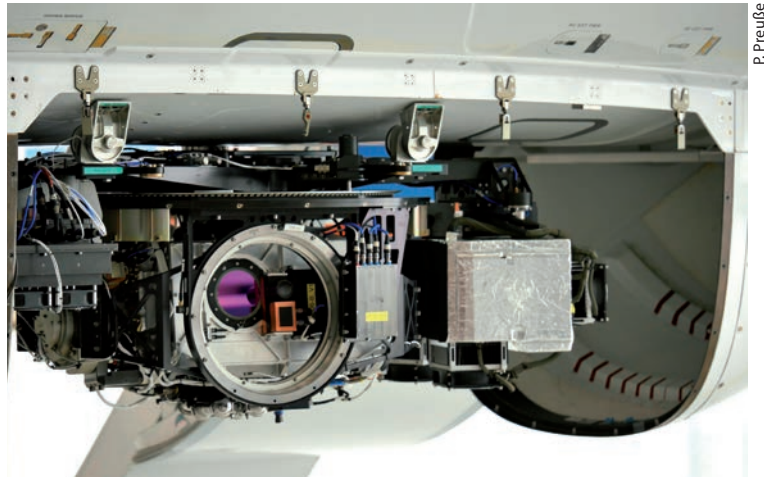
Das Infrarotspektrometer erlaubt es, klimarelevante Prozesse in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre gezielt zu untersuchen.

Martin Riese und Hermann Oelhaf

Dürfte sich ein Atmosphärenphysiker etwas wünschen, so stünde ganz oben auf der Liste wahrscheinlich eine dreidimensionale Aufnahme mit präzisen Informationen zu Temperatur und Zusammensetzung der Atmosphäre – von zeitlicher Auflösung und langer Messreihe ganz zu schweigen. Erste Messungen des Infrarotspektrometers GLORIA belegen eindrucksvoll, dass dieser Wunsch in Erfüllung gehen könnte.

Die Luftschichten der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre in Höhen zwischen 5 und 25 km beeinflussen unser Klima erheblich. In diesem relativ kalten Bereich der Atmosphäre wirken sich Änderungen in der Konzentration von Treibhausgasen und Wolken besonders stark auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre aus. Die räumlich und zeitlich sehr variablen Treibhausgase wie Wasserdampf und Ozon sorgen dabei für hohe Unsicherheiten. Beispielsweise tragen unter anderem geringe, bisher unverstandene Variationen von Wasserdampf in der unteren Stratosphäre (0,5 ppmv, etwa 10 Prozent) zur Variabilität der Bodentemperatur auf Zeitskalen von Jahrzehnten bei. So hat ein plötzlicher Rückgang des Wasserdampfes im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts den berechneten Temperaturanstieg infolge anthropogener Treibhausgase wie Kohlendioxid und Methan um etwa 25 Prozent auf rund 0,1 Kelvin pro Jahrzehnt verlangsamt [1]. Gleichzeitig ist die räumliche und zeitliche Variabilität in der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre das Ergebnis der komplexen Wechselwirkung einer Vielzahl atmosphärischer Prozesse. Ihr unzureichendes Verständnis wirkt sich auf die Vorhersagekraft globaler und regionaler Klima- und Wettermodelle aus. Das Infrarotspektrometer GLORIA soll dazu beitragen, diese Prozesse besser zu verstehen (Abb. 1). Dazu gehören beispielsweise der konvektive Aufwärtstransport von Wasserdampf und ozonzerstörenden Substanzen in den Tropen, der quasi-horizontale Austausch von Luftmassen zwischen der oberen tropischen Troposphäre und der unteren extratropischen Stratosphäre sowie die globale Umverteilung von Spurenstoffen durch die von atmosphärischen Wellen getriebene stratosphärische Brewer-Dobson-Zirkulation.

