

# Das Michelson Interferometer für Passive Atmosphärische Sondierung (MIPAS) auf dem Umweltforschungssatelliten ENVISAT

T. v. Clarmann, G. Stiller, IMK

## Einleitung

Schon in den Siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts postulierten Chemiker, dass Chlor, Stickstoff- und OH-Radikale in katalytischen Reaktionszyklen stratosphärisches Ozon zerstören können. Seit der Entdeckung des antarktischen Ozonlochs Mitte der Achtziger Jahre wurde die umweltpolitische Relevanz dieser Zusammenhänge offenbar und führte zu einer Intensivierung der Erforschung der Stratosphäre in den Neunziger Jahren. Dennoch sind wir noch heute weit entfernt von einem lückenlosen quantitativen Verständnis der Vorgänge in der Stratosphäre und im stratosphärisch/troposphärischen Grenzbereich. Um einen Großteil der in der stratosphärischen Chemie relevanten Spurenstoffe global messen zu können, wurde von Prof. H. Fischer (IMK) auf der Basis von Labor- und Ballonexperimenten das Michelson Interferometer für Passive Atmosphärische Sondierung (MIPAS) [1] vorgeschlagen, das mittlerweile als Teil der Kernnutzlast im Verbund mit verschiedenen anderen Erdbeobachtungsexperimenten des ENVISAT-Forschungssatelliten der European Space Agency (ESA) seine Arbeit aufgenommen hat. Ein wichtiger Teil der MIPAS Auswertearbeiten findet am IMK statt.

## Der Forschungssatellit ENVISAT

Bei ENVISAT handelt es sich um den weltweit bisher größten Umweltforschungssatelliten, der jemals gebaut wurde (Abb. 1).

Die Gesamtmasse des Satelliten, der etwa die Größe eines Autobusses hat, beträgt etwa 8200 kg; Die Nutzlast umfasst neben MIPAS zwei weitere Instrumente zur Atmosphärenbeobachtung in Hinblick auf Spurengase: GOMOS [2] und SCIAMACHY [3].

Weitere Instrumente stehen zur Beobachtung der Erdoberfläche und des Wassers in all seinen Aggregatzuständen zur Verfügung.

Am 1. März 2002 wurde ENVISAT mit einer Ariane-V-Rakete vom Weltraumbahnhof Kourou aus in seine polare sonnensynchrone Erdumlaufbahn geschossen. Der Satellit umkreist seitdem einmal in



**Abb. 1: Der Umweltforschungssatellit ENVISAT (Quelle: ESA).**

100 Minuten in einer mittleren Höhe von 800 km die Erde. Die Lebensdauer des Satelliten wird auf etwa fünf Jahre veranschlagt.



**Abb. 2: Der Start von ENVISAT am 1. 3. 2002 (Quelle: ESA).**

## MIPAS

Die Ozonchemie der mittleren und unteren Stratosphäre involviert zahlreiche Spurengase, die fast alle im mittleren infraroten Spektralbereich Emissionsbanden aufweisen, die mit dem Fouriertransformationsspektrometer MIPAS gleichzeitig gemessen werden können. Dank der hohen spektralen Auflösung von  $0,035\text{ cm}^{-1}$  hinterlässt jedes Gas im Spektrum eine hinreichend separierte Signatur, die zur quantitativen Auswertung der Gase herangezogen werden kann.

MIPAS misst in Horizontsondierung. Die langen optischen Wege des Sehstrahls durch die Atmosphäre führen zu einer guten Messempfindlichkeit auch bei niedrig konzentrierten Gasen. Die stufenweise Änderung der Elevation der

Blickrichtung begründet die Höhenauflösung der Messung. (Abb. 3)

Die meisten auf Weltraumplattformen eingesetzten in Horizontsondierung messenden Fouriertransformationsspektrometer messen die atmosphärische Absorption von Sonnenlicht bei Sonnenauf- oder -untergang. Damit waren keine Messungen in der Nacht oder im polaren Winter möglich. MIPAS misst die thermische Emission der Atmosphäre und kann deshalb auch Nacht- oder Polarnachtmessungen durchführen [4]. Dies ist besonders relevant, da viele Spezies einer ausgeprägten Photochemie unterliegen, und Messungen bei Sonnenauf- oder -untergang deshalb keinesfalls repräsentativ sind.

