

# MIPAS-STR: ein Fernerkundungsinstrument für Stratosphärenflugzeuge

C. E. Blom, T. Gulde, M. Höpfner, C. Keim, W. Kimmig, G.Y. Liu, C. Piesch, C. Sartorius, IMK

## Einleitung

Flugzeuggetragene Messungen haben den Vorteil, dass das Messgebiet aktiv angesteuert werden kann. Konventionelle Flugzeuge, wie zum Beispiel die FALCON des DLR, sind jedoch in der Flughöhe auf etwa 13 km beschränkt. Die GEOPHYSICA, ein russisches Stratosphärenflugzeug, das für die europäische Klima- und Ozonforschung in ein fliegendes Labor umgewandelt wurde, schließt die Lücke zwischen Beobachtungen von Satelliten bzw. Stratosphärenballons und den konventionellen Flugzeugen. Das IMK hat das MIPAS-STR (Michelson Interferometer für Passive Sondierung – STRatosphärenflugzeuge) für den Einsatz auf der Geophysica entwickelt [1] und bei ersten wissenschaftlichen Missionen über der Antarktis und Europa eingesetzt.

## Das Stratosphärenflugzeug GEOPHYSICA

Die russische GEOPHYSICA und die amerikanische ER-2 sind zurzeit die einzigen Stratosphärenflugzeuge, die für die Atmosphärenforschung zur Verfügung stehen. Außer der Reichweite von etwa 3500 km sind die Flugeigenschaften der GEOPHYSICA denen der ER-2 überlegen. Mit einer Nutzlast von 1500 kg erreicht sie eine Gipfelhöhe von über 20 km, also die Bereiche der unteren Stratosphäre und oberen Troposphäre, die für wissenschaftliche Fragestellungen in den letzten Jahren große Bedeutung erhalten haben. Trotz ihrer großen Spannweite von 37.5 m bei einer Länge von 23 m ist sie sehr robust und kann sogar bei starkem Seitenwind (bis zu 36 km/h) starten und landen. Die GEOPHYSICA wird seit Anfang 1997 für Forschungszwecke im Rahmen europäischer

Vorhaben eingesetzt. Eine Interessenvereinigung, der das Forschungszentrum als Gründungsmitglied beigetreten ist, gewährleistet die Bereitstellung dieses Flugzeugs für die nationale und europäische Atmosphärenforschung bis Ende 2005.

## MIPAS-STR

Das MIPAS-STR ist ein mit Trockeneis gekühltes Fourier-Transformations-Spektrometer (FTS), das die thermische Emission der atmosphärischen Spurenstoffe gegen den kalten Hintergrund des Weltraums im infraroten Spektralbereich von 770 bis  $1940 \text{ cm}^{-1}$  ( $5.15 - 13.0 \mu\text{m}$ ) mit hoher spektraler Auflösung erfasst. Durch die Anwendung der FTS-Technik wird die simultane Messung vieler Spurengase, die im mittleren IR spektrale Signaturen aufweisen, gewährleistet. In dem jetzigen Konzept sind nahezu die komplette  $\text{NO}_y$ -Familie ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ClONO}_2$ ), eine Reihe von Quellgasen ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , FCKWs,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ , etc.) und  $\text{O}_3$  messbar. Die Emissionsmethode ist unabhängig von Quellen wie z. B. der Sonne. Daher können die Messungen, wie bei allen MIPAS-Instrumenten, auch während der Polarnacht durchgeführt werden, und gibt es keine Einschränkungen für die Blickrichtung und die Flugtrajektorien. Die Unabhängigkeit vom Sonnenstand erlaubt kontinuierliche Horizont- und Aufwärtssondierungen. Mit der Horizontsondierung können Vertikalprofile bis zur Flughöhe gemessen werden, mit Aufwärtsmessungen die Verteilung der Spezies oberhalb des Flugzeugs. Kontinuierliche Messungen während des



**Abb. 1:** Die GEOPHYSICA beim Anflug auf Ushuaia auf Feuerland. MIPAS-STR ist auf dem Rücken des Flugzeugs, hinter der Pilotenkabine, eingebaut.

Flugs liefern die 2-dimensionale Verteilung der Spurenstoffe mit guter vertikaler (< 2 km) und horizontaler (< 30 km im Flugrichtung) Auflösung.

Das MIPAS-STR besteht aus zwei Modulen: dem Optikmodul und dem Elektronikmodul. Beide Module werden auf dem Rücken der Geophysica eingebaut.

Der gekühlte Teil der Optik ist in einer 3-D-Darstellung in Abb. 2 gezeigt. Er gliedert sich in zwei Ebenen: in der oberen Ebene befindet sich der Scanspiegel und das Teleskop; in der unteren Ebene das Interferometer und die mit flüssigem Helium gekühlte Fokalebene des Detektor-Kryostaten. Die Scanspiegeleinheit bestimmt die Ausrichtung der Sichtlinie. Dabei wird zur Bestimmung der Lage des Instruments ein eigenes Trägheitsnavigationssystem (AHRS: Attitude and Heading Reference System) als Referenz verwendet. Das Teleskop definiert die vertikale Auflösung am Horizont und unterdrückt parasitäre Strahlung, die von außerhalb des nominellen Gesichtsfelds herrührt. Das bei MIPAS-STR verwendete Doppelpendelinterferometer (DPI) [2] – eine Sonderform der Grundidee von Michelson – gewährleistet eine achtfache Übersetzung von mechanischer Bewegung in optische Weglängendifferenz. Die gesamte Optik ist in einen wärmeisolierenden Behälter eingebaut, in den das Trockeneis-Kühlsystem integriert ist.

Das Elektronikmodul (Abb. 3) wurde in Zusammenarbeit mit dem IPE entwickelt. Es ist aus mehreren vernetzten Prozessoren aufgebaut, die unabhängig und pa-

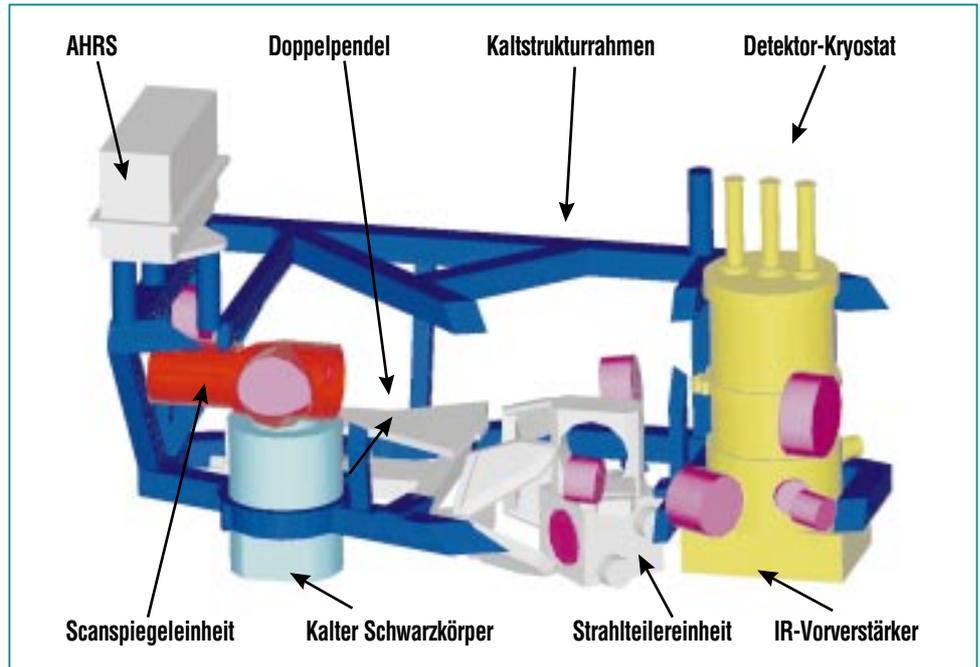


Abb. 2: 3-D-Ansicht des gekühlten Bereichs des Optikmoduls des MIPAS-STR. In der oberen Ebene befinden sich die Scanspiegeleinheit (rot) und die Spiegel (lila) des Teleskops, in der unteren Ebene das DPI (grau). Die IR-Detektoren sind in den Kryostat (gelb) eingebaut.

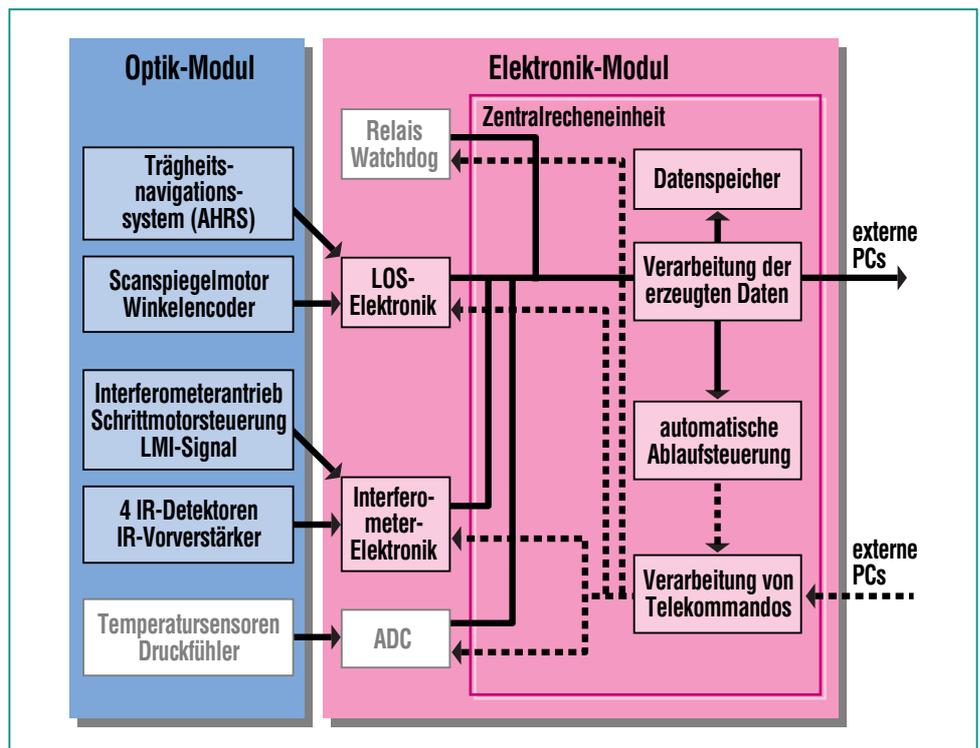


Abb. 3: Schematische Übersicht der Elektronik des MIPAS-STR.

parallel die Ansteuerung und Datenerfassung der einzelnen Komponenten übernehmen. Die wesentlichen Elemente sind die Zentralrechnereinheit, die LOS- (Engl.: line of sight) Elektronik, die Interferometerelektronik und mehrere Überwachungssysteme. Der Zentralrechner verarbeitet Kommandos wahlweise von externen PCs oder, im Flug, von der Ablaufsteuerung und verteilt sie an die entsprechende Subsysteme. Die Daten der Subsysteme werden entgegengenommen, gespeichert und an die Ablaufsteuerung weitergeleitet. Die LOS-Elektronik steuert anhand der vom AHRS gemessenen Lagewinkel den Scanspiegel so an, dass die Elevation der Sichtlinie konstant den gewünschten Winkel relativ zum Erdhorizont einnimmt. [3]. Die von der Firma Bruker Optik GmbH entwickelte Interferometer-Elektronik regelt den Pendelantrieb und misst die Signale der Infrarotdetektoren. Die Abtastung der Interferogramme erfolgt zeitäquidistant [4], ein neues Verfahren, das gewährleistet, dass die Qualität der Messung durch die Vibrationen des Flugzeugs nicht wesentlich verschlechtert wird [5].

### Die Nutzlast der GEOPHYSICA für die Messung von atmosphärischen Spurengasen

MIPAS-STR bildet zusammen mit SAFIRE-A [6] die Kernnutzlast der GEOPHYSICA für die Fernerkundung atmosphärischer Spurengase. SAFIRE-A ist, wie MIPAS-STR, ein FTS-Emissionsgerät, aber für den Spektralbereich  $20 - 160 \text{ cm}^{-1}$  ( $60 - 500 \mu\text{m}$ ) im fernen

	MIPAS-STR	SAFIRE-A (1)
<b>Tracers, Quellgase</b>		
O <sub>3</sub>	A	A
O <sub>3</sub> -Isotope ( <sup>18</sup> O, <sup>17</sup> O)	-	B
HF	-	A
N <sub>2</sub> O	A	A
CFCI <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	A	-
CCl <sub>4</sub> , CF <sub>4</sub> , CHF <sub>2</sub> Cl	B	-
H <sub>2</sub> O	A	A
HDO	B	A
CH <sub>4</sub>	A	-
OCS	C	-
<b>NO<sub>y</sub></b>		
NO	C	C (?)
NO <sub>2</sub>	B	B
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	B	-
HNO <sub>3</sub>	A	A
ClONO <sub>2</sub>	A	-
<b>Cl<sub>y</sub></b>		
ClO	C (2)	A (2)
HCl	-	A
ClONO <sub>2</sub>	A	-
HOCl	C	B
<b>HO<sub>x</sub></b>		
OH	-	A (2)
HO <sub>2</sub>	-	B
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	B
<b>Br<sub>y</sub></b>		
HBr	-	C
HOBr	-	C
A	Spezies, die „einfach“ zu messen sind. Integrationszeiten pro Spektrum: 10-60 Sekunden.	
B	Wie A, jedoch Integrationszeiten pro Spektrum: 1-10 Minuten.	
C	Schwierig zu messen oder längere Integrationszeiten notwendig.	
(1)	Eine Auswahl kann simultan gemessen werden.	
(2)	Nur bei speziellen atmosphärischen Bedingungen messbar.	

**Tab. 1: Spurengase, die von MIPAS-STR und SAFIRE-A gemessen werden können.**

Infrarot ausgelegt. Durch die Abdeckung beider Spektralbereiche erhält man wesentliche komplementäre Informationen und es können nahezu alle NO<sub>y</sub>- und Cly-Spezies erfasst werden (siehe Tab. 1). Von SAFIRE-A werden Rotationsbanden und von MIPAS-STR Vibrations-Rotationsbanden der Moleküle zur Messung der Spurengasgehalte genutzt. Dies erlaubt eine interne Überprüfung der Ergebnisse für Spurengase, die von beiden Instrumenten gemessen werden.

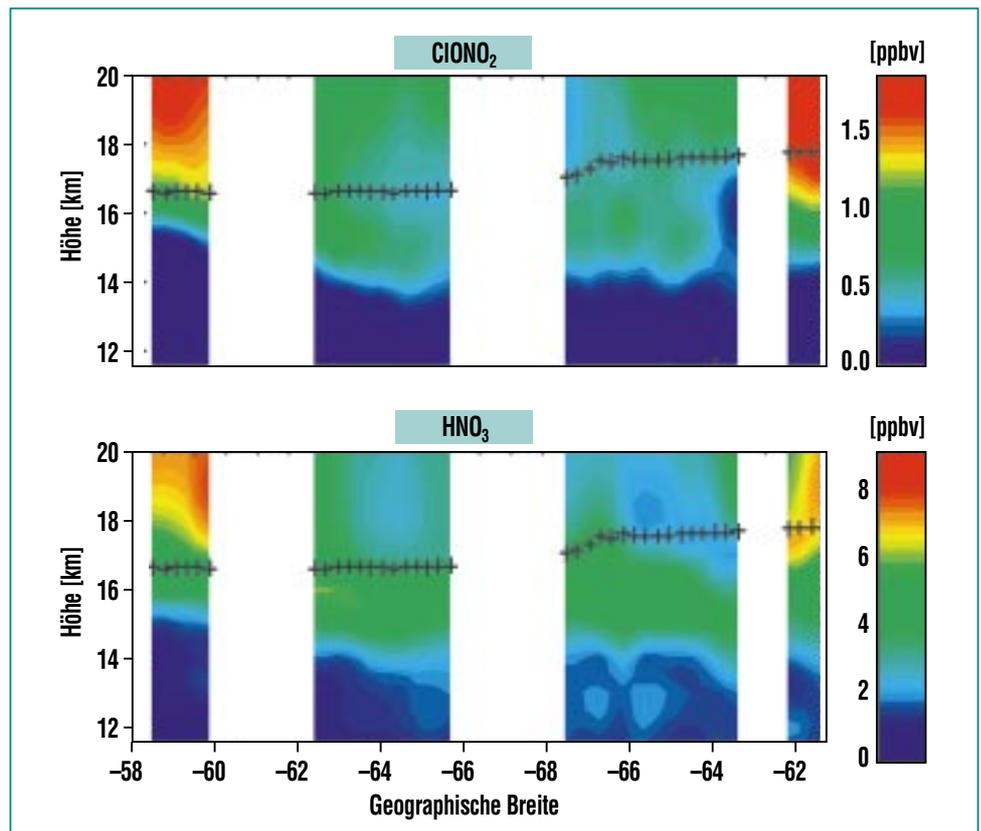
Viele der für die Klima- und Ozonforschung wichtigen Spurengase können durch In-situ-Messverfahren gemessen werden. Sie liefern Vertikalprofile der Spezies während der Auf- und Abstiege und der so genannten „dives“, sowie Horizontalverteilungen auf Flugniveau während der sonstigen Abschnitte des Messflugs. Die relative Genauigkeit und räumliche Auflösung der In-situ-Geräte übertrifft meistens diejenige der Fernerkundungsinstrumente. Dies ist für die Erfassung von kleinskaligen Prozessen wichtig und erlaubt so eine Abschätzung von Horizontalgradienten mit ihren Folgen für die Ableitung der Spurengasverteilungen aus Fernerkundungsmessungen. Da die Messungen der In-situ-Instrumente auf völlig unterschiedlichen Techniken basieren, liefern sie zudem eine unabhängige Überprüfung der Fernerkundungsmessungen.

Die Nutzlast der GEOPHYSICA für die In-situ-Spurengasmessungen im Rahmen der Validierung der Envisat-Chemie-Instrumente MIPAS, SCIAMACHY und GOMOS wurde großteils von deut-

schen Institutionen für den Einsatz auf der GEOPHYSICA entwickelt: Der Gaschromatograph HAGAR (High Altitude Gas AnalyzeR [7]) vom Institut für Meteorologie und Geophysik der J.W. Goethe Universität Frankfurt (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW-11, FCKW-12 und Halon-12), das Hygrometer FISH (Fast In-Situ Stratospheric Hygrometer) und das ClO/BrO Instrument HALOX (HALogen OXide monitor) vom Institut für Stratosphärenchemie des Forschungszentrums Jülich, und das NO/NO<sub>y</sub> Instrument SIOUX (Stratospheric Observati-

on Unit for Nitrogen OXides) vom Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.

Zur Nutzlast gehören zudem italienische und russische Sensoren zur Messung von Wasser und Ozon. Insgesamt bildet die einzigartige Kombination der Fernerkundung im mittleren und fernen Infrarot mit In-situ-Messungen auf der GEOPHYSICA die Grundlage eines umfassenden Vergleichs, bei dem systematische Fehler detektiert werden können.



**Abb.4:** Zweidimensionale Verteilungen der Spurengase Chlornitrat und Salpetersäure, wie sie von MIPAS-STR am 23.9.1999 bei einem Flug über die Grenze des antarktischen Polarwirbels hinweg gemessen wurden. Der südlichste Punkt des Flugs lag bei ca. -68 Grad und die Grenze des Polarwirbels befand sich zwischen -60 und -62 Grad. Die + Symbole kennzeichnen die Höhe und geographische Breite der GEOPHYSICA bei der Messung der einzelnen Vertikalprofile (ppbv = parts per billion volume).

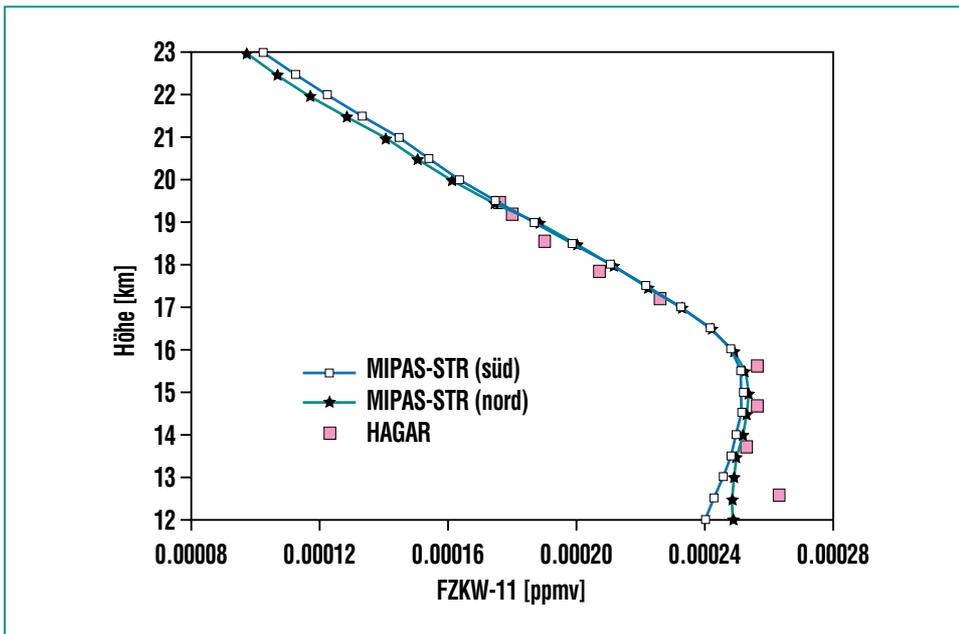


Abb. 5: Vergleich der FCKW-11 Profile von MIPAS-STR und von HAGAR, gemessen am 22. Juli 2002 über Norditalien (ppmv = parts per million volume).

tiger Lage konnte der Polarwirbel von Ushuaia aus auf längeren Flügen von der GEOPHYSICA erreicht werden. MIPAS-STR konnte auf drei solcher Flüge erfolgreich eingesetzt werden. Abb. 3 zeigt ein Beispiel der MIPAS-STR-Messungen. Die niedrigen Volumen-Mischungsverhältnisse des  $\text{ClONO}_2$ , 0,5 - 1,0 ppbv innerhalb des Polarwirbels, zeigten eindeutig, dass die Rückführung des reaktiven Chlors, anders als in der Arktis, zuerst zur Bildung des, von SAFIRE-A gemessenen, Reservorgases  $\text{HCl}$  führt. Dies erklärt sich aus der starken Denitrifizierung (Entfernung des  $\text{NO}_y$ ) des antarktischen Polarwirbels, die auch in den MIPAS-STR-Messungen des  $\text{HNO}_3$ , der Hauptbestandteil des  $\text{NO}_y$ , ersichtlich war.

### Beispiele von Messungen, die mit MIPAS-STR durchgeführt wurden

MIPAS-STR wurde erstmals im Rahmen der internationalen Messkampagne APE-GAIA [8] für wissenschaftliche Untersuchungen

eingesetzt. Die Kampagne fand, vom argentinischen Flughafen Ushuaia auf Feuerland ausgehend, im September und Oktober 1999 statt. In dieser Periode am Ende des Ozonabbaus in der Antarktis wird das reaktive Chlor ( $\text{Cl}$ ,  $\text{ClO}$ ) in die Reservorgase  $\text{ClONO}_2$  und  $\text{HCl}$  zurückgebildet. Bei günstigen

In Abb. 5 zeigt einen Vergleich der FCKW-11 Profile von MIPAS-STR mit In-situ-Messungen von HAGAR. Die Profile von HAGAR wurden während des Abstiegs kurz vor der Landung erhalten. Die Messungen wurden im Rahmen der Envisatvalidierung über Norditalien durchgeführt [9].

### Literatur

- [1] C. Piesch, T. Gulde, C. Sartorius, F. Friedl-Vallon, M. Seefeldner, M. Wölfel, C.E. Blom, H. Fischer, *Proc. of the 2nd Internat. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, ERIM, Ann Arbor, MI, Vol. II, 199-208, 1996.*
- [2] P. Burkert, F. Fergg, H. Fischer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-21, No. 3, 345-349, 1983.*
- [3] C. Keim, *Dissertation im Fach Physik, Universität Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe, FZKA 6729, 2002.*
- [4] J. W. Brault, *Applied Optics, No. 35, 2891-2896, 1996.*
- [5] W. Kimmig, *Dissertation im Fach Physik, Universität Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe, FZKA 6665, 2001.*
- [6] Carli, B., P.A.R. Ade, U. Cortesi, P. Dickinson, M. Epifani, F.C. Gannaway, A. Gignoli, C. Keim, C. Lee, C. Meny, J. Leotin, F. Mencaraglia, A. G. Murray, I. G. Nolt, M. Ridolfi, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 16, No. 10, 1313-1328, 1999.*
- [7] Riediger O., *Dissertation, J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2000.*
- [8] B. Carli, C.E. Blom, M.P. Chipperfield, U. Cortesi, G. DeRossi, G. Redaelli, *SPARC-Newsletter, No. 15, 31-24 2000.*
- [9] C.Y. Liu, C.E. Blom, T. Gulde, C. Keim, M. Höpfner, P. Loes, C. Piesch, C. Sartorius, *Proceedings of the Envisat Validation Workshop at ESRIN, Frascati, Italy, 9-13 December 2002, in press.*