Die Stratosphäre in etwa 10 bis 50 km Höhe beeinflusst das bodennahe regionale Klima und Wetter aber



P. Preuß

Das Infrarotspektrometer GLORIA erlaubt erstmals die bildgebende Horizontsondierung. Das Instrument mit

einem Durchmesser von 1,2 m wird unter dem Rumpf von Forschungsflugzeugen wie HALO angebracht.

nicht nur über Strahlungseffekte von Treibhausgasen, sondern auch über die großräumige Luftzirkulation. Der stratosphärische Polarwirbel ist ein großräumiges Tiefdruckgebiet über dem Winterpolargebiet, das von einem Starkwindband rund um den Globus umschlossen ist. Der Wind weht dabei von Westen nach Osten, und seine Stärke beeinflusst nach neuen Erkenntnissen auch den polaren Strahlstrom in der Troposphäre in einer Höhe von 8 bis 12 km. Dieser Jetstream ist vom Flugverkehr bekannt, wo er beispielsweise die Reisezeit von Nordamerika nach Europa verkürzt. Die Kopplung von Polarwirbel und Jetstream ist bisher wenig verstanden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass ein Abschwächen des Polarwirbels zu einer Verschiebung

KOMPAKT

- Im infraroten Spektralbereich emittieren viele Moleküle und Spurengase der Atmosphäre charakteristische Strahlung, die sie identifizierbar macht.
- Aus Spektren, die in Flughöhe gegen den Hintergrund des kalten Weltraums aufgenommen werden, ergibt sich die dreidimensionale Verteilung der Moleküle.
- Die Daten helfen dabei, realistische Anfangsbedingungen für Klimamodelle festzulegen und Simulationen zu verbessern.
- Von Satelliten aus wären globale Zeitreihen mit sehr guter vertikaler und horizontaler Auflösung möglich.

Prof. Dr. Martin Riese, Forschungszentrum Jülich, Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich und Dipl.-Met. Hermann Oelhaf, Karlsruher Institut für Technologie, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

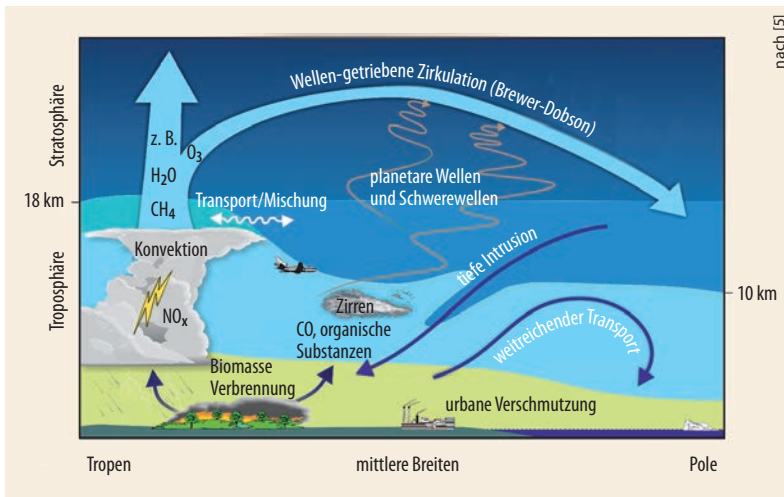


Abb. 1 Die chemische Zusammensetzung der oberen Troposphäre (hellblau) und der unteren Stratosphäre (blau und dunkelblau) hängt davon ab, wie verschiedene Prozesse miteinander wechselwirken, die auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ablaufen.

der Lage des Jetstreams führt, die in Nordeuropa kalte trockene Winter begünstigt [2]. Die Stärke des Polarwirbels wird maßgeblich von planetaren Wellen beeinflusst. Planetare Wellen werden in der Troposphäre angeregt und breiten sich in die Stratosphäre aus. Sie stellen globale Schwingungen der Luftströmung entlang der Breitenkreise dar, bei denen die Coriolis-Kraft als Rückstellkraft fungiert. Während der Einfluss planetarer Wellen auf den Polarwirbel recht gut verstanden ist, gilt dies nicht für kleinräumigere Schwerewellen [3]. Diese Luftschwingungen entstehen mit der Schwerkraft als Rückstellkraft, wenn eine Luftströmung ein Gebirge überqueren muss (orographische Anregung), aber auch durch Konvektion oder andere Instabilitäten innerhalb der Strömung. Wie Schwerewellen angeregt werden, sich im Hintergrundwind ausbreiten und mit diesem wechselwirken, ist noch nicht gut verstanden.

