

Infrarot-Messungen in der oberen Atmosphäre

CRISTA mißt kleinskalige Strukturen in der Verteilung von Spurengasen

D. Offermann und K.-U. Grossmann

Zum Verständnis der oberen Atmosphäre werden dringend dreidimensionale Datenfelder mit hoher räumlicher Auflösung benötigt. Dazu wurde das Helium-gekühlte Meßinstrument CRISTA (CRYogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere) entwickelt, das aus einer Erdumlaufbahn die Erdatmosphäre mit drei Teleskopen und vier Spektrometern gleichzeitig vermißt. Diese Kombination ermöglicht ein bisher unerreichtes Auflösungsvermögen. CRISTA wurde am 3.11.1994 durch ein Space Shuttle der NASA in eine Erdumlaufbahn gebracht und am 14.11.1994 wieder geborgen. Im folgenden zeigen wir einige vorläufige Ergebnisse dieser Mission.

Einführung

Das Verhalten der oberen Atmosphäre (10 - 200 km) auf großen Skalen (10.000 km) ist inzwischen recht gut verstanden. Es gibt aber Hinweise darauf, daß wesentliche Prozesse der Atmosphäre nur mit Hilfe kleinskaliger Strukturen (einige 100 bis einige 1000 km), und hier vor allem kleinskaliger dynamischer Vorgänge (Transporte), zu erklären sind. Das Ozonloch am Südpol ist hierfür ein Beispiel. Die Frage, ob es ein solches Loch auch am Nordpol geben kann, ist ein weiteres.

Zur Klärung solcher Zusammenhänge sind Messungen mit hoher Auflösung in drei Dimensionen nötig. Ein hierfür geeignetes Meßsystem gab es bisher nicht; heutige Methoden (Flugzeuge, Raketen, Satelliten) haben entweder ein gutes horizontales oder ein gutes vertikales Auflösungsvermögen, nicht aber beides zusammen.

Das Ziel des CRISTA-Projekts war deshalb die Entwicklung eines Meßgeräts mit hohem Auflösungsvermögen in drei Dimensionen. Die Daten werden global benötigt. Es kommt daher nur eine Messung aus einer Erdumlaufbahn infrage. Da die Bedeutung kleinskaliger Strukturen zwar vermutet wird, aber noch nicht bewiesen ist, sollte eine "Erkundungsmission" mit einem Kurzzeitflug, wie sie

das NASA Space Shuttle bietet, ausreichend sein. Als Meßmethode bietet sich die optische Fernerkundung an. Die Strukturen der Atmosphäre lassen sich analysieren, wenn man die Spurengasverteilung und ihre Veränderungen mißt. (Die Hauptgase N_2 , O_2 , Ar sind optisch inaktiv.) Spurengasmessungen können in vielen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums durchgeführt werden. Wählt man das thermische Infrarot (IR, 3 - 15 μm) oder das ferne Infrarot (20 - 100 μm), so kann man die Eigenemission der Gase und somit auch nachts messen. Das CRISTA-Gerät wurde dementsprechend als Infrarot-Gerät (4 - 71 μm) für den Einsatz auf dem Space Shuttle konzipiert und gebaut [1]. Es zeigte sich, daß die IR-Messungen in der Anwendung sehr vielseitig sind und Informationen zu Themen lieferten, die über die ursprüngliche Zielsetzung hinausgehen.

