

Ableitung von zweidimensionalen Verteilungen
atmosphärischer Parameter aus MIPAS-STR-Spektren
der APE-GAIA Messkampagne

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

Katrin Lessenich

20. Dezember 2000

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Universität Karlsruhe (TH)

Forschungszentrum Karlsruhe

Zusammenfassung

Das flugzeuggetragene Fourierspektrometer MIPAS-STR (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding – Stratospheric Aircraft) wurde am IMK (Institut für Meteorologie und Klimaforschung) in Karlsruhe entwickelt. Es kam im Rahmen der APE-GAIA Kampagne, die auf die Untersuchung der antarktischen Ozonchemie im Südfrühjahr ausgerichtet war, erstmals in einem wissenschaftlichen Projekt zum Einsatz. Als Horizontsondierer auf einem hochfliegenden Flugzeug vereint es die Eigenschaften der MIPAS-Instrumente, die bisher auf Ballon und dem Flugzeug Transall zum Einsatz kamen.

Auf dem ersten Messflug des Geräts am 23. September 1999 erfolgte die Aufnahme der Spektren, aus denen im Rahmen dieser Arbeit zweidimensionale Verteilungen von atmosphärischen Parametern abgeleitet wurden. Diese Verteilungen wurden für die Temperatur und Volumenmischungsverhältnisse von Salpetersäure (HNO_3), Chlornitrat (ClONO_2), Ozon (O_3), sowie FCKW-11 (CCl_3F) und FCKW-12 (CCl_2F_2) erstellt.

Die MIPAS-STR-Messungen zeigen charakteristische Strukturen der antarktischen unteren Stratosphäre im Frühjahr. In der Temperaturverteilung sind die kalten Luftmassen im Bereich des Polarwirbels deutlich zu erkennen. Die Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von Ozon zeigt die für das Ozonloch typische Ausdünnung südlich der geographischen Breite von $62,5^\circ\text{S}$ im Höhenbereich zwischen 15 und 19 km mit Minimalwerten von 0,1 ppmv hervor. Im Vorfeld seiner Entstehung erfolgt die Umwandlung von Chlornitrat und anderen Reservoirgasen durch heterogene Reaktionen an der Oberfläche von PSC-Teilchen. Durch den Abbau hat sich ein Bereich mit niedrigem Chlornitratgehalt ausgebildet, der in den abgeleiteten Verteilungen vom 23. September 1999 südlich von 64°S und oberhalb von 16 km Höhe zu sehen ist. Die MIPAS-STR-Messungen von HNO_3 weisen auf Denitrifizierung, d.h. die Entfernung von Salpetersäure durch Sedimentation, im Bereich ab 63°S und oberhalb von 16 km hin.

Neben den Verteilungen dieser Gase wurden mit FCKW-11 und FCKW-12 auch zwei troposphärische Quellgase beobachtet. Sie haben in der Troposphäre ein konstantes Volumenmischungsverhältnis, das oberhalb der Tropopause durch Photolyse abnimmt. Die MIPAS-STR-Messungen zeigen diese Abnahme mit der Höhe. Darüber hinaus beobachtet man bei diesen Gasen das Absinken des Profils mit zunehmender südlicher Breite, vor allem in den Messungen des Hinflugs.

Zusätzlich zur erstmaligen Ableitung der zweidimensionalen Verteilungen atmosphärischer Parameter aus MIPAS-STR-Messungen wurden Vergleiche von Einzelprofilen mit Daten aus simultan erfolgten in-situ-Messungen durchgeführt. Außer für Ozon und die FCKWs war dies für die Temperatur möglich. In diesem Fall konnten besonders vielfältige Vergleiche angestellt werden, die zur Validierung der berechneten Temperaturen herangezogen wurden.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Das MIPAS-STR-Experiment	3
2.1	Beschreibung des Geräts.....	3
2.2	Die Geräteeigenschaften am Flugtag	5
2.2.1	Das Gesichtsfeld (FOV).....	6
2.3	Die Messstrategie.....	7
2.4	Der Verlauf der Auswertung.....	9
3	Der Flug vom 23. September 1999	11
4	Berechnung der Vertikalprofile und Darstellung der Ergebnisse.....	13
4.1	Strahlungsübertragungs- und Inversionsrechnung mit KOPRA und KOPRAFIT	13
4.2	Ergebnisse und Vergleiche mit anderen Messungen	17
4.2.1	Temperatur.....	17
4.2.1.1	Eingaben für die Profilberechnung	17
4.2.1.2	Fehlerabschätzung	19
4.2.1.3	Die zweidimensionale Verteilung der Temperatur	21
4.2.2	HNO ₃	26
4.2.2.1	Eingaben für die Profilberechnung	26
4.2.2.2	Fehlerabschätzung	27
4.2.2.3	Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von HNO ₃	28
4.2.3	ClONO ₂	31
4.2.3.1	Eingaben für die Profilberechnung	31
4.2.3.2	Fehlerabschätzung	32
4.2.3.3	Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von ClONO ₂	33
4.2.4	Ozon.....	35
4.2.4.1	Eingaben für die Profilberechnung	35
4.2.4.2	Fehlerabschätzung	36
4.2.4.3	Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von O ₃	37
4.2.5	FCKW-11 und FCKW-12.....	42
4.2.5.1	Eingaben für die Profilberechnung	42
4.2.5.2	Fehlerabschätzung	44
4.2.5.3	Die zweidimensionalen Verteilungen der Volumenmischungsverhältnisse der FCKWs.....	45
5	Interpretation der Ergebnisse	49
6	Schlussbemerkung und Ausblick.....	53
	Literaturverzeichnis	55
	Abbildungsverzeichnis.....	57
	Tabellenverzeichnis	59
	Abkürzungen.....	60

1 Einleitung

Die APE-GAIA¹ Kampagne war auf die Untersuchung von physikalischen und chemischen Prozessen ausgerichtet, welche für die Zerstörung der antarktischen stratosphärischen Ozonschicht verantwortlich sind. Die Erforschung solcher zeitlich und lokal variierender Prozesse erfordert Messungen mit in-situ- und Fernerkundungsgeräten. Deshalb wurde eine bestmögliche Auswahl von Geräten an Bord des hochfliegenden Stratosphärenflugzeugs M55-Geophysica installiert. Die Kombination vieler Messmethoden auf einer gemeinsamen Plattform ermöglicht zudem den internen Vergleich der Messungen unterschiedlicher Instrumente.

Das neue Experiment MIPAS-STR² kam im Rahmen der APE-GAIA Kampagne im September/Oktober 1999 erstmals in einem wissenschaftlichen Projekt zum Einsatz. Es ist eine Neuentwicklung, die auf den bisherigen Fernerkundungs-Experimenten MIPAS-B2³ und MIPAS-FT⁴ aufbaut. Während man mit dem B2-Gerät aus Horizontsondierungen an einem Ort Vertikalprofile von atmosphärischen Parametern erhält, konnte man mit dem FT-Gerät die horizontale Verteilung von Säulengehalten der Spurengase entlang des Flugwegs bestimmen. Das Ziel der Entwicklung des MIPAS-STR war es, zweidimensionale Verteilungen von Temperatur und Volumenmischungsverhältnis vieler wichtiger Spurengase zu messen. Als Horizontsondierer auf einem hochfliegenden Flugzeug vereint MIPAS-STR für die Region der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre die Vorteile der Ballon- und früheren Flugzeugmessungen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden aus MIPAS-STR-Messungen Vertikalprofile von Temperatur und ausgewählten Gasen entlang der Flugtrajektorie abgeleitet. Die große Menge der aufgenommenen Messdaten erforderte eine Automatisierung der Auswertung. Die Daten wurden mit verschiedenen neu- und weiterentwickelten Programmen bearbeitet. Die Berechnung der Profile erfolgte mit dem Vorwärts-Programm KOPRA⁵ [Stiller et al., 1998] sowie einer Erweiterung zur Inversionsrechnung, KOPRAFIT [Höpfner et al., 1998].

Während APE-GAIA bestand die Nutzlast der Geophysica neben MIPAS-STR aus einem weiteren Spektrometer zur Fernerkundung, SAFIRE-A⁶. Mit der Messung von atmosphärischer Strahlung im fernen Infrarot ergänzt SAFIRE-A die MIPAS-STR-Messung im mittleren Infrarot. Durch die Abdeckung beider Spektralbereiche kann man die Verteilung vieler Spurengase ableiten: MIPAS-STR deckt nahezu die gesamte NO_y-Familie ab, zusammen erfassen die Instrumente die gesamte Cl_y-Familie. Mehrere der von MIPAS-STR gemessenen Spezies werden auch von in-situ-Geräten auf der Geo-

¹ Airborne Polar Experiment - Geophysica Aircraft In Antarctica

² Michelson Interferometer für passive atmosphärische Sondierung - Stratosphärenflugzeug

³ MIPAS- B2: weiterentwickeltes MIPAS für Ballon

⁴ MIPAS-FT: MIPAS für Flugzeug Transall

⁵ Karlsruhe Optimized and Precise Radiative Transfer Algorithm

⁶ Spectroscopy of the Atmosphere using Far Infrared Emission - Airborne

physica erfasst. Von ECOC⁷ und FOZAN⁸ wurde zum Beispiel die Ozonkonzentration und mit HAGAR⁹ unter anderem Konzentrationen von FCKW¹⁰-11 und FCKW-12 gemessen.

Der instrumentelle Aufbau von MIPAS-STR sowie die Strategie der Messung während der APE-GAIA Kampagne werden in Kapitel 2 beschrieben. Die in dieser Arbeit ausgewerteten Daten wurden auf dem Flug der Geophysica vom 23.09.99 aufgenommen, auf den in Kapitel 3 eingegangen wird. Im vierten Kapitel werden zunächst die Grundlagen und Voraussetzungen für die Strahlungsübertragungs- und Inversionsrechnung zur Ableitung der Vertikalprofile zusammengestellt. Es folgt die nach Temperatur und Spurengasen (HNO₃, ClONO₂, O₃, FCKW-11 und FCKW-12) getrennte Darstellung der Ergebnisse, sowie eine Abschätzung der Fehler. Sofern Daten aus simultanen Messungen zur Verfügung standen, wurden Vergleiche durchgeführt. Kapitel 5 enthält die Einordnung in den Zusammenhang der antarktischen Stratosphäre und die wissenschaftliche Interpretation. Mit Kapitel 6 schließt ein kurzer zusammenfassender Rückblick die Arbeit ab.