Zurzeit fehlt eine globale dreidimensionale Datenbasis, um wichtige Klima- und Wetterprozesse wie Schwerewellen oder feine Transport- und Mischungsstrukturen zu quantifizieren. Sie treten auf, wenn Spurengase den Bewegungen von Luftmassen folgen [4]. Besonders benötigt werden Messungen von Temperatur, Wasserdampf, Ozon, Schwefelsubstanzen und langlebigen Spurengasen in der oberen Troposphäre

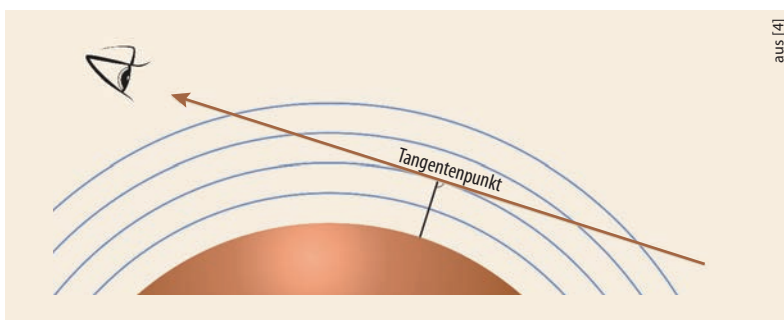


Abb. 2 Das Instrument blickt bei der Horizontsondierung tangential zur Erdoberfläche durch die Atmosphäre. Der Tangentialpunkt, also der Ort des Sehstrahls mit dem kürzesten Abstand zur Erdoberfläche, gilt häufig als Messort.

und Stratosphäre mit hoher vertikaler Auflösung und dichter horizontaler Abtastung nötig. Um diese Lücke zu schließen, haben das Forschungszentrum Jülich und das Karlsruher Institut für Technologie in den letzten zehn Jahren die bildgebende Infrarot-Horizontsondierung entwickelt [5, 6]. Ziel dabei ist es, diese Messtechnik auf einem Satelliten in einer erdnahen Umlaufbahn einzusetzen. Das große Potenzial der Methode deutet sich bereits nach ersten Messungen auf dem deutschen Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) und der russischen M55-Geophysica an.

Hochaufgelöste Fernerkundung

Der infrarote Spektralbereich eignet sich hervorragend, um die Bestandteile der Atmosphäre aus der Ferne zu erkunden, da hier viele Moleküle Schwingungs- und Rotationsübergänge als „Fingerabdrücke“ besitzen. Bisher kamen bei den Messungen hauptsächlich Instrumente mit Teleskopen und drehbaren Spiegeln zum Einsatz. Infrarot-Emissionsmessungen sind bei Tag und Nacht möglich, wenn das Instrument tangential zur Erdoberfläche durch die Atmosphäre blickt und das Spektrum der atmosphärischen Infrarotstrahlung vor dem Hintergrund des kalten Weltraums registriert (**Abb. 2**). Unterschiedliche Einstellungen der Spiegel führen zu Messungen an verschiedenen vertikalen und horizontalen Positionen, sodass die Aufnahme gut aufgelöster zweidimensionaler Bilder vergleichsweise lange dauert. Diesen Nachteil überwindet die bildgebende Horizontsondierung des flugzeuggetragenen Infrarotspektrometers GLORIA (Gimballed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere).