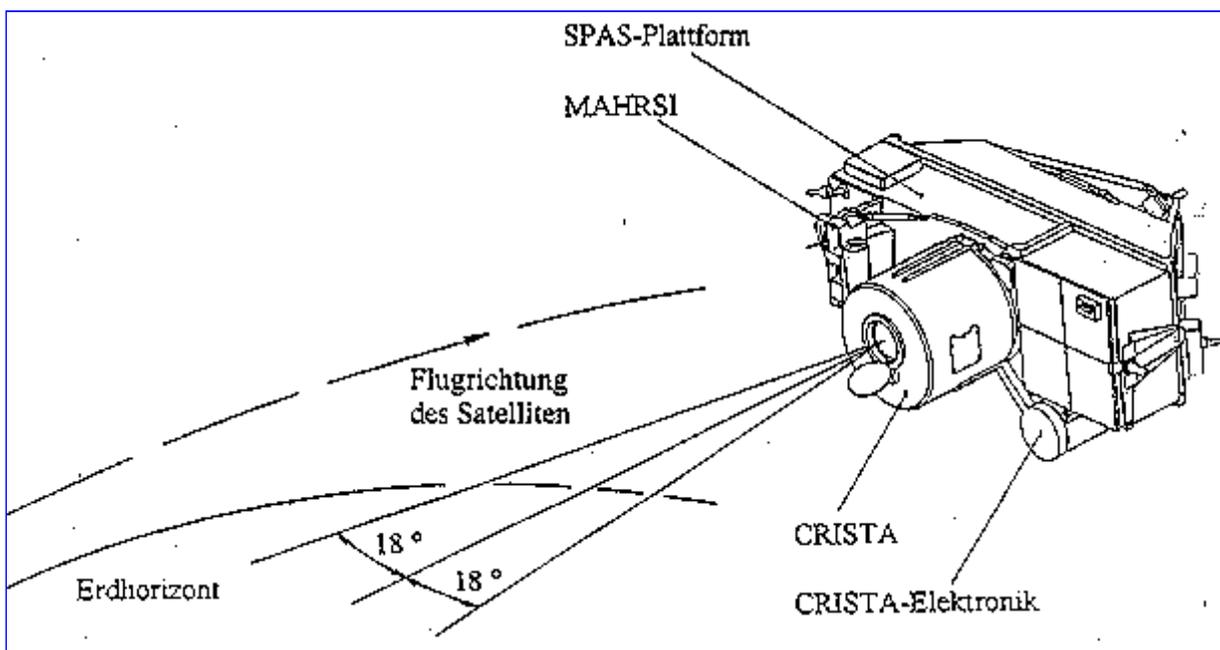


Abb. 1: Meßkonfiguration des CRISTA-Geräts in einer Erdumlaufbahn von 300 km Höhe. Die drei Blickrichtungen zeigen zum Erdhorizont und werden vertikal geschwenkt ("Horizontsondierung").

Meßgerät

Die Forderung nach hoher räumlicher Auflösung läßt sich realisieren durch die sogenannte Horizontsondierung. Hierbei "blickt" ein IR-Teleskop (mit nachgeschaltetem Spektrometer) aus der Erdumlaufbahn tangential zur Erdoberfläche (zum Horizont) und mißt das entlang des Sehstrahls emittierte IR-Licht. Durch vertikales Schwenken des Sehstrahls werden nacheinander verschiedene Höhenschichten der Atmosphäre vermessen. Zur Erhöhung der Informationsdichte verwendet CRISTA nicht nur eine Blickrichtung (wie bisherige Satelliten), sondern drei Teleskope, die in der Geräteachse sowie

hierzu um 18° gedreht eingebaut sind. Diese Meßgeometrie ist in [Abb. 1](#) skizziert. Die Meßpunkte der drei Teleskope liegen am Erdhorizont um 650 km auseinander. Dies ist somit die horizontale Auflösung der Messungen in der Richtung senkrecht zur Flugbahn.

Die horizontale Auflösung entlang der Flugbahn und die vertikale Auflösung (Abstand der Höhenschritte der Blickrichtungen) hängen voneinander ab und sind durch die erreichbare Meßgeschwindigkeit (Zahl der IR-Spektren pro Zeit) bestimmt. Diese wurde durch eine Reihe von Maßnahmen erhöht, deren wichtigste die Kühlung der Detektoren und der Optik auf Temperaturen des flüssigen Heliums ist. Dadurch wird bei CRISTA zum Durchfahren des gesamten Spektralbereichs nur eine Sekunde benötigt. Dies ergibt eine horizontale Auflösung entlang der Flugbahn von 400 km bei einer vertikalen Auflösung von etwa 2 km. Dabei wird ein Höhenbereich von 15 - 80 km überdeckt. Durch Einschränkung des Höhenbereichs läßt sich eine horizontale Auflösung von etwa 200 km erreichen.

Jedes der drei CRISTA-Teleskope besitzt ein IR-Spektrometer für den Wellenlängenbereich 4 - 13 μm . Das zentrale Teleskop hat zusätzlich ein Spektrometer für den Bereich 14 - 71 μm . [Tabelle 1](#) zeigt die Gase, die auf diese Weise gemessen werden, sowie die Wellenlängen der entsprechenden Banden oder Linien. Diese Optik ist ein voluminöser Aufbau. Um ihn zu kühlen, ist ein großer Kryostat erforderlich. Der CRISTA-Kryostat besteht aus zwei Behältern, die 725 l überkritisches Helium (5 - 14 K) bzw. 55 l unterkühltes Helium (2,5 - 4,2 K) enthalten. Die Standzeit des Kryostaten ist der Shuttle-Flugdauer angepaßt und beträgt zwei Wochen. Das CRISTA-Gerät ist etwa 3 m lang, hat einen Durchmesser von 1,4 m und wiegt etwa 1300 kg.