Das MIPAS-Instrument tastet in 75 Sekunden die Atmosphäre einmal vertikal ab und führt dabei

Messungen an 17 verschiedenen Tangentenhöhen von 6 - 68 km durch. Die fourierspektroskopische Messung liefert Intensitäten als Funktion der optischen Weglängendifferenz des Interferometers, sog. Interferogramme. Nach der Phasenkorrektur werden die Interferogramme durch Fouriertransformation in Spektren umgewandelt. Zur absoluten Strahldichte-Kalibration werden Schwarzkörperspektren sowie Spektren des kalten Weltraums herangezogen. Jedes Spektrum besteht aus fünf Spektralkanälen:  $685\text{-}970\text{ cm}^{-1}$ ,  $1020\text{-}1170\text{ cm}^{-1}$ ,  $1215\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ ,  $1570\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ ,  $1820\text{-}2410\text{ cm}^{-1}$ . Bei einer Gitterweite von  $0,025\text{ cm}^{-1}$  ergibt das 58400 unabhängige Einzelmessungen pro Tangentenhöhe, und etwa  $9 \cdot 10^{10}$  einzelne spektrale Messwerte während der Lebensdauer von MIPAS.

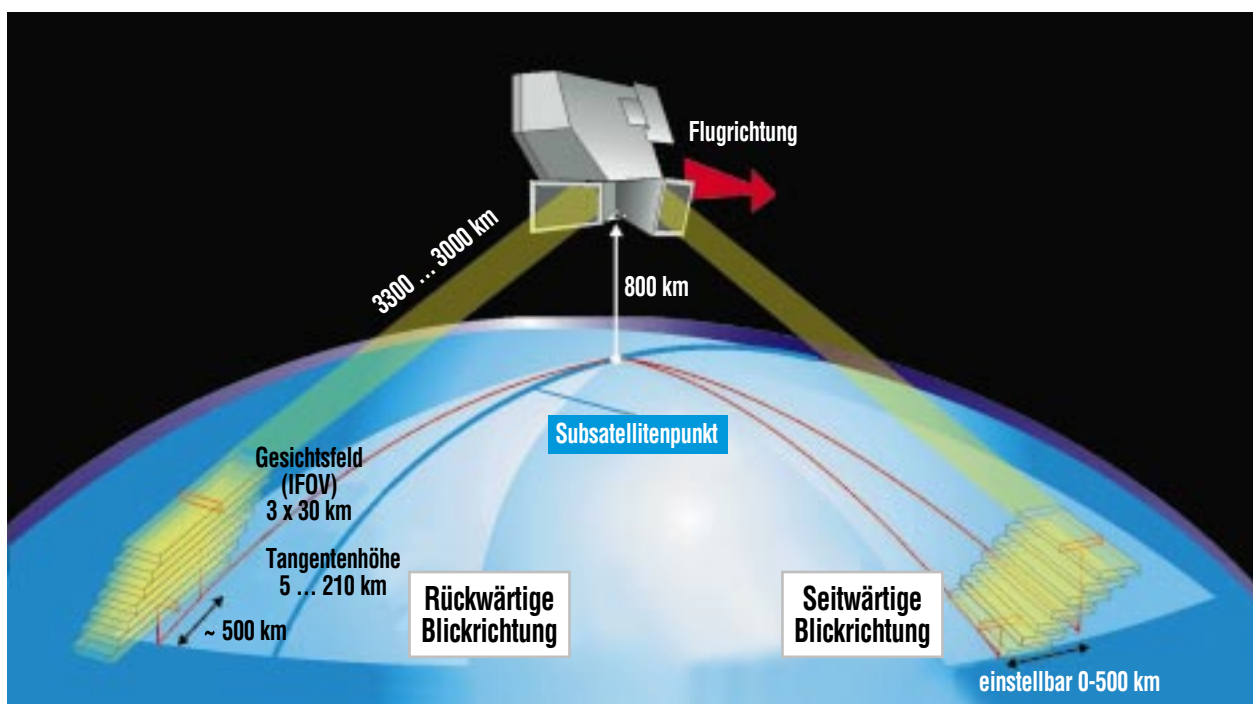


Abb. 3: Die Messgeometrie der Horizontsondierung: Der Sehstrahl verläuft waagrecht durch die Atmosphäre (Quelle: ESA).

## Auswertung

Um aus den kalibrierten Strahldichtespektren Vertikalprofile von Spurengasen oder andere geophysikalische Parameter herzuleiten, muss die inverse Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung gefunden werden. Die Strahlungsübertragungsgleichung beschreibt den Strahlungstransport durch die Atmosphäre, also die Emission und Absorption von Photonen durch die Moleküle, die im Blickfeld des Messinstruments liegen. Die Inversion erfolgt nach Linearisierung der Strahlungsübertragungsgleichung um Schätzwerte der atmosphärischen Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate, wobei Nebenbedingungen zur physikalisch sinnvollen Stabilisierung der Lösung gestellt werden. Es wird also derjenige Satz von atmosphärischen Parametern gesucht, für den mit der Strahlungsübertragungsgleichung das gemessene Spektrum möglichst gut simuliert werden kann, und gleichzeitig die Nebenbedingung möglichst gut erfüllt wird. Um der Nichtlinearität der Strahlungsübertragungsgleichung gerecht zu werden, wird die Inversion iterativ durchgeführt [5].