⁷ Electrochemical Ozone Cell

⁸ Fast Ozone Analyser

⁹ High Altitude Gas Chromatograph for Atmospheric Research

¹⁰ Fluorchlorkohlenwasserstoff

2 Das MIPAS-STR-Experiment

2.1 Beschreibung des Geräts

Die Entwicklung des neuen MIPAS-Instruments wurde speziell auf den Betrieb an Bord von hochfliegenden Flugzeugen ausgerichtet. Ihr Ziel ist die Messung vertikaler Verteilungen von ozonrelevanten stratosphärischen Gasen entlang der Flugroute [Piesch et al., 1996].

Das Fernerkundungsgerät wird im Spektralbereich des mittleren Infrarot betrieben. Hier befinden sich charakteristische Signaturen vieler Spurengase, die durch Vibrations-Rotationsübergänge der Moleküle entstehen. Die FTIR-Technik¹¹ ermöglicht die simultane Messung der Gase. Durch die Kühlung mit Trockeneis wird die Eigenstrahlung des Geräts reduziert und damit auch das Hintergrundrauschen. Dies ist Voraussetzung, um die thermische Emission der Atmosphäre zu detektieren und macht die Messung von Sonne bzw. Mond als Strahlungsquelle unabhängig. Die Stärke von MIPAS-STR ist die Möglichkeit zur Erfassung der NO_y-Familie, eines Teils der Cl_y-Familie, weiterer stratosphärischer Spurengase und troposphärischer Quellgase, wie z.B. von ClONO₂, HNO₃, N₂O₅, NO, NO₂.

Die zentrale Einheit des Instruments ist ein hochauflösendes Interferometer, das nach dem Doppelpendelprinzip aufgebaut ist [Fischer, 1992]. Das Interferometer liefert als primäres Datenprodukt Interferogramme. Die Fouriertransformation dieser Interferogramme ergibt die spektrale Intensitätsverteilung der einfallenden Strahlung. Die gemessenen Interferogramme werden während des Flugs gespeichert und später am Boden weiter verarbeitet.

Das Optikmodul des MIPAS-STR umfasst eine Scaneinheit zur Einstellung der Elevationswinkel (siehe auch Abschnitt 2.3), ein Spiegelteleskop zur Störlichtunterdrückung, ein Kühlsystem, welches aus mit Trockeneis gefüllten Röhren besteht, die in einer Isolierwanne integriert sind, sowie eine Detektoreinheit.

¹¹ Fourier-Transformations Infrarot (-Spektrometer)

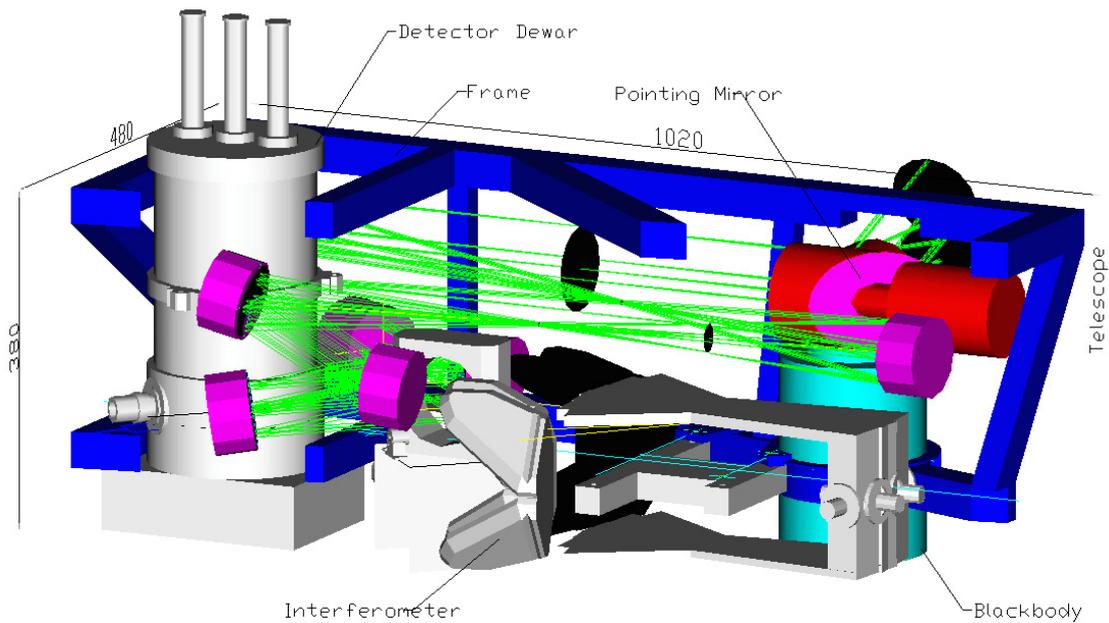


Abb. 2.1 Dreidimensionale Ansicht des Optikmoduls von MIPAS-STR

Die zugehörige Elektronik und Systemsteuerung setzt sich zusammen aus einem Zentralrechner zur Steuerung des Gesamtsystems, der Line-of-sight Elektronik (LOSE) zur Regelung des Scanspiegels und der Interferometerelektronik (IFME) zur Datenaufnahme und zur Steuerung des Doppelpendels.

Eine Bodenstation erlaubt während des Aufenthalts der Geophysica im Hangar eine online-Visualisierung sämtlicher Zustandsparameter. Vor dem Start ermöglicht sie das Setzen der aktuellen Messparameter, nach der Landung das Auslesen der im Flug gespeicherten Daten [Piesch et al., 1996].

2.2 Die Geräteeigenschaften am Flugtag

Die Messung der atmosphärischen Emission erfolgte mit einer spektralen Auflösung¹² von $0,043 \text{ cm}^{-1}$ in vier Kanälen für unterschiedliche Spektralbereiche (s. Tab. 2.1). Kanal 1, dessen Daten in dieser Arbeit für die Ableitung der Profile verwendet wurden, umfasst den Wellenzahlbereich von 770 cm^{-1} bis 970 cm^{-1} .

Der vertikale Öffnungswinkel des Gesichtsfelds (engl.: *field-of-view*, FOV) betrug $0,48^\circ$, was einer vertikalen Ausdehnung von ca. 2,5 km bei 10 km Tangentenhöhe und 17 km Flugniveau entspricht. Diese sowie weitere Eigenschaften und charakteristische Parameter sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Scaneinheit: Stabilität der Sichtlinie	1 arcmin (3σ)
Interferometer: Optischer Hub (L) spektrale Auflösung ($0,60335/L$) Strahlquerschnitt Etendue Vorschubgeschwindigkeit	$\pm 14.1 \text{ cm}$ $0,043 \text{ cm}^{-1}$ 50 mm $2,6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sr}$ 3,1 cm/s
Detektoreinheit: Detektortyp Gesichtsfeld (FOV full cone) Signalfrequenzen	Si:As $0,48^\circ$ 2,3 – 5,8 kHz
Noise-equivalent spectral radiance (NESR): Kanal 1: $770 - 970 \text{ cm}^{-1}$ ($10,0 - 13,0 \mu\text{m}$) Kanal 2: $1200 - 1370 \text{ cm}^{-1}$ ($7,3 - 8,3 \mu\text{m}$) Kanal 3: $1585 - 1645 \text{ cm}^{-1}$ ($6,1 - 6,3 \mu\text{m}$) Kanal 4: $1845 - 1940 \text{ cm}^{-1}$ ($5,2 - 5,4 \mu\text{m}$)	$30 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ $45 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ $20 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ $6 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \text{ sr cm}^{-1})$
Temperatur und Emissionsvermögen der Schwarzkörper SK1 im Optikmodul (Hohlraum) SK2 in der oberen Isolation (Flächenstrahler)	205 K; 0,997 ca. 240 K; 0,98

Tab. 2.1 Charakteristische Parameter des MIPAS-STR für den Flug am 23.09.99

¹² Die hier angegebene spektrale Auflösung entspricht der FWHM (engl.: full width at half maximum)

2.2.1 Das Gesichtsfeld (FOV)

Die Messungen zur Bestimmung des FOV, welches bei der Ableitung von Profilen atmosphärischer Parameter eingeht, wurden am 14.10.99 zwischen zwei Messflügen durchgeführt. Hierbei wurde das FOV unter 15 verschiedenen horizontalen Winkeln in vertikaler Richtung vermessen. Die so erhaltenen Kurven mit der Verteilung der Intensität wurden durch Subtrahieren einer schrägen Basislinie korrigiert. Die Korrektur war nötig, da die Werte für die Intensität außerhalb des FOV nicht wie zu erwarten auf Null zurückgingen. Um das FOV in KOPRA zu berücksichtigen, wurde schließlich über 20 horizontale Bereiche integriert (siehe Abb. 2.2).