GLORIA kombiniert ein zweidimensionales Infrarot-Detektorfeld mit einem Fourier-Transformspektrometer, das auf einem Michelson-Interferometer beruht. Mittels Fourier-Transformationen lassen sich aus Interferogrammen der aufgenommenen Strahlung atmosphärische Infrarotspektren berechnen. Das Detektorfeld ist auf den Horizont ausgerichtet und verfügt über 6144 Pixel (horizontal: 48 Pixel, vertikal: 128 Pixel). Weil sich jedem dieser Pixel ein Sehstrahl zuordnen lässt (**Abb. 2**), entstehen gleichzeitig 6144 Horizontsondierungen der atmosphärischen Infrarotstrahlung. Das damit verbundene zweidimensionale Bild der atmosphärischen Infrarotstrahlung reicht von der Flughöhe des Instruments (etwa 15 km bei HALO) bis in 4 km Höhe, sodass sich für zwei Messungen in vertikaler Richtung im Mittel eine Höhendifferenz von etwa 150 m ergibt. Die von GLORIA gemessenen Infrarotspektren decken Wellenzahlen von $780 \text{ bis } 1400 \text{ cm}^{-1}$ (Wellenlänge: 7 bis $13 \mu\text{m}$) ab. In diesem Bereich finden sich mehrere tausend Übergangslinien der Spurengase, sodass Spektralbereiche mit Breiten von etwa 5 cm^{-1} ausgewertet werden, in denen Selbstabsorption entlang des optischen Weges in der Atmosphäre klein bleibt. Dann stammt der größte Teil der Strahlung aus einer ein bis zwei Kilometer hohen Schicht oberhalb

des Tangentenpunkts mit einer horizontalen Ausdehnung von 200 bis 300 km. Rechnungen zum Strahlungstransport ermöglichen es, aus den gemessenen Spektren atmosphärische Temperaturen und die Konzentrationen der Spurengase zu berechnen.

Mit GLORIA lassen sich Wasserdampf, Ozon, HDO, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12, HCFC-12, SF₆, HNO₃, N₂O₅, ClONO₂, HO₂NO₂, PAN, C₂H₆, H₂CO und NH₃ nachweisen. In den Spektren zeigen sich auch subvisuelle Zirruswolken. Die Temperatur der Atmosphäre folgt aus dem Nachweis von Kohlendioxid (CO₂). In der Atmosphäre ist CO₂ aufgrund seiner langen Lebensdauer sehr gut durchmischt und die Konzentration sehr genau bekannt. Aus den gemessenen CO₂-Signaturen leitet sich daher mithilfe der Planck-Funktion die Temperatur mit geringem Fehler ab. Die spektrale Auflösung der Messung hängt von der optischen Wegdifferenz ab, die das Interferometer bereitstellt. Momentan stehen bei GLORIA zwei Modi zur Auswahl: der spektral hochauflösende „Chemiemodus“ (0,065 cm⁻¹) mit moderater räumlicher Abtastung und der räumlich hochauflösende „Dynamikmodus“ mit reduzierter spektraler Auflösung (0,65 cm⁻¹).

Der „Chemiemodus“ eignet sich besonders dazu, Querschnitte vieler Parameter längs der Flugrichtung bei einer horizontalen Abtastung von 2 bis 3 km zu erfassen und damit die Struktur des Tropopausenbereichs über weite Wegstrecken abzubilden. Die hohe spektrale Auflösung erleichtert es, die Signaturen der Gase von eher breitbandigen Strukturen, wie sie für Wolken und Aerosole typisch sind, zu diskriminieren. Dies verbessert die Analyse des Wasserdampf-mischungsverhältnisses um z. B. so genannte Tropopausenfalten abzubilden (Abb. 3). An einer Tropopausenfalte gelangt sehr trockene stratosphärische Luft weit hinunter in die sonst feuchte Troposphäre [7]. Tropopausenfalten gehen häufig mit Kaltfronten im Bereich des Polarjets einher und sind Brüche in der Tropopause, die normalerweise eine Sperrschicht zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre darstellt. Die Messungen belegen eine extreme horizontale und vertikale Variabilität des Wasserdampfmischungsverhältnisses, das sich innerhalb weniger zehn Kilometer um zwei Größenordnungen verändert, und demonstrieren das Potenzial von GLORIA zur Untersuchung mesoskaliger Austauschprozesse zwischen Stratosphäre und Troposphäre.