Zur numerischen Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung ist ein entsprechendes Computermodell erforderlich, das alle für die Strahlungsübertragung relevanten Prozesse der Atmosphäre berücksichtigen muss. Zur Berechnung spektral hoch aufgelöster Spektren kommen nur sogenannte Linie-für-Linie-Modelle in Frage, bei denen jeder Vibrations-Rotationsübergang separat

modelliert wird. Da die Atmosphäre bezüglich Druck, Temperatur und Zusammensetzung inhomogen ist, ist bei der numerischen Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung auf hinreichend feine Diskretisierung zu achten. Mit dem „Karlsruhe Optimized and Precise Radiative Transfer Algorithm“ (KOPRA) [6] steht am IMK ein geeignetes Strahlungsübertragungsmodell zur Verfügung, dessen Leistungsumfang speziell auf das MIPAS-Experiment abgestimmt wurde. Andere methodische Arbeiten am IMK beziehen sich auf die Auswahl zur Auswertung verwendeter Spektralbereiche [7] [8] sowie auf die optimale Formulierung der Nebenbedingung bei der Inversionsrechnung [9].

## Der Datenprozessor am IMK

MIPAS-ENVISAT ist ein internationales Großexperiment, zu dessen Realisierung und Auswertung Institutionen aus zahlreichen Nationen beitragen. Bezüglich der Datenauswertung ist das folgende arbeitsteilige Vorgehen vorgesehen: Neben Druck und Temperatur werden unter Verantwortung der ESA Vertikalprofile von  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $HNO_3$  und  $NO_2$  global aus den Messdaten abgeleitet und der wissenschaftlichen Gemeinde zur Verfügung gestellt. Die Ableitung der Höhenverteilungen der übrigen Gase, z. B.  $ClONO_2$ ,  $N_2O_5$ ,  $NO$ , FCKWs u. a., wird von wissenschaftlichen Institutionen in Eigenverantwortung durchgeführt. Hierzu hat das IMK einen Datenprozessor entwickelt, der die Datenauswertung nach der oben beschriebenen Methodik

durchführt und diagnostische Größen (insbesondere Kovarianzmatrizen und Auflösungsmatrizen) bereitstellt.