Mission

CRISTA wurde am 3.11.94 mit dem Space Shuttle ATLANTIS (STS 66) gestartet. Das Gerät war während des Flugs in der "SPAS"-Plattform der DASA untergebracht (SPAS = **S**huttle **P**allet **S**atellite, siehe [Abb. 1](#)). Diese Plattform ist ein Kurzzeit-Satellit, der vom Space Shuttle in die Erdumlaufbahn gebracht und dort mittels des Shuttle-Manipulatorarms am 4.11.94 aus der Ladebucht ausgesetzt wurde. Während der Messungen befand sich CRISTA in 50 - 100 km Abstand vom Shuttle. Nach Beendigung der Messungen am 12.11.94 wurde CRISTA vom Shuttle wieder eingeholt und am 14.11.94 zur Erde zurückgebracht. Mit an Bord des SPAS-Satelliten war das MAHRSI-Gerät des NRL (Naval Research Laboratory, Washington), das im ultravioletten Spektralbereich die Spurengase OH und NO gemessen hat (MAHRSI = Middle Atmosphere High Resolution Spectrograph Investigation). Der SPAS-Flug war verbunden mit der ATLAS 3-Mission der NASA für Solar- und Atmosphärenmessungen. Das Shuttle flog auf einer Bahn mit 57° Inklination.

Dadurch waren die CRISTA-Messungen auf den Bereich von 66° N bis 57° S beschränkt. Der Höhenbereich der CRISTA-Messungen war 15 - 180 km.

Meßdaten

Die Datenauswertung einer Fernerkundungsmessung umfaßt mehrere z.T. aufwendige Schritte. Dies und die Menge der erhaltenen CRISTA-Daten führen dazu, daß endgültig ausgewertete Daten gegenwärtig noch nicht vorliegen. Es können deshalb hier nur einige vorläufige Ergebnisse gezeigt werden, die einen Eindruck von der Art der CRISTA-Daten vermitteln.

a.) Horizontale Strukturen

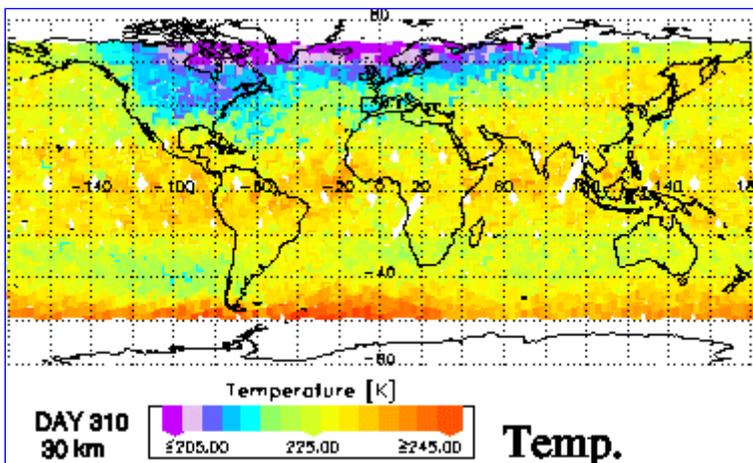
Zur Analyse horizontaler Strukturen werden die Meßdaten als globale Karten dargestellt. Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Atmosphärentemperatur, wie sie am 6.11.94 in 30 km Höhe gemessen wurde. Die Temperatur ist ein wichtiger dynamischer Parameter. Sie wird aus der Emission des CO₂ abgeleitet (s. [Tab. 1](#)).

Tab. 1: Liste der von CRISTA gemessenen Gase. Die angegebenen Wellenlängen bezeichnen das Zentrum der Banden. Die Emissionen können in dem angegebenen Höhenbereich nachgewiesen werden.

Spurengas	Wellenlänge	Höhenbereich
CO ₂	4,3 µm	15 - 120 km
CO	4,6 µm	*
NO	5,3 µm	100 - 180 km
NO ₂	6,2 µm	15 - 40 km
H ₂ O	6,3 µm	15 - 70 km
CH ₄	7,7 µm	15 - 70 km

N ₂ O	7,8 µm	15 - 40 km
N ₂ O ₅	8,0 µm	20 - 40 km
O ₃	9,6 µm	15 - 95 km
F12(CF ₂ Cl ₂)	10,8 µm	15 - 30 km
HNO ₃	11,3 µm	15 - 40 km
F11(CFCl ₃)	11,8 µm	15 - 20 km
Aerosol	12,0 µm	15 - 30 km
ClONO ₂	12,5 µm	*
CO ₂ , T	12,6 µm	15 - 70 km
CO ₂ , T, Dichte	15,0 µm	40 - 150 km
N ₂ O	17,0 µm	40 - 45 km
H ₂ O	58,0 µm	40 - 80 km
HF	61,0 µm	40 - 65 km
O(³ P)	63,0 µm	80 - 180 km
HCl	69,0 µm	*
		* wird noch analysiert

In [Abb. 2](#) erkennt man die Dreifachspuren der drei CRISTA-Blickrichtungen. Jeder Datenpunkt repräsentiert ein Vertikalprofil der Temperatur, d.h. oberhalb und unterhalb der gezeigten Temperaturverteilung gibt es weitere globale Karten im Abstand von 1,5 km, und zwar im Bereich von 15 - 45 km. Der Abstand der Datenpunkte entlang einer Spur beträgt etwa 200 km. Das ist nahe der theoretischen Grenze für die Auflösung bei Horizontsondierung. [Abbildung 2](#) setzt sich aus 9200 Meßpunkten zusammen. Das ist fast um einen Faktor acht mehr als das, was das bisher beste Satellitengerät (CLAES auf UARS) leistet. Die Relativgenauigkeit der gezeigten Temperaturen ist < 1 K (entlang einer Spur). Die Absolutgenauigkeit dieser sehr vorläufigen Daten beträgt einige Kelvin.



[Abb. 2: Globale Temperaturkarte am 6.11.94 in 30 km Höhe.](#)

Die Temperatur-Karte in [Abb. 2](#) zeigt eine Fülle von Strukturen auf großen Skalen (einige 10.000 km), mittleren Skalen (einige 1000 km) und kleinen Skalen (< 1000). Die deutlichste Großstruktur ist das Kaltluftgebiet über Nordamerika, Nordatlantik und

Nordeuropa. Es ist auf eine Deformation des nördlichen Polarwirbels zurückzuführen. Eine solche Struktur war auch bisher schon gut meßbar.

Eine Struktur mittlerer Größe ist das Kaltluftgebiet westlich von Patagonien (40° S, 100° W) von einigen 1000 km Ausdehnung. Sie ist mit herkömmlichen Mitteln kaum zu messen. Die Ursache dieser kalten Luftmasse wird gegenwärtig untersucht.

[Abbildung 2](#) zeigt schließlich erhebliche Temperaturänderungen über ganz kurze Entfernungen, die mit bisherigen Methoden nicht meßbar sind. Folgt man in [Abb. 2](#) einer bestimmten Meßspur, so kommen zwischen benachbarten Meßpunkten häufig Temperatursprünge von mehreren Kelvin vor. Solche Fluktuationen haben eine erhebliche Bedeutung für die Atmosphären-Chemie, da viele Reaktionen stark und nichtlinear von der Temperatur abhängen [2]. Insgesamt zeigt [Abb. 2](#), daß die kleinräumigen Strukturen, für deren Feststellung CRISTA gebaut wurde, in der Tat vorhanden sind.

Globale Karten entsprechend [Abb. 2](#) wurden auch für alle Spurengase mit Wellenlängen $< 12,6$ μm gemessen ([Tab. 1](#)). Der Höhenunterschied auch dieser Karten beträgt 1,5 km. Als ein Beispiel ist in [Abb. 3](#) das Mischungsverhältnis von Ozon wiedergegeben, das am 6.11.94 in 30 km Höhe

gemessen wurde (vorläufige Daten). Auch diese Karte zeigt Variationen auf allen horizontalen Skalen ("Flickenteppich").

Die Datenpunkte in [Abb. 2](#) und [3](#) an einem gegebenen geographischen Punkt wurden zur gleichen Zeit in der gleichen Höhe gemessen. Es lohnt sich also, nach möglichen Korrelationen zu suchen. Unterhalb von 30 km Höhe erwartet man eine Korrelation zwischen Temperatur und Ozon (transport-dominierter Bereich), oberhalb von 30 km eine Antikorrelation (photochemischer Bereich). Der Vergleich von [Abb. 2](#) und [3](#) zeigt, daß man beides findet: Die großräumigen Strukturen von Temperatur und Ozon in hohen nördlichen Breiten entsprechen einander. Das gleiche gilt für den Äquatorbereich. Bei hohen südlichen Breiten gibt es eine solche Entsprechung dagegen nicht. Bei ganz kleinräumigen Strukturen, etwa bei einzelnen Meßpunkten, die farblich als "Ausreißer" erscheinen, deutet sich schließlich gelegentlich ein gegensinniges Verhalten ("Antikorrelation") an. Diese Zusammenhänge und ihre Ursachen werden gegenwärtig untersucht.

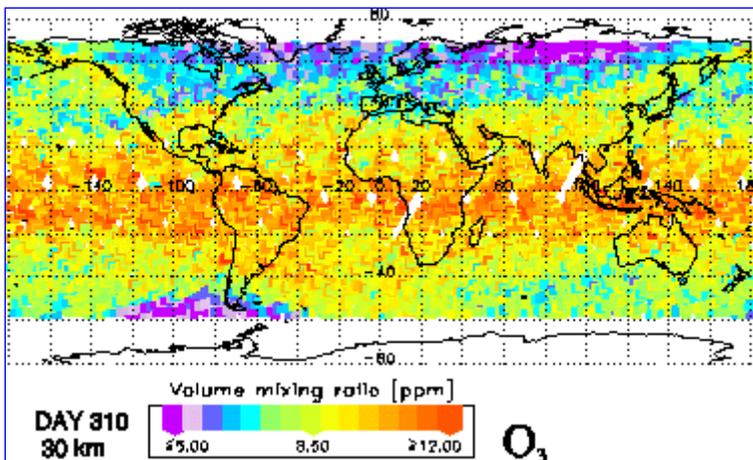


Abb. 3: Globale Ozonverteilung am 6.11.94 in 30 km Höhe.

b.) Vertikale Transporte

Vertikale Transporte sind ein wichtiger Teil der Atmosphärendynamik. Sie lassen sich häufig an charakteristischen horizontalen Strukturen der Spurengas-Verteilung erkennen.

In [Abb. 4](#) ist eine Karte der Strahlungsintensität des Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffs CFC₁₃ gezeigt, die am 11.11.94 in etwa 18 km Höhe gemessen wurde. (Da diese Intensitäten noch nicht in Teilchendichten umgerechnet werden konnten, sind sie nur ein grobes Maß für die CFC₁₃-Verteilung). Erhöhte CFC₁₃-Dichten zeigen hier Aufwärtstransporte, erniedrigte Dichten Abwärtstransporte an. Erniedrigte CFC₁₃-Werte sind in hohen nördlichen Breiten sowie bei und westlich von Feuerland sichtbar. Dies ist im Norden eine Folge des Polarwirbels, innerhalb dessen die Luft absteigt. Im Süden sieht man die nördliche Spitze des Ozonlochs, in dem die Luft ebenfalls absteigt (Südpolar-Wirbel).

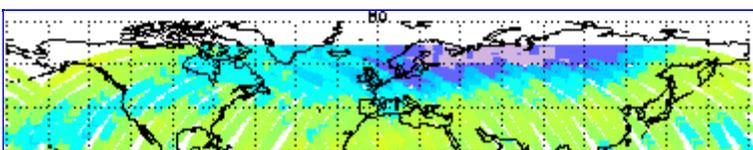
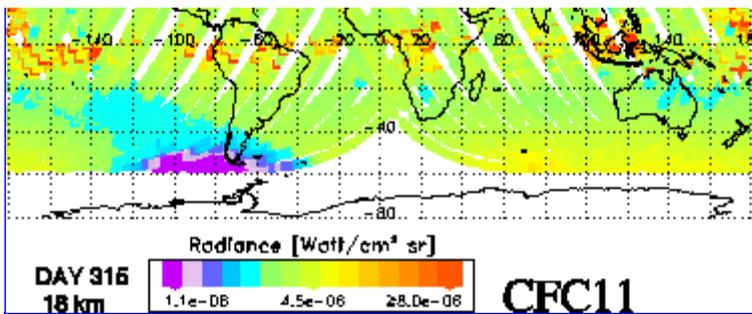


Abb. 4: Strahlungsintensität von CFC₁₃ bei etwa 18 km Höhe. Gelbe und rote Punkte deuten



auf aufsteigende, blaue und violette auf absteigende Luftbewegung hin.

Einzelne Gebiete aufsteigender Transporte zeigt [Abb. 4](#) in einem Breitenband von ca. $\pm 15^\circ$ entlang des Äquators. Drei

dieser Gebiete sind für ihr besonders heißes Klima und die damit verbundene starke vertikale Konvektion in der unteren Atmosphäre bekannt: das Amazonasgebiet, das Kongobecken und die Inselwelt von Indonesien. Das vierte Gebiet liegt über dem Pazifik beiderseits der Datumsgrenze. Es ist größer als die anderen und war für uns eine Überraschung. Es konnte als ein El Niño identifiziert werden. [El Niño ist eine verheerende Klimastörung im pazifischen Raum.]

c.) Abweichungen vom lokalen thermodynamischen Gleichgewicht

Die Ableitung von Spurengasdichten aus den gemessenen Strahlungsintensitäten ist ohne besondere Probleme möglich, solange die Atmosphäre sich im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (LTE) befindet, d.h. solange die Stoßzeit der Moleküle hinreichend kurz ist. Das ist in der oberen Atmosphäre (> 60 km) i.a. nicht mehr der Fall. Im Nicht-LTE-Bereich (NLTE) tritt als Konkurrenz zur thermischen Anregung die Resonanzfluoreszenz sowie chemische Anregung hinzu. Die Resonanzstrahlung stammt in der Nacht im wesentlichen aus den tieferen Atmosphärenschichten. Tags kommt die Sonneneinstrahlung hinzu, die im nahen Infrarot ziemlich intensiv ist. [Abbildung 5](#) zeigt als ein Beispiel die von CRISTA gemessene Emission des CO_2 bei $4,3 \mu\text{m}$ (in etwa 100 km Höhe) für einen Teil eines Erdumlaufs.

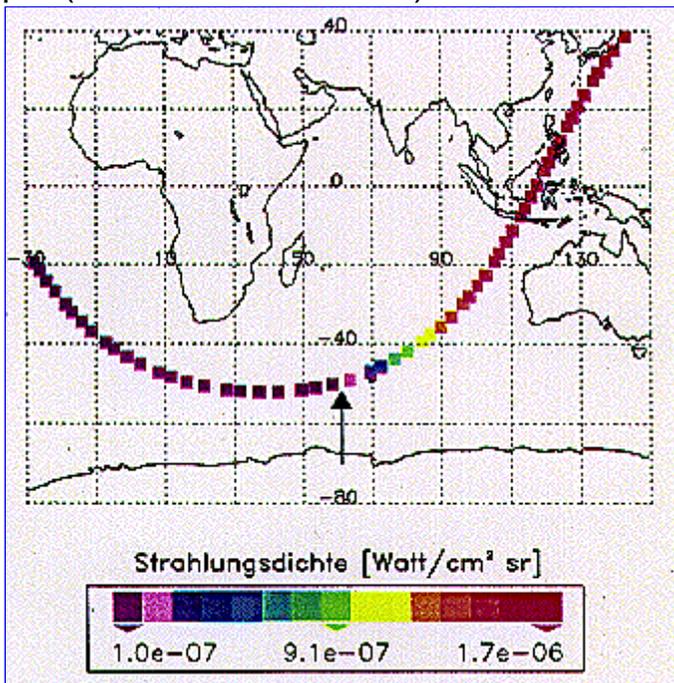


Abb. 5: Emission der $4,3 \mu\text{m}$ -Bande des CO_2 entlang eines Teils eines Erdumlaufs. Unerwartet ist, daß der Tag-Nacht-Übergang (Pfeil) nicht scharf ist, sondern über mehrere 1000 km "verschmiert" (IR-Dämmerung). Man beachte, daß Tag-Nacht-Unterschiede in Abb. 3 und 4 nicht zu sehen sind.

Die gemessene Intensität auf der Tagseite der Erde (rot) ist erheblich höher als die auf der Nachtseite (violett). Die Untersuchung solcher NLTE-Verhältnisse ist wichtig, da sich vor kurzem gezeigt hat, daß die Energiebilanz der Erdatmosphäre in

einem wesentlichen Höhenbereich (80 - 150 km) ohne sie nicht zu verstehen ist. Ebenfalls hat sich gezeigt, daß die oberen Atmosphären der Planeten Venus und Mars durch solche Prozesse beherrscht werden. Die Meßergebnisse in der Erdatmosphäre liefern hier interessante Beiträge zum Verständnis der Planeten [3].

d.) Linienemissionen

Die Beobachtung einzelner Spektrallinien mit CRISTA ist wegen zu geringer spektraler Auflösung nur in wenigen Fällen möglich. Der wichtigste dieser Fälle ist der Feinstruktur-Übergang des atomaren Sauerstoffs bei 63 μm . In [Abb. 6](#) ist ein entsprechendes Spektrum des "langwelligen" Spektrometers wiedergegeben. Die Messung stammt aus 170 km Höhe. Die 63 μm -Emission galt lange Zeit als der Hauptkühlungsmechanismus der Atmosphäre im Höhenbereich 100 - 500 km. Dies ist ein wichtiger Bereich, in dem die meisten Erdsatelliten operieren. Erste spektrale Messungen mittels Raketen ergaben Hinweise darauf, daß die 63 μm Strahlungsintensität aber niedriger ist, als theoretisch berechnet wurde, und daß die Linie zur Atmosphärenkühlung möglicherweise nicht viel beitragen kann [4]. Diese punktuellen Ergebnisse können jetzt mittels der globalen Messungen, die CRISTA gemacht hat, überprüft und detailliert werden. Die 63 μm -Emission des atomaren Sauerstoffs wird auch als ein Kühlungsmechanismus von astronomischen Dunkelwolken und Protosternen berücksichtigt. Die 63 μm -Messungen von CRISTA haben auch hier entsprechende Konsequenzen [5].

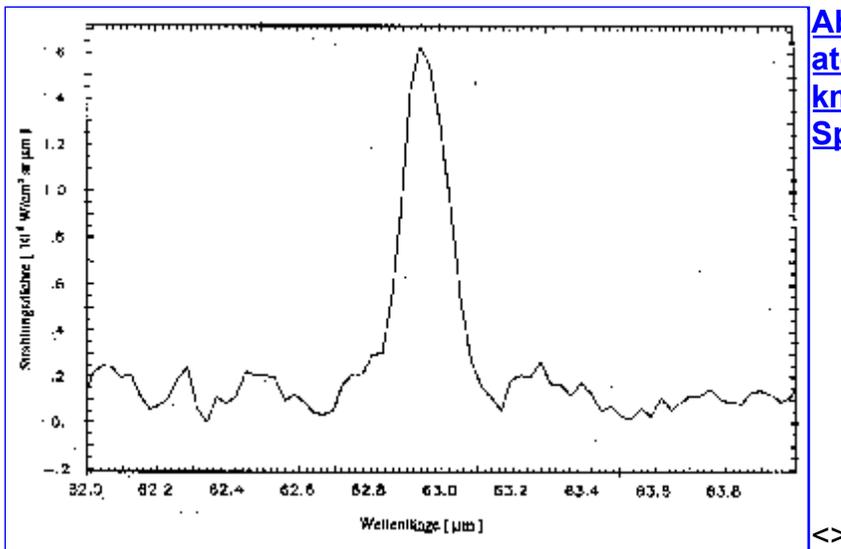


Abb. 6: Linienemission des atomaren Sauerstoffs in 170 km Höhe. Es wurden über 115 Spektren gemittelt.

<>

Das Projekt CRISTA wurde mit Mitteln der Deutschen Agentur für Raumfahrt-Angelegenheiten GmbH (DARA, Bonn), sowie des Ministeriums für Wissenschaft und Forschung (MWF, Düsseldorf) gefördert.

Literatur

[1] D. Offermann, in: E.V. Thrane et al. (eds.), Coupling processes in the lower and middle atmosphere, 389, Kluwer Acedem. Publ., Netherlands, 1993.

[2] D.M. Murphy and A.R. Ravishankara, Geophys. Res. Let. 21, 2471, 1994.

[3] G.M. Keating and S.W. Bougher, J. Geophys. Res., 97, 4189, 1992.

[4] K.U. Grossmann, P. Barthol, W. Frings, R. Hennig, and D. Offermann, Adv. Space Res., 2, 111, 1983.

[5] G. Melmik, G.E. Gull, and M. Harvit, Astrophys. J., 227, L29, 1979.

[Back to CRISTA Homepage](#)