Dreidimensionale Tomographie

Durch die hohe Messgeschwindigkeit im „Dynamikmodus“ lassen sich die azimutale Blickrichtung variieren und dreidimensionale Atmosphärenvolumina tomographisch vermessen. Dazu betrachtet GLORIA ein ausgesuchtes Volumen aus verschiedenen Blickrichtungen (Abb. 4). Bezogen auf die Flugrichtung sind Drehungen des Blickfeldes möglich. Zwanzig äquidistante Winkelstellungen überdecken diesen Bereich innerhalb von 40 s. Eine geschlossene Flugkurve, bei-

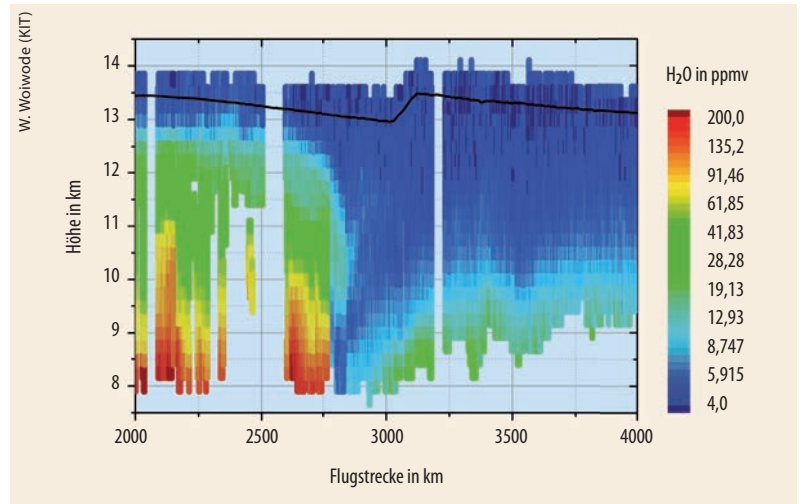


Abb. 3 Auf dem Weg von Malta nach Nordschweden zeigte sich am 12. Januar 2016 über Mittelitalien eine ausgeprägte Tropopausenfalte (2600 bis 3000 km). Extrem trockene stratosphärische Luft mit einem Anteil von 4 bis 6 ppmv Wasser-

dampf gelangte weit hinab in die Troposphäre. Kleine Datenlücken sind durch Kalibrierungszyklen und intransparente Wolken bedingt. GLORIA befand sich bei der HALO-Messkampagne POLSTRACC in etwa 13,5 km Höhe (schwarz).

spielsweise in Form eines Hexagons, erlaubt eine besonders hohe Dichte von Tangentenpunkten in einem tomographischen Volumen. Dadurch lässt sich eine hohe vertikale (bis zu 300 m) und horizontale Auflösung (bis zu 30 km x 30 km) der abzuleitenden Temperaturen und Spurengaskonzentrationen erreichen. Das Verhältnis von vertikaler und horizontaler Auflösung entspricht gerade dem Verhältnis der Mischungsskalen in vertikaler und horizontaler Richtung. Methoden, welche die Strömungsverhältnisse berücksichtigen, korrigieren zeitliche Änderungen der Spurengasstrukturen während der Messung [8].

Diese Technik kam während der HALO-Messkampagne TACTS (Transport and Composition in the UT/LMS) zum Einsatz. Ziel des Messflugs war es, die chemische Zusammensetzung der unteren Stratosphäre bei mittleren und hohen Breiten zu untersuchen, während Luftmassen aus der tropischen Troposphäre eindringen. Ein geeigneter Zeitpunkt dafür ergab sich aus Simulationen von Luftmassentransporten, die sich meteorologischer Winddaten bedienen. Um die zugehörigen Transport- und Mischungsprozesse zu verfol-