Um sicherzustellen, dass der Prozessor auch funktioniert, wurde ein Blindtest durchgeführt. Im Rahmen eines von uns koordinierten EU-Projektes wurden für ein vorgegebenes Datum und eine vorgegebene Geolokation von einem Partner eine Horizontsondierungssequenz Spektren, wie MIPAS sie liefern wird, auf Basis von dem Konsortium vorerst nicht bekannten atmosphärischen Parametern generiert. Diese Spektren wurden mit Rauschen und weiteren instrumentellen Artefakten entsprechend der MIPAS-Gerätespezifikation überlagert und an die Teilnehmer dieses Prozessierungsexperiments verteilt. Jeder Teilnehmer versuchte, mit seinem Prozessor die atmosphärischen Parameter, auf Basis derer die „synthetischen Messungen“ erzeugt wurden, zu rekonstruieren. Diese realitätsnahen Tests sind für das IMK sehr erfolgreich verlaufen, und sie erzeugen Zuversicht, dass auch echte MIPAS-Messungen erfolgreich ausgewertet werden können.

## Validierung

Die mit MIPAS-ENVISAT gemessenen Daten müssen validiert werden, bevor sie zur wissenschaftlichen Verwertung freigegeben werden. Das IMK ist, sowohl in seiner Eigenschaft als sogenanntes „Expert Support Laboratory“, als auch als unmittelbarer Kontraktor der ESA, an vielerlei Validierungsaktivitäten beteiligt.

## Wissenschaftliche Verwertung

MIPAS hat begonnen, globale Spurengasverteilungen von bis zu 40 verschiedenen Spurengasen zu liefern. Daneben können aus den spektralen Daten weitere Parameter der unteren und mittleren Atmosphäre bis hinauf in die Thermosphäre, wie Temperatur, mikrophysikalische Aerosol- und Wolkeneigenschaften, Erwärmungs- und Abkühlungsraten, Kollisionsraten von molekularen Stoßbildungsprozessen und Photolyseraten wichtiger photochemischer Prozesse abgeleitet werden. Die Nutzung der MIPAS-Daten eröffnet damit die Möglichkeit zur Mitarbeit in den aktuellsten atmosphärenwissenschaftlichen Fragestellungen.

Zur Vorhersage des Zustands der Atmosphäre in den nächsten Jahrzehnten ist das Verständnis des polaren Ozonabbaus immer noch ein zentraler Punkt. Insbesondere durch die Beobachtung von Polaren Stratosphärenwolken und der Analyse ihrer Zusammensetzung, sowie durch die Messung der Partitionierung der Spurengase aus der Stickstoff-Familie wird ein Beitrag geleistet zum besseren Verständnis der heterogenen chemischen Prozesse, die letztlich zum Ozonabbau führen.

Der Tropopausenbereich, d.h. die Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre in ca. 10 km Höhe, ist in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Dieser Bereich spielt für die Strahlungsbilanz der Erde und damit für die globale Erwärmung eine zentrale Rolle. Die bisher magere Datenbasis über Was-

serdampf- und Aerosol- bzw. Cirren-Verteilungen, die die Strahlungsbilanz maßgeblich mitbestimmen, wird durch MIPAS erheblich verbessert werden. Weiterhin kann MIPAS durch Beobachtung von inerten Tracern, aber auch reaktiven Spurenstoffen wie Ozon, zum Verständnis der vertikalen Transportprozesse durch die Tropopausenregion beitragen. In der oberen Troposphäre konzentriert sich die Forschung zur Zeit auf das Verständnis der photochemischen Ozonbildungsprozesse. Hier interagieren kurzzeitige photochemische und Transportprozesse so stark, dass ein großräumiges, wenn nicht sogar globales Bild gegenüber Einzelbeobachtungen große Vorteile mit sich bringt, um Transporte von Bildungs- bzw. Abbauprozessen zu unterscheiden. Mit der Messung von Spurengasen im infraroten Spektralbereich, die bei den photochemischen Ozonbildungsprozessen eine Rolle spielen, wie z.B. Konstituenten, die bei der Biomassenverbrennung entstehen, wird mit MIPAS Neuland beschritten.