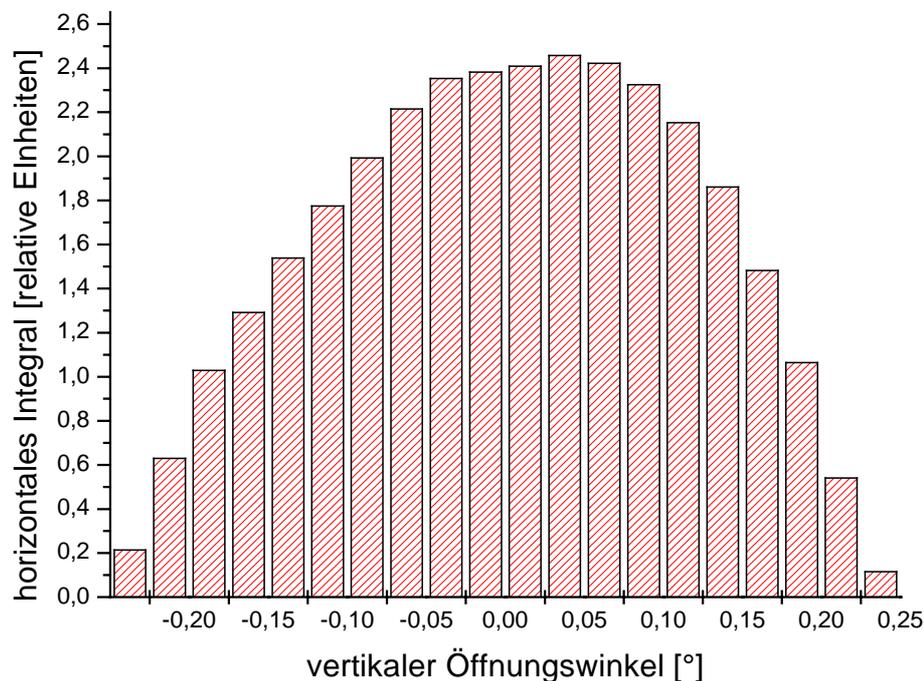


Abb. 2.2 Das horizontal integrierte FOV in vertikaler Richtung für Kanal 1 wie es in das Strahlungsübertragungsmodul in KOPRA eingeht

2.3 Die Messstrategie

Während der APE-GAIA Kampagne war das MIPAS-STR auf dem Rücken der Geophysica unter einer Haube installiert. (siehe Abb. 2.3). Die atmosphärische Strahlung wurde durch eine Öffnung auf der in Flugrichtung rechten Seite der Abdeckung in das Gerät eingekoppelt. Mit Hilfe eines drehbaren Scanspiegels kann die Sichtlinie auf Elevationswinkel zwischen -5° und 20° eingestellt und stabilisiert werden.

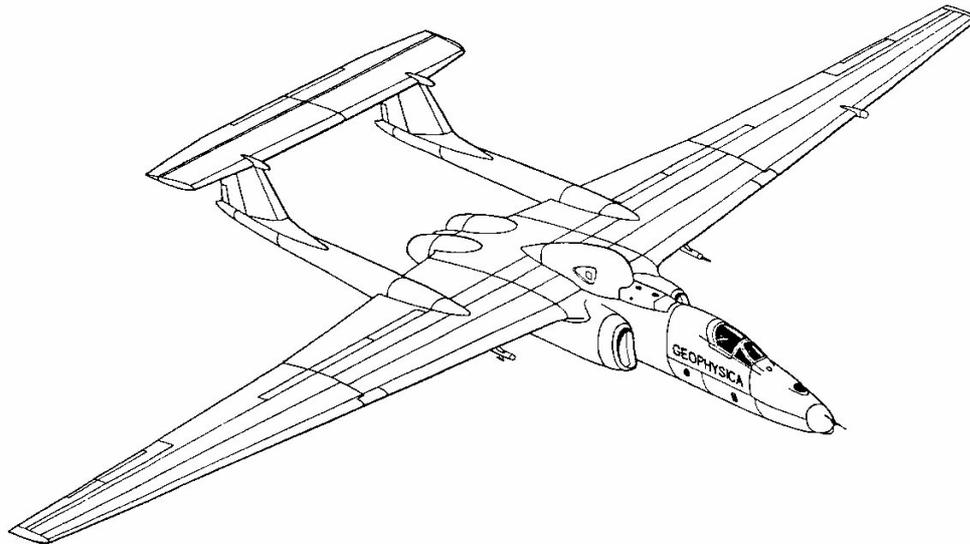


Abb. 2.3 Die Geophysica-M55 mit Haube für MIPAS-STR hinter der Pilotenkanzel

Die Messstrategie des MIPAS-STR während APE-GAIA war eine Kombination von Horizontsondierung, um Profile unterhalb des Flugzeugs zu erhalten und Aufwärtssondierungen um Säulengehalte und Information über die Profilform oberhalb des Flugzeugs zu gewinnen [Höpfner et al., 2000b]. Die Anzahl der Beobachtungswinkel ist variabel und kann den entsprechenden Anforderungen angepasst werden. Für den hier betrachteten Flugtag wurden die Winkel so gewählt, dass das Abtastgitter eine vertikale Gitterpunktentfernung von einem FOV für hohe Tangentenpunkte und eine Überschneidung von $\frac{1}{2}$ FOV für die unteren hat [Höpfner et al., 2000a]. Durch die Überschneidung wird die vertikale Auflösung für die niedrigen Tangentenhöhen erhöht [Höpfner et al., 2000b].

Die einzelnen Sequenzen am 23.09.1999 umfassten jeweils 14 Elevationswinkel, die zusammen die Information für die Berechnung eines Vertikalprofils enthalten. Außerdem wurden zwischen den Atmosphärenmessungen, die mit Winkeln zwischen -3.1° und $+3^\circ$ durchgeführt wurden, regelmäßige Schwarzkörper- bzw. Weltraummessungen für die Kalibrierung vorgenommen (siehe Abb. 2.4). Die Aufnahme eines Interferogramms dauerte ca. 10 Sekunden¹³. Somit erhielt man unabhängige Profile mit ungefähr 30 km Auflösung entlang der Flugstrecke.

¹³ Berechnung der Aufnahmedauer eines IFG: $(2 \times \text{optischer Hub} / \text{Vorschubgeschwindigkeit}) + 1$ s für die Umkehrphase des Interferometers

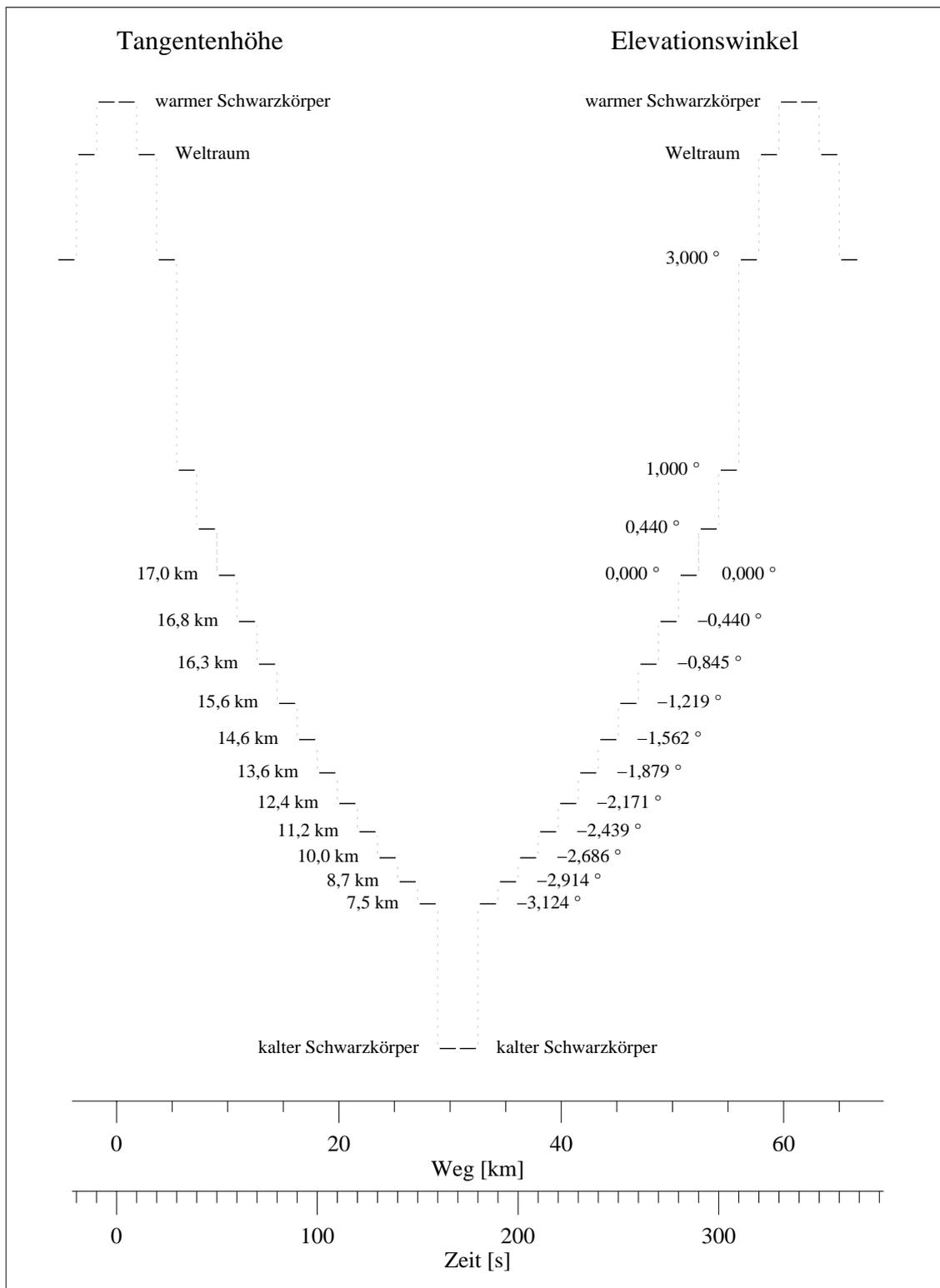


Abb. 2.4 Doppelsequenz der vertikalen Abtastung der Atmosphäre inklusive Atmosphären-, Schwarzkörper- und Weltraummessung

2.4 Der Verlauf der Auswertung

Die Auswertung der gemessenen Daten gliedert sich in zwei Abschnitte. Der Erste umfasst die Schritte vom Rohinterferogramm bis zum kalibrierten Spektrum. Im Zweiten werden daraus Profile von Temperatur und Volumenmischungsverhältnis¹⁴ der Spurengase abgeleitet (Kapitel 4).

Im ersten Abschnitt erfolgt zunächst eine Kontrolle der Interferogramme. Dabei werden fehlerhafte Interferogramme korrigiert oder andernfalls von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Für die Verarbeitung der IFG wird als erstes eine Phasenkorrektur durchgeführt (Abb. 2.5). Das verwendete Schema basiert auf der Minimierung der Korrelation zwischen Real- und Imaginärteil des Spektrums [Trieschmann et al., 1999].