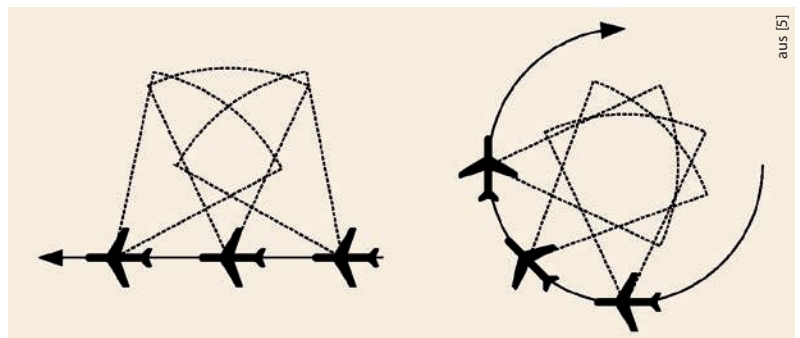


Abb. 4 Das Drehen der Blickrichtung von GLORIA (gestrichelt) erlaubt auch bei einem linearen Flugpfad tomogra-

phische Messungen (links). Geschlossene Flugpfade sorgen für eine besonders hohe räumliche Auflösung (rechts).

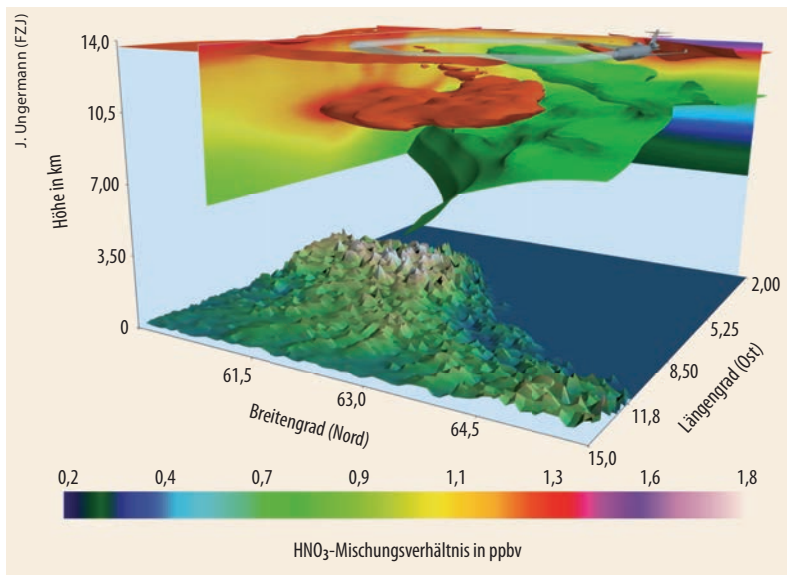


Abb. 5 Während der HALO-Messkampagne TACTS wurde mit GLORIA am 26. September 2012 aus 14 Kilometern Höhe (grau) der Anteil von Salpetersäure (HNO_3) über der norwegischen Küste untersucht. Die Isoflächen stratosphä-

rischer (rot) und troposphärischer Luft (grün) liegen bei Anteilen von 1,35 bzw. 0,75 ppbv. Für eine Breite von 61°N und eine Länge 3°O sind Höhenquerschnitte des Mischungsverhältnisses dargestellt.

gen, eignet sich der Anteil von Salpetersäure (HNO_3) in den beobachteten Luftmassen. HNO_3 entsteht in der Stratosphäre: Ohne Störungen ist der Anteil in der Stratosphäre hoch im Vergleich zur Troposphäre. Mit GLORIA kann man beobachten, wie sich die Anteile von HNO_3 verändern, wenn Luftmassen mit hohen stratosphärischen Werten auf Luftmassen mit niedrigen troposphärischen Werten treffen (Abb. 5). Die erste dreidimensionale Messung solcher Transport- und Mischungsstrukturen fand mit gleichzeitig hoher vertikaler und horizontaler Auflösung statt.