Von der Mesosphäre (Höhe: 50 bis 85 km) wird angenommen, dass sie eine Art Frühwarnfunktion im Klimasystem spielt, indem sie frühzeitig und ausgeprägt auf Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre reagiert. Allerdings liegt über die Mesosphäre nur eine geringe Datenbasis vor. MIPAS wird in diesem Höhenbereich regulär bis ca. 68 km und gelegentlich auch bis in Höhen von 150 km messen und so zur Klärung zahlreicher unverstandener Prozesse in der Mesosphäre beitragen.

Alle hier angesprochenen Fragestellungen werden in den nächsten Jahren im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsprojekte angegangen. Die Voraussetzung dafür, nämlich ein effizientes und dennoch hochflexibles Auswertesystem, wurde in den letzten Jahren am IMK geschaffen.

## Mögliche Nachfolgeexperimente

Das wissenschaftliche Interesse für die satellitengebundene Messung großräumiger Spurengasverteilungen verschiebt sich zur Zeit etwas von der Stratosphäre hinunter in den stratosphärisch/troposphärischen Grenzbereich und sogar in die freie Troposphäre. Für die hier interessierende Thematik – vorrangig Austauschprozesse sowie regionale Chemie – ist die optimierte räumliche Auflösung von besonderer Bedeutung. Ein Nachfolgeexperiment, AMIPAS (Advanced Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding), wurde als künftiges Erdbeobachtungsexperiment vorgeschlagen. Weiterhin wird derzeit die Anwendbarkeit nadirblickender Spektrometer zur Spurengasmessung untersucht. Zwei Projekte sind hier in Vorbereitung: Bei TROC handelt es sich um eine Mission mit einem polar umlaufenden Low-Earth-Orbit-Satelliten, während mit GEOTROPE erstmals eine derartige wissenschaftliche Plattform auf einen geostationären Orbit gebracht werden soll. Das IMK ist bei allen drei Missionsvorschlägen bezüglich der Datenauswertung und auch der Instrumentenkonzepte in führender Rolle beteiligt.

## Literatur

- [1] H. Fischer,  
*Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*(96)3  
(1992) 306-314
- [2] S. Noël, J. P. Burrows,  
H. Bovensmann, J. Frerick,  
K. V. Chance, A. H. P. Goede,  
C. Muller,  
*Adv. Space Res.* (26)12 (2000)  
1949-1954
- [3] J. L. Bertaux, G. Megie, T. Widemann,  
E. Chassefiere, R. Pellinen, E. Kyrölä,  
S. Korpela, P. Simon,  
*Adv. Space Res.* 11 (1991) 237-242
- [4] H. Fischer, H. Oelhaf,  
*Appl. Opt.* 35(16) (1996)  
2787-2796
- [5] T. von Clarmann, G. Stiller,  
A. Friedle, K. Ressel, T. Steck,  
*Proc. European Symposium  
on Atmospheric Measurements  
from Space,  
ESAMS'99, 18-22 Jan 1999,  
Noordwijk (1999)*  
529-532
- [6] G. P. Stiller, (ed.),  
*FZKA-Bericht 6487 (2000)*
- [7] T. von Clarmann, G. Echle,  
*Appl. Opt.* 37(33) (1998) 7661-7669
- [8] G. Echle, T. von Clarmann, A. Dudhia,  
J.-M. Flaud, B. Funke, N. Glatthor,  
B. Kerridge, M. López-Puertas,  
F. J. Martín-Torres, G. P. Stiller,  
*Appl. Opt.* 33(30) (2000) 5531-5540
- [9] T. Steck,  
*Appl. Opt.* 41(9) (2002) 1788-1797