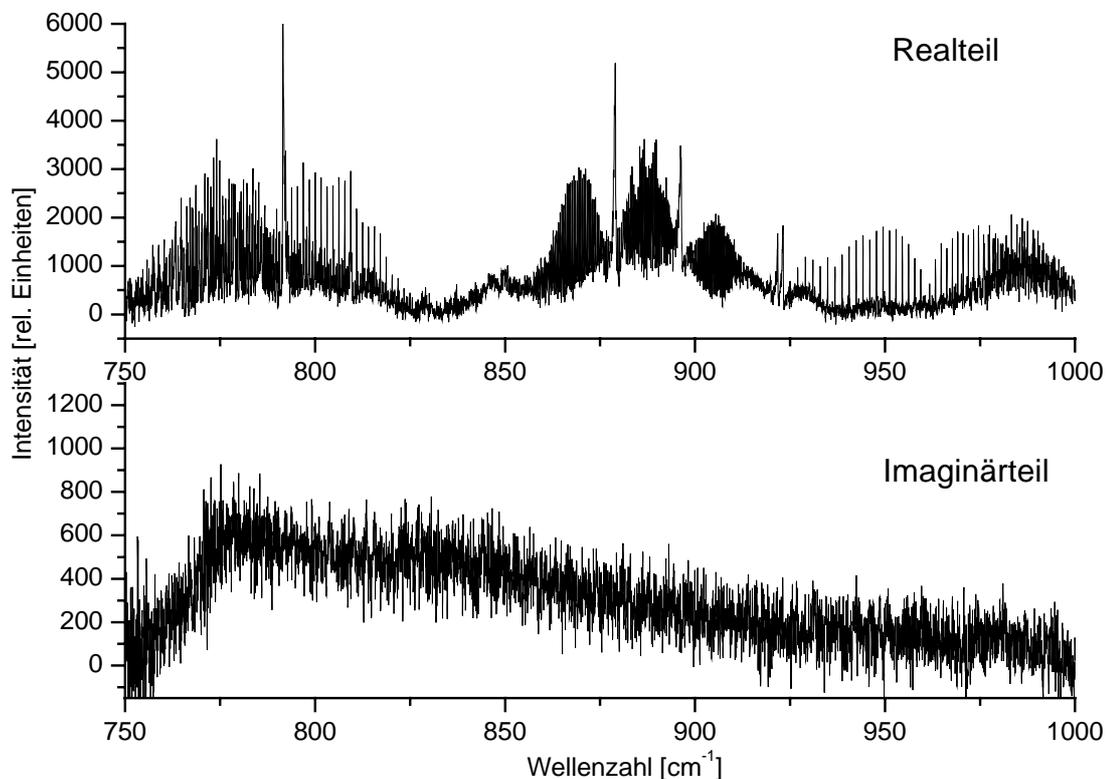


Abb. 2.5 Real- und Imaginärteil eines Spektrums (15 km Tangentenhöhe) nach der Phasenkorrektur

Der nächste Schritt ist die Kalibrierung, d.h. die Umrechnung der gemessenen relativen Größen in Strahldichteinheiten [$\text{nW}/(\text{cm}^2 \text{sr cm}^{-1})$]. Hierfür wird zunächst vom gemessenen Spektrum ein „Offset“ subtrahiert und dann durch den „Gain“ dividiert. Der Offset entspricht dem Beitrag der geräteeigenen Emission zum Spektrum und der Gain ist der Umrechnungsfaktor. Zu diesem Zweck wurden die Schwarzkörper- und

¹⁴ im Folgenden auch abgekürzt mit vmr, von engl. *volume mixing ratio*

Weltraummessungen (siehe Abb. 2.4) verwendet. Letztere konnten nicht direkt für den Offset benutzt werden, da die Spektren noch Signaturen von atmosphärischen Spurengasen enthalten. Zur Korrektur wurde eine iterative Methode verwendet, die auf simulierten Breitbandspektren basiert. Der aus dieser Methode resultierende Fehler in der Gainfunktion wurde auf weniger als 1% abgeschätzt [Höpfner et al., 2000a].

Die Stabilität der Kalibrierung wurde aus der Variabilität der Gainfunktion für jede Sequenz des Flugs ermittelt. Abb. 2.6 zeigt, wie sich der Gain für zwei Wellenzahlen während des Flugs ändert. Die Standardabweichung liegt bei maximal 8%. Für jeden der später beschriebenen vier Flugabschnitte wurde eine mittlere Gainkurve verwendet [Höpfner et al., 2000a] und ein Fehler von 5% angenommen.

Der Kalibrierfehler des Offset liegt in der gleichen Größenordnung wie der Offset selbst. Auf das Spurengasretrieval wirkt sich jedoch nur der Fehler im Gain aus, da der Offset als zusätzlicher Parameter in KOPRAFIT mit angepasst wird (siehe Abschnitt 4.2).

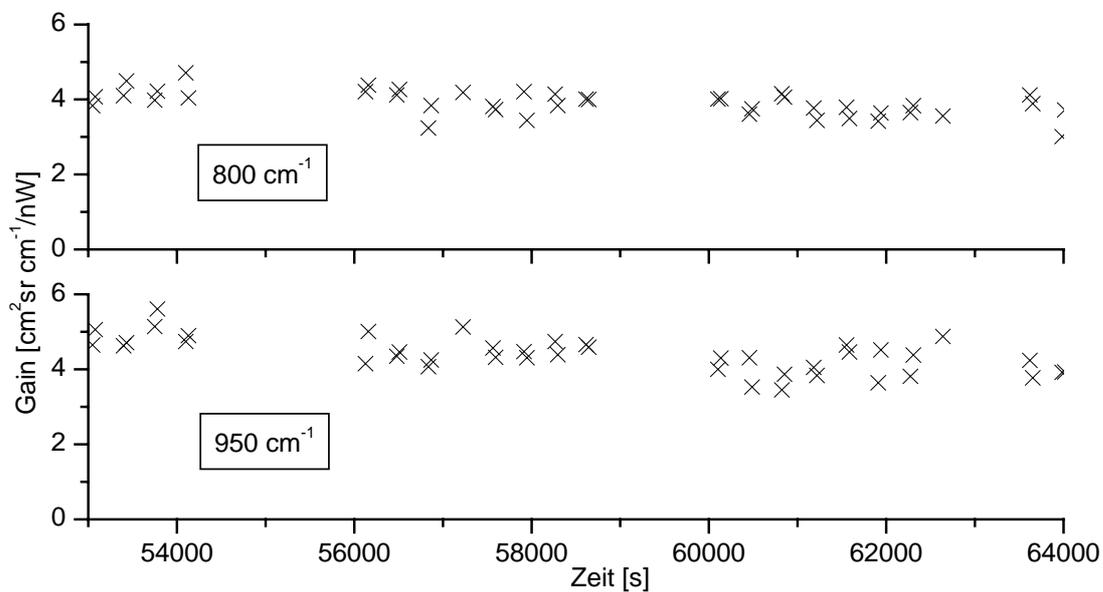


Abb. 2.6 Verlauf des „Gain“ entlang der Flugroute für zwei Wellenzahlen

Die in diesen Kapitel gemachten Angaben gelten für den Flug am 23. September; sie können aber zum Teil (wie z.B. die Standardabweichung des Gain) zwischen einzelnen Flügen variieren.

3 Der Flug vom 23. September 1999

Der Flug am 23. September war der zweite von insgesamt fünf Messflügen während der APE-GAIA Kampagne, die in der Zeit vom 15.09. bis 14.10.99 stattfand. Es war der erste wissenschaftliche Einsatz des MIPAS-STR. Der Ausgangspunkt für alle Flüge der Geophysica war Ushuaia in Tierra del Fuego, Argentinien ($54,5^{\circ}\text{S}$ $68,2^{\circ}\text{W}$). Dies ist der südlichste Flughafen der Welt der für den Start der Geophysica geeignet ist und ermöglicht es bis in den Polarwirbel hinein zu fliegen.

Der Flug am 23. September verlief folgendermaßen: Der Start erfolgte um 11 Uhr lokaler Zeit (entspricht 14 Uhr Global Mean Time, GMT). Die Flugroute verlief von Ushuaia aus in süd-südöstlicher Richtung. Dabei überflog die Geophysica die antarktische Halbinsel in der Nähe der Bodenstationen von Rothera und Marambio, wo Vergleichsmessungen ausgeführt wurden. Der Rückflug wurde bei ca. 68°S und 59°W um 16:30 Uhr GMT ($5,96 \times 10^4$ s) eingeleitet. Insgesamt dauerte der Flug 5 Stunden und 40 Minuten. Die Flugroute und das Temperaturfeld aus ECMWF-Daten auf einer Druckhöhe von 70 hPa, die in etwa dem Flugniveau entspricht, sind in Abb. 3.1 dargestellt. Für die Auswertung geeignete Messungen fanden in vier Flugabschnitten statt. Die Kreuze auf der Flugroute kennzeichnen den Ort des Flugzeugs während der Messung einer Sequenz, die Sternchen die Lage der Tangentenpunkte.

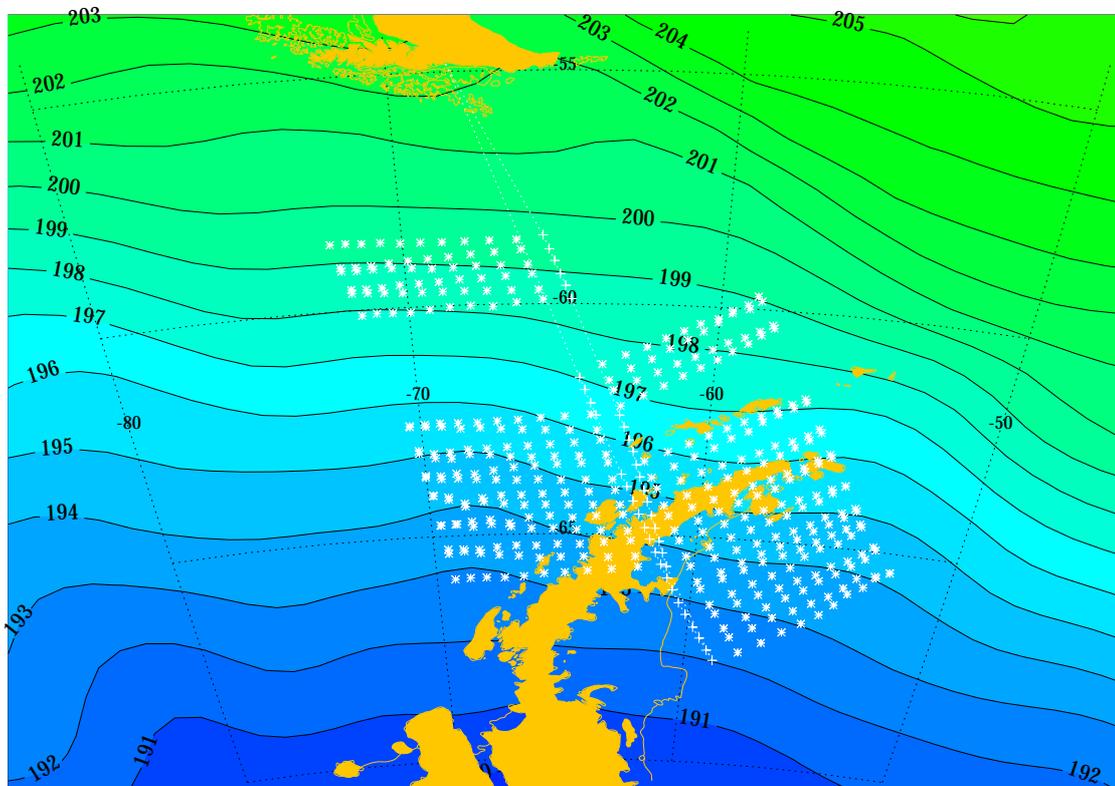


Abb. 3.1 Flugroute der Geophysica (gepunktet) am 23.09. und Lage der Tangentenpunkte der MIPAS-STR Messungen (Sternchen) mit Temperaturfeld im 70 hPa-Niveau (K)

Das Höhenprofil des Flugs ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die zunächst aufgetragene Flughöhe wurde nachträglich korrigiert. Das war nötig, weil die mit Hilfe des GPS¹⁵ gemessene Höhe gestört wird. Die Störungen haben eine Periodendauer von einigen Minuten und bewirken eine Verfälschung der gemessenen Flughöhe von bis zu 120 m. Um diese Störungen zu eliminieren, wurde aus Druckmessungen am Flugzeug und aktuellen ECMWF¹⁶-Daten eine zweite Flughöhe berechnet. Diese ist nicht mehr durch GPS verfälscht, aber ca. 350 m zu niedrig, was vermutlich eine Folge von zu kalt angenommenen Temperaturen für die Höhenberechnung ist. Um den Versatz zu korrigieren, wurde die im jeweiligen Flugabschnitt gemittelte Differenz zu der aus ECMWF-Daten berechneten Höhe addiert.

Am Ende des Hinflugs erfolgte ein Abstieg aus dem Flugniveau von 16,8 km bis auf ca. 14 km mit unmittelbar folgendem Aufstieg. Durch dieses Flugmanöver konnten in-situ-Geräte eine Vertikalverteilung der Spurengase messen (siehe Vergleich z.B. bei Ozon, Kap. 4.2.4). Auf dem Rückweg wurde auf einer Höhe von bis zu 19,4 km geflogen.

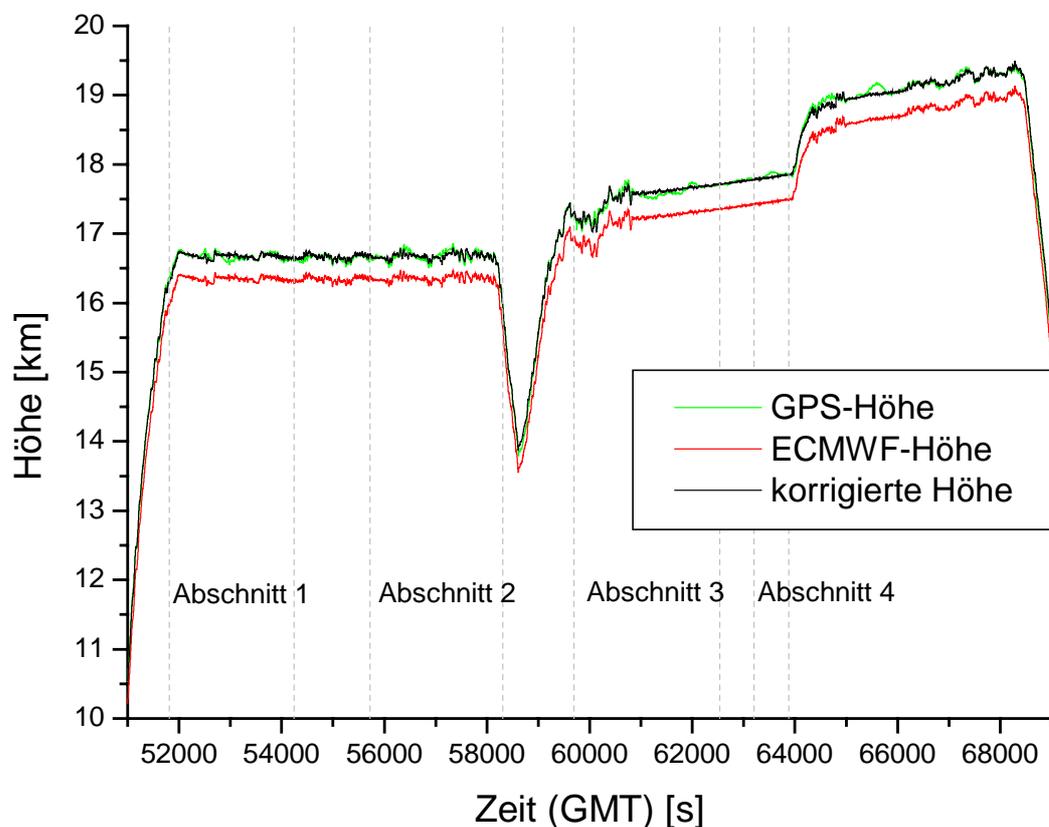


Abb. 3.2 Verlauf der Flughöhe mit der Zeit

¹⁵ Global Positioning System

¹⁶ European Center for Mediumrange Weather Forecast

4 Berechnung der Vertikalprofile und Darstellung der Ergebnisse

4.1 Strahlungsübertragungs- und Inversionsrechnung mit KOPRA und KOPRAFIT

Die Ableitung der Profile erfolgt mit KOPRAFIT, einer Erweiterung von KOPRA zur Inversionsrechnung. KOPRA ist ein schneller Linie-für-Linie Algorithmus, der unter Berücksichtigung des Zustands der Atmosphäre die Strahlungsübertragung in der Atmosphäre modelliert und Spektren im IR-Bereich berechnet. Neben den physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre werden auch Eigenschaften des Messgeräts berücksichtigt. KOPRA wurde für die Auswertung von Daten hochauflösender Interferometer, wie die MIPAS-Instrumente, ausgelegt. Parallel zur Vorwärtsrechnung können neben den Spektren selbst deren Ableitungen nach atmosphärischen Parametern und Geräteeigenschaften berechnet werden [Stiller et al., 1998]. Unter Verwendung dieser Ableitungen und basierend auf KOPRA wurde das Inversionsprogramm KOPRAFIT entwickelt. Es ist in der Lage, das Fitten für alle Horizont- und Aufwärtssondierungen einer Sequenz (siehe Abb. 2.4) in vielen unterschiedlichen Spektralbereichen parallel durchzuführen.

Bevor die Profilberechnungen aus den MIPAS-STR-Messungen mit KOPRAFIT erfolgen können, wird als erster Schritt eine Berechnung der Strahlungsübertragung durchgeführt. Dafür werden bestimmte Eingaben benötigt. Geographische Länge und Breite sowie die Flughöhe wurden während des Flugs fortlaufend gemessen. Aus der korrigierten Höhe (siehe Kapitel 3) und den vorgegebenen Elevationswinkeln wird die Lage der Tangentenpunkte berechnet (siehe auch Abb. 3.1). Weiterhin muss der Zustand der Atmosphäre durch Startprofile von Temperatur, Druck und Volumenmischungsverhältnis von Spurengasen beschrieben werden. Für die Startprofile der Gase wurden Profile aus mittleren Breiten eingesetzt. Druck- und Temperaturfeld wurden aus ECMWF-Daten auf das zum Fitten verwendete Höhengitter interpoliert. Oberhalb des Flugzeugs wurde das Profil an der Flugzeugposition verwendet und unterhalb der untersten Tangentenhöhe (in ca. 8 km Höhe) das Profil am Ort des Tangentenpunkts. Dazwischen wurden die auf die Tangentenpunkte interpolierten Werte von Druck und Temperatur eingesetzt. Das Maximum der Beitragsfunktion jedes Spektrums liegt in der Schicht direkt oberhalb des zugehörigen Tangentenpunkts und die Emission dieser Schicht hängt von ihrer Temperatur ab. Diese kann sich aber bei einem horizontalen Abstand von etwa 250 km zwischen Tangentenpunkt und Flugzeugposition und großem Temperaturgradienten, wie z.B. am Vortexrand, entscheidend ändern. Deshalb ist die beschriebene Vorgehensweise genauer als das Vertikalprofil am Ort des Flugzeugs zu verwenden. Die mit diesen Eingaben errechneten Temperaturprofile wurden dann in den folgenden Inversionsrechnungen für die Spurengase als Startprofile verwendet.

Um den Einfluss des Geräts in den simulierten Spektren zu berücksichtigen, werden die vertikale Gewichtsfunktion des FOV (siehe Kapitel 2.2) und eine idealisierte ILS¹⁷ verwendet. Für die ILS-Berechnung wurde eine runde Blende mit internem Öffnungswinkel von 0,36° angenommen. Außerdem wurden die Spektren apodisiert (Norton-Beer, strong), [Norton, Beer; 1976].

Die Vertikalprofile werden in einem iterativen Verfahren durch Angleichung der berechneten an die gemessenen Spektren bestimmt. Dazu müssen spektrale Bereiche gewählt werden, die Emissionsbanden der Gase enthalten. Für diese Auswertefenster¹⁸ werden aus den kalibrierten Spektren die Werte an den spektralen Stützstellen für jede Tangentenhöhe extrahiert und in Messvektoren zusammengefasst. Diese werden mit den Vektoren verglichen, welche die entsprechenden Daten aus der Vorwärtsrechnung enthalten. Für die Inversionsrechnung stehen verschiedene Retrieval-Methoden zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde die Tikhonov-Philips-Regularisierung [Tikhonov, 1963; Phillips, 1962] in der folgenden Form verwendet:

$$x_{i+1} = x_i + (\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K}_i + \gamma \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} [\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} (y - F(x_i)) - \gamma \mathbf{L}^T \mathbf{L} (x_a - x_i)]$$

mit

- i: Index der Iteration
- x: Vektor mit den Retrievalgrößen
- K**: Matrix mit den Ableitungen
- S_y**: Kovarianzmatrix der Messung
- y: Vektor mit dem gemessenen Spektrum
- F: Vorwärtsmodell
- γ: Regularisierungsparameter
- L**: Regularisierungsoperator der ersten Ableitung
- x_a: Vektor mit den gesetzten Startwerten

Mit dieser Methode der Regularisierung wird das berechnete Profil an die Form des Startprofils angeglichen und zwar abhängig davon, wie groß der Regularisierungsparameter γ gewählt wurde. Eine Regularisierung ist nötig, weil die Gitterpunkte zur Berechnung des Profils mit 0,5 km Abstand dichter liegen als die Tangentenpunkte und das Gleichungssystem somit unterbestimmt ist. Der Parameter γ wurde gerade so groß gewählt, dass keine Schwankungen im Profil aufgrund des Rauschens in der Messung auftreten, aber so klein wie möglich, um die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Spektrum gering zu halten [Höpfner et al., 2000b]. Die Werte für γ wurden mit Hilfe von Test-Retrievals mit simulierten und gemessenen Spektren ausgewählt.

¹⁷ von engl.: instrumental line shape

¹⁸ Die Auswertefenster werden in Kapitel 4.2 für Temperatur und entsprechende Gase einzeln aufgeführt und mit einer Beispielabbildung veranschaulicht.

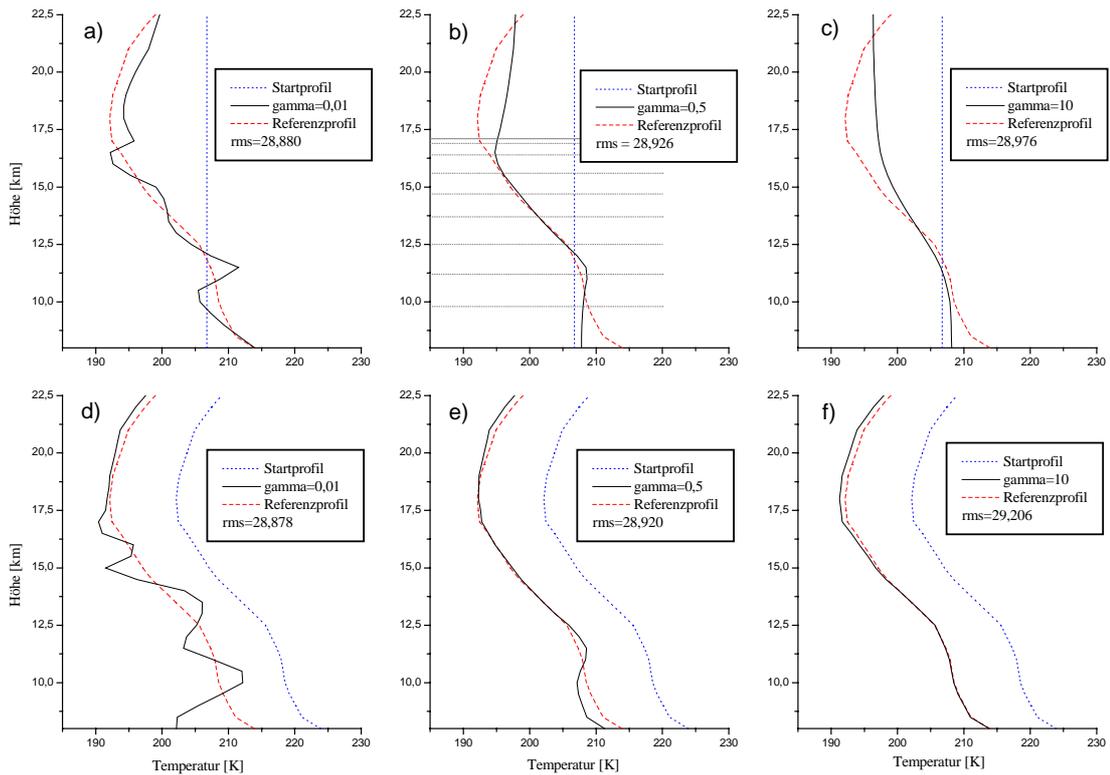


Abb. 4.1 Übersicht von Inversionsrechnungen zur Temperatur mit drei verschiedenen starken Regularisierungen und zwei verschiedenen Startprofilen

Abb. 4.1 soll veranschaulichen, wie sich eine unterschiedlich stark gewählte Regularisierung bzw. das gewählte Startprofil auf das abgeleitete Temperaturprofil auswirkt. In den Graphen sind jeweils Referenz- (gestrichelt), Start- (gepunktet) und gefittetes Temperaturprofil (durchgezogen) aufgetragen. In der oberen Reihe wurde ein höhenkonstantes Startprofil verwendet. In der unteren Reihe wurden für das Startprofil 10 K zum Referenzprofil addiert. Die Werte der Regularisierung sind in zwei Abbildungen untereinander gleich und nehmen von links nach rechts zu. In Figur b) sind die Flughöhe als durchgezogene Linie und die Tangentenhöhen als gestrichelte Linien eingezeichnet.

Für die Testrechnungen wurde mit dem Referenzprofil eine Vorwärtsrechnung gemacht und die Spektren mit $50 \text{ nW/cm}^2 \text{ sr cm}^{-1}$ verrauscht. So wurden Messungen einer Sequenz mit 12 verschiedenen Elevationswinkeln simuliert, mit denen dann die Inversionsrechnungen durchgeführt wurden.

Bei zu schwacher Regularisierung schwankt das Profil hin und her. Das geschieht wegen der Unterbestimmtheit des Systems und wegen des Rauschens, dessen Auswirkung durch die Unterbestimmtheit verstärkt wird (siehe Abb. 4.1a und d). Bei zu groß gewähltem γ wird das Profil stark an die Form des Startprofils angepasst, auch wenn Informationen über seine Form in den Messungen vorhanden sind. Das Angleichen ist vor allem unterhalb der untersten Tangentenhöhe und oberhalb des Flugzeugs zu sehen (siehe Abb. 4.1c), wo keine oder wenig Profilinformatoren vorhanden sind. Durch eine stark gewählte Regularisierung wie in Abb. 4.1f wird das Profil sehr stark an das vorgegebene Profil angepasst, und der Wert der rms (engl.: *root*

mean square) steigt deutlich an. Aber man kann in der Regel nicht davon ausgehen, dass die Form des Profils so gut bekannt ist. Abb. 4.1b zeigt, dass trotz eines extremen Verlaufs des Startprofils die Spektren genug Information enthalten, um bei geeignet gewählter Regularisierung die tatsächliche Form des Profils wiederzugeben. Es sollte ein möglichst genaues Startprofil vor allem für die Temperatur gewählt werden (wie in Abb. 4.1e), da das berechnete Profil in den o.g. Bereichen dann wirklichkeitsnäher wird. Am 23.09.99 wurden Sequenzen mit 14 Beobachtungswinkeln gemessen. Wegen des störenden Einflusses von Wolken in den beiden unteren Tangentenhöhen wurden die entsprechenden Spektren durchgehend nicht berücksichtigt. In einigen Sequenzen sind einzelne fehlerhafte, nicht korrigierbare Spektren enthalten, die ebenfalls nicht in die Inversionsrechnung eingehen. Die verbleibenden Spektren enthalten noch genug Information, um das Profil berechnen zu können.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten dargestellt und interpretiert. Die bei den Berechnungen der Profile von Temperatur und Spurengasen verwendeten Eingaben, wie z.B. der Regularisierungsparameter, werden bei der Darstellung der jeweiligen Ergebnisse aufgeführt.

4.2 Ergebnisse und Vergleiche mit anderen Messungen

4.2.1 Temperatur

4.2.1.1 Eingaben für die Profilberechnung

Zum Berechnen der Temperaturprofile wurden spektrale Auswertefenster mit CO₂-Linien gewählt. Das ist die gängige Vorgehensweise, weil CO₂ ein bekanntes Profil aufweist und die in den entsprechenden spektralen Bereichen gemessene Emission hauptsächlich durch Temperaturänderungen beeinflusst wird. Um möglichst gute Eingabewerte für die Inversionsrechnung der Temperatur zu erhalten, wurden zunächst Test-Rechnungen unter verschiedenen Bedingungen sowohl mit simulierten¹⁹ als auch mit realen Messungen durchgeführt. Es wurden die spektralen Auswertefenster (siehe Tab. 4.1) und die Stärke der Regularisierung variiert.

Auswertefenster [cm ⁻¹]	779,5 – 781,0 802,9 – 803,5 804,2 – 805,2 806,0 – 806,8 807,4 – 808,2 810,4 – 811,4 812,0 – 813,0 815,0 – 816,0 941,5 – 945,0 950,5 – 952,0 952,0 – 953,5 954,0 – 957,0
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	Temperatur, $\gamma_T = 0,3$ vmr _{ClONO₂} , $\gamma_{ClONO_2} = 5 \times 10^7$ vmr _{O₃} , $\gamma_{O_3} = 5$ vmr _{H₂O} , $\gamma_{H_2O} = 0,01$ Shift (nicht regularisiert) Offset (nicht regularisiert)

Tab. 4.1 Parameter für die Berechnung der Temperaturprofile

¹⁹ siehe Abschnitt 4.1

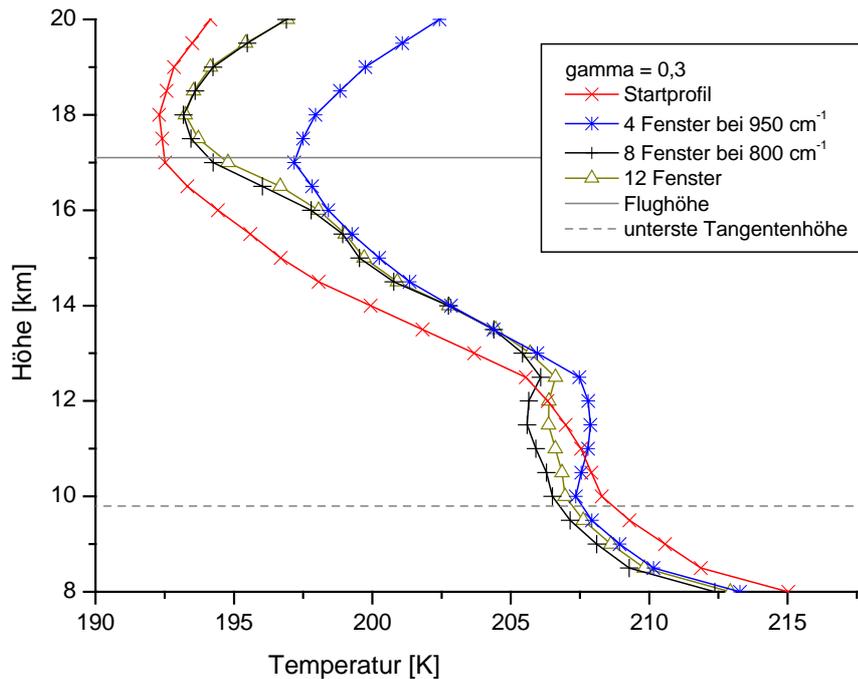


Abb. 4.2 Abgeleitete Temperaturprofile am 23.09.1999 bei 67,5 °S und 59,1°W

Abb. 4.2 zeigt an einem Beispiel die Ergebnisse bei unterschiedlich gewählten Auswertefenstern. Es wurden Rechnungen mit vier Fenstern in der Laserbande zwischen 941 cm^{-1} und 957 cm^{-1} durchgeführt. In einem zweiten Testlauf wurden acht Fenster gewählt, davon sieben im Wellenzahlbereich von ca. 802 cm^{-1} bis 816 cm^{-1} und eins um 780 cm^{-1} wegen des Einflusses von ClONO_2 auf den vorher genannten Wellenzahlbereich. Die berechneten Temperaturen weichen bis zu 5 K voneinander ab. Ursachen hierfür können Wolken unterhalb von 12 km sein, welche die Messung beeinflussen oder systematische Fehler aufgrund der Kalibrierung oder Liniendaten. Bei der endgültigen Berechnung der Temperaturprofile wurden alle zwölf Fenster zum Fitten verwendet.

In Abb. 4.3 sind Beispiele für die Verteilung der Strahldichten einzelner Spektralbereiche in zwei Tangentenhöhen dargestellt. Die durchgezogene Kurve ist das gemessene Spektrum, die gestrichelte Kurve das berechnete. Die Abbildung enthält außerdem die Differenz der beiden Kurven (gepunktet), aus der die rms berechnet wird. Die Linien im dargestellten dritten Wellenzahlbereich sind stärker als die im neunten, deshalb ist das S/N^{20} im dritten größer. Bei Betrachtung der beiden Tangentenhöhen wird die Abnahme der Stärke der Linien mit der Höhe deutlich. Da das vmr von CO_2 in diesem Höhenbereich konstant ist, wird aus der Abbildung direkt die Abnahme des Drucks und der Temperatur ersichtlich.

Der Regularisierungsparameter γ_T wurde auf 0,3 gesetzt. Außerdem wurden ClONO_2 , Ozon und Wasser mitgefittet, und zwar mit den Regularisierungen von $\gamma_{\text{ClONO}_2} = 5 \times 10^7$, $\gamma_{\text{Ozon}} = 5$ und $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$.

²⁰ Verhältnis von gemessenem Spektrum zum Rauschen, das sog. Signal/Rausch-Verhältnis

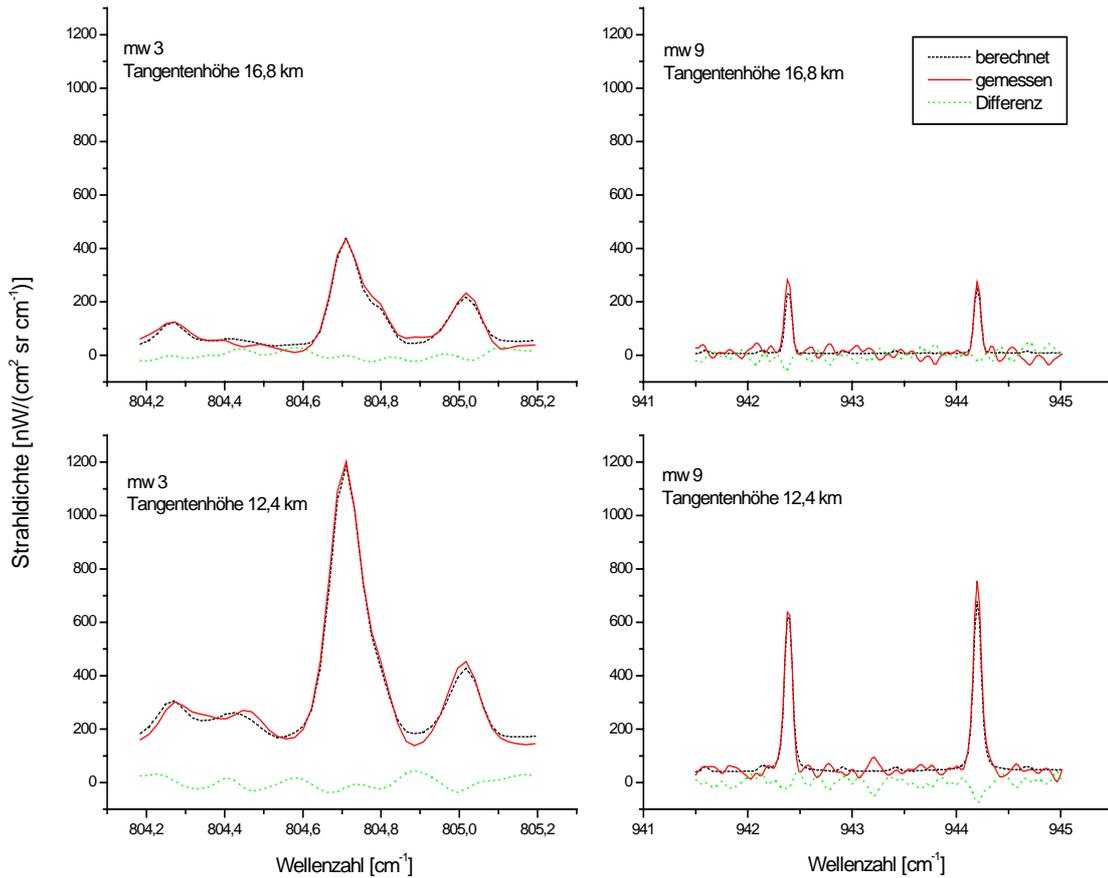


Abb. 4.3 Vergleich der gemessenen und berechneten Strahldichten für das dritte und neunte Auswertefenster der Temperatur in zwei Tangentenhöhen²¹

4.2.1.2 Fehlerabschätzung

Aus dem spektralen Rauschen resultiert ein statistischer Fehler. Durch die folgende Gleichung wird das Rauschen in der Messung in ein Rauschen des Profils transformiert:

$$\mathbf{S}_x = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \gamma \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \gamma \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1}$$

- mit
- \mathbf{S}_x : Kovarianzmatrix des Profils
 - \mathbf{K} : Matrix mit den Ableitungen
 - \mathbf{S}_y : Kovarianzmatrix des Rauschens
 - γ : Regularisierungsparameter
 - \mathbf{L} : Regularisierungsoperator der ersten Ableitung

Im Höhenabschnitt der Messung liegt er zwischen 0,5 und 1 K liegt (siehe Fehlerbalken in Abb. 4.4). Obwohl in Abb. 4.4 im Abstand von 500 m ein Fehlerbalken eingezeichnet ist, muss beachtet werden, dass sich der Fehler eigentlich auf Höhenbereiche bezieht,

²¹ Die hier und bei den Gasen dargestellten spektralen Strahldichten gelten für die Messungen bzw. Berechnung des entsprechenden Profils bei 67,5°S und 59,1°W am 23.09.1999

die der vertikalen Auflösung des Instruments entsprechen. Das bedeutet, dass der Fehler durch die endliche Auflösung („Null-space-error“) nicht berücksichtigt wird.

Eine wichtige Fehlerquelle geht aus der Kalibrierung hervor. Dieser Fehler setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Ein Teil ist ein systematischer Fehler in der für die Flugabschnitte gemittelten Gainfunktion, der für alle Sequenzen gleich ist. Er ist u.a. auf Nichtlinearitäten des Detektors oder auf die Korrektur des Weltraumspektrums zurückzuführen. Der Fehler ist sehr schwer abzuschätzen, er beträgt aber wahrscheinlich nur wenige Prozente. Ein zweiter Beitrag zum Kalibrierungsfehler ist statistischer Natur. Dieser kann sich zwischen den einzelnen Spektren ändern und entsteht z.B. durch Vibrationen des Flugzeugs. Er ist anhand der Variabilität des Gains (siehe Abschnitt 2.4) auf einen mittleren Wert von 5% abgeschätzt worden. Um diesen Fehler zu berücksichtigen, wurde eine Testrechnung mit entsprechend geänderter Gainfunktion durchgeführt. Daraus ergibt sich ein Temperaturfehler von 1-2 K im Bereich oberhalb der Tropopause [Höpfner et al., 2000b].

Weitere Fehler ergeben sich aus den verwendeten Liniendaten. Eine relative Abweichung von 3-5% in der Linienintensität [von Clarmann et al., 1998] wirkt sich mit 1,2-2 K auf die Temperatur aus. Andere Fehlerquellen können sein: Annahme von LTE²² (vernachlässigbar für die hier verwendeten Geometrien, Bernd Funke, persönliche Mitteilung), die ungenaue Kenntnis der LOS (Corneli Keim, persönliche Mitteilung) und horizontale Inhomogenitäten im Temperaturfeld (beide hier nicht berücksichtigt).

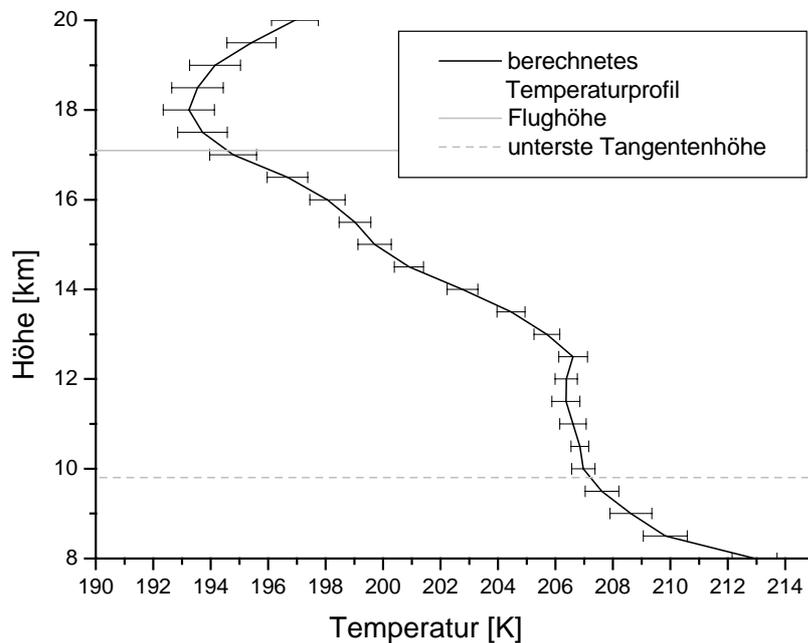


Abb. 4.4 Temperaturprofil von MIPAS mit Fehlerbalken bei 67,5°S und 59,1°W am 23.09.1999

²² engl: Local Thermodynamic Equilibrium

4.2.1.3 Die zweidimensionale Verteilung der Temperatur

In Abb. 4.5 sind die aus ECMWF-Daten interpolierten Startwerte und in Abb. 4.6 die berechneten Temperaturen zweidimensional aufgetragen²³. In den beiden Abbildungen kennzeichnet jedes Kreuz die Flughöhe während der Messung einer Sequenz, steht also jeweils für den Ort eines Profils. Die zweidimensionalen Verteilungen wurden durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Profilen abgeleitet. Die Flugabschnitte sind von links nach rechts in zeitlicher Abfolge angeordnet. Die ersten beiden Abschnitte betreffen die Messungen des Hinflugs, drei und vier die des Rückflugs. Die Flugrichtung änderte sich bei $5,96 \times 10^4$ s (Kapitel 3). Es ist deshalb zu beachten, dass die Abschnitte zwei und drei nicht direkt zueinander gespiegelt sind.

In beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, wie die Temperaturen mit zunehmender südlicher Breite abnehmen. Im südlichsten Teil des Flugs liegt zwischen 16 km und 20 km Höhe ein lokales Minimum mit einer Temperatur von 194 K. Die glatten Konturen in Abb. 4.5 sind darauf zurückzuführen, dass die räumliche Auflösung der ECMWF-Daten sehr niedrig ist.

In Abb. 4.6 ist die Lage der Extremwerte ähnlich wie die der ECMWF-Werte, weist aber leichte Abweichungen in der räumlichen Verteilung auf. Das Minimum der MIPAS-STR-Daten hat eine kleinere Ausdehnung und weist außerdem Einschnitte auf. Da diese Daten höher aufgelöst sind, ergibt sich deshalb und wegen des Rauschens (siehe Kapitel 4.1) insgesamt eine unruhigere Struktur. Berücksichtigt man die Fehler durch eine ungenaue Kalibrierung und das Rauschen, so liegen einige kleinräumige Strukturen im Bereich der Fehler.

²³ Die Temperatur ist ausnahmsweise gegen die Zeit aufgetragen, um bei dem Vergleich eine bessere Übersicht zu haben.

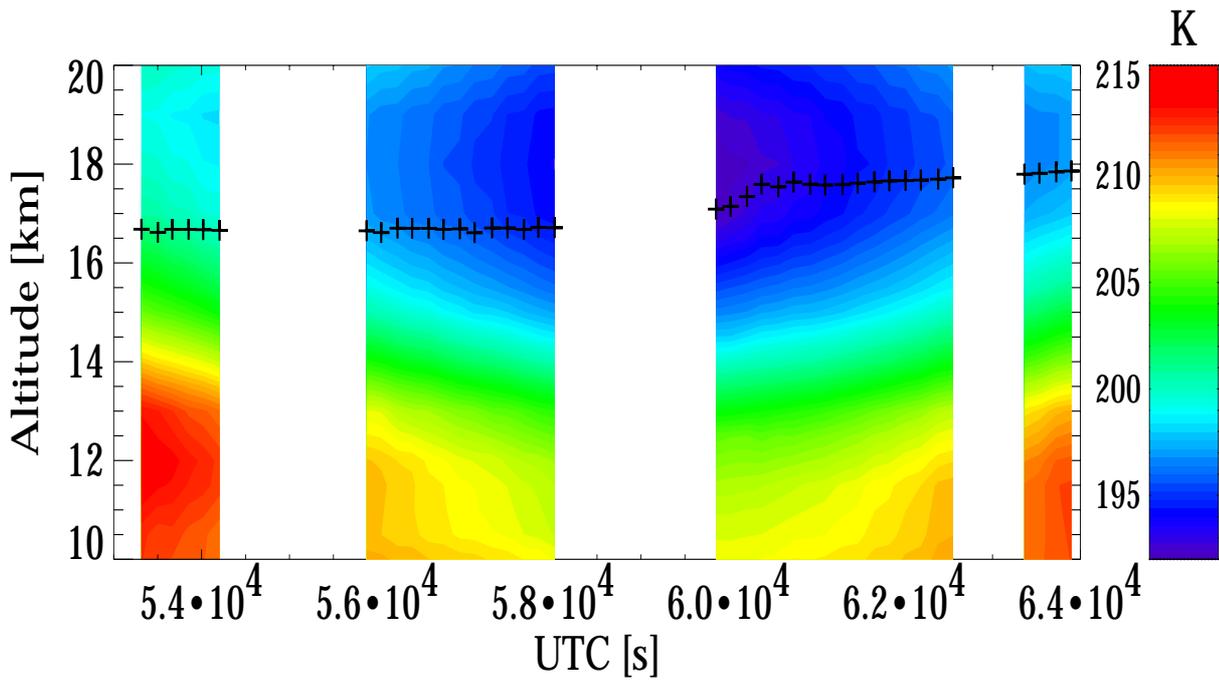


Abb. 4.5 Zweidimensionale Verteilung der Temperaturstartwerte (ECMWF) und die Flughöhe am 23.09.99

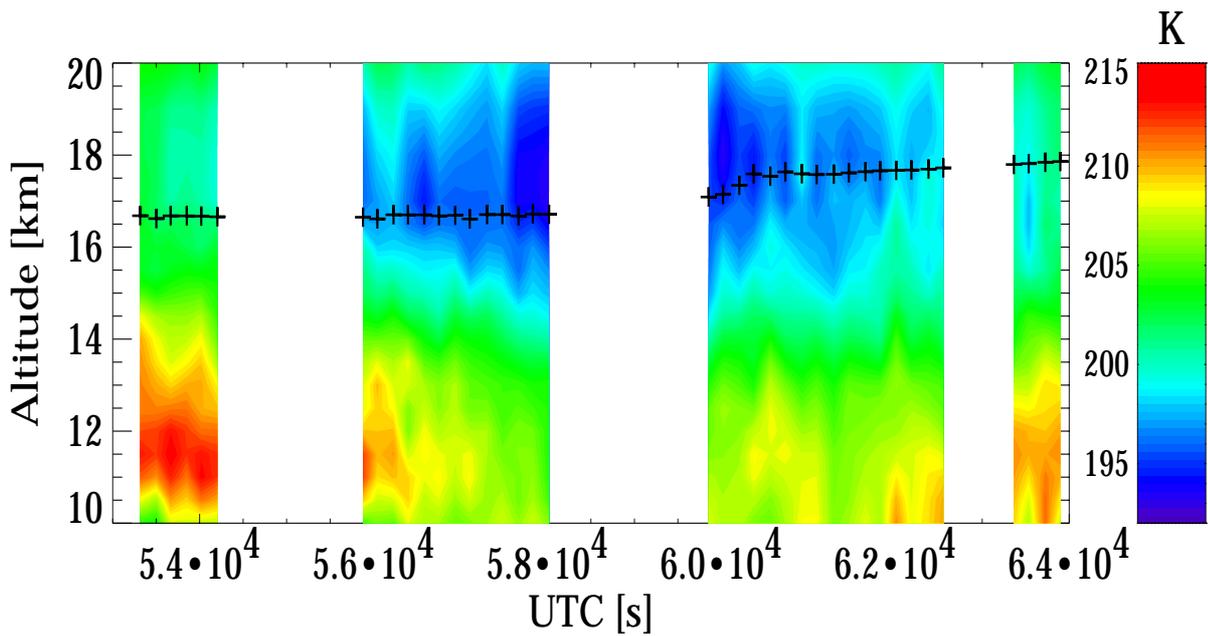


Abb. 4.6 Berechnete zweidimensionale Verteilung der Temperatur und die Flughöhe am 23.09.99

Zur Veranschaulichung der Abweichungen zeigt die Abb. 4.7 ein ECMWF- und ein berechnetes Profil sowie die Differenz. Oberhalb von 12 km ist die berechnete Temperatur bis zu 3,5 K wärmer als die ECMWF-Temperatur. Da diese Abweichung oberhalb von 13 km systematisch ist, scheidet der Rauschfehler als Ursache aus. Auch ein Fehler aufgrund der Kalibrierung ist unwahrscheinlich, weil dieser eher zwischen den Sequenzen (siehe Abschnitt 2.3) schwankt, die Temperaturabweichung aber systematisch im gesamten Bereich ist.