Darüber hinaus gelang es mit GLORIA im Winter 2015/16 erstmals, orographische Schwerewellen und die damit zusammenhängenden Impulsflüsse über Island dreidimensional tomographisch zu vermessen. Die daraus abgeleiteten Wellenvektoren erlauben es, die Wellen zu ihrer Quelle zurückzuverfolgen. Die Ergebnisse liefern auch die notwendigen Randbedingungen, um die Ausbreitung von Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre (10 bis 100 km) realitätsnah zu simulieren. Gleichzeitig ergeben sich wichtige Randbedingungen für eine bessere Darstellung von Schwerewellen in atmosphärischen Zirkulationsmodellen. Die große Bedeutung von Schwerewellen und anderen atmosphärischen Wellentypen wie planetaren Wellen und Gezeiten für die Dynamik der mittleren Atmosphäre erläutern F.-J. Lübken, M. Dameris und M. Rapp in ihrem Beitrag.

GLORIA im Orbit

Erst der Einsatz auf einem Satelliten in einer erdnahen Umlaufbahn (z. B. 500 km Höhe) wird das volle Potenzial der bildgebenden Fernerkundung entfalten. Ein

längs des Orbits rückwärts blickendes Instrument nimmt in Höhen von 5 bis 100 km zweidimensionale Bilder atmosphärischer Temperaturen und Spurengaskonzentrationen senkrecht zur Flugbahn auf. Aus der Fluggeschwindigkeit von 8 km/s und der Aufnahmezeit von 6 s pro Bild ergibt sich eine Sequenz von Bildern im Abstand von etwa 50 km entlang der Flugbahn, also ein dreidimensionales Gitter von Messpunkten. Senkrecht zur Flugbahn lassen sich entsprechend dem Abstand von zwei Bildpixeln am Tangentialpunkt sogar 25 km erreichen. Im Gegensatz zu den sporadischen Messungen an Bord von Forschungsflugzeugen liefert der Einsatz auf einem Satelliten kontinuierliche Messungen mit täglich zwei globalen Überdeckungen. Auf dieser Datenbasis ließe sich die zeitliche und räumliche Variabilität wetter- und klimarelevanter Prozesse quantitativ untersuchen. Insbesondere würde die Untersuchung des „Feedback“ der atmosphärischen Zirkulation auf anthropogene Klimaänderungen möglich. Während der systematische Anstieg der global gemittelten Temperatur durch anthropogene Emissionen relativ gut verstanden ist, bleibt es ohne ein detailliertes Verständnis solcher Feedbacks schwierig, regionale Auswirkungen des Klimawandels vorherzusagen. Initiativen wie der Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen (REKLIM) würden daher sehr von Daten der satellitenbasierten bildgebenden Fernerkundung profitieren.

Literatur

- [1] S. Solomon et al., *Science* **327**, 1219 (2010)
- [2] J. Kidston et al., *Nat. Geosci.* **8**, 433 (2015)
- [3] M. Sigmond und J. F. Scinocca, *J. Climate* **23**, 1434 (2010)
- [4] ESA, SP-1324/3 (2012)
- [5] M. Riese et al., *Atmos. Meas. Tech.* **7**, 1915 (2014)
- [6] F. Friedl-Vallon et al., *Atmos. Meas. Tech.* **7**, 3565 (2014)
- [7] W. Woiwode et al., in Vorbereitung
- [8] J. Ungermann et al., *Atmos. Meas. Tech.* **4**, 2509 (2011)

DIE AUTOREN

Martin Riese (FV Umweltphysik) ist Direktor am Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-7) des FZ Jülich und Professor für Atmosphärenphysik an der Universität Wuppertal. Er besitzt langjährige Expertise in der räumlich hochauflösenden Infrarot-Fernerkundung der Atmosphäre. Zusammen mit Johannes Orphal, Direktor am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-ASF) und Professor für Physik am Karlsruher Institut für Technologie, verantwortet er ein Konzept für die bildgebende Horizontsondierung vom Satelliten aus einer erdnahen Umlaufbahn.



Hermann Oelhaf vom IMK-ASF am KIT war bis zu seiner kürzlichen Pensionierung als Experte für spektral hochauflösende Fernerkundung mit Infrarotspektrometern auf internationalen Messkampagnen verantwortlich für den wissenschaftlichen Einsatz der Ballon- und Flugzeug-getragenen Versionen von MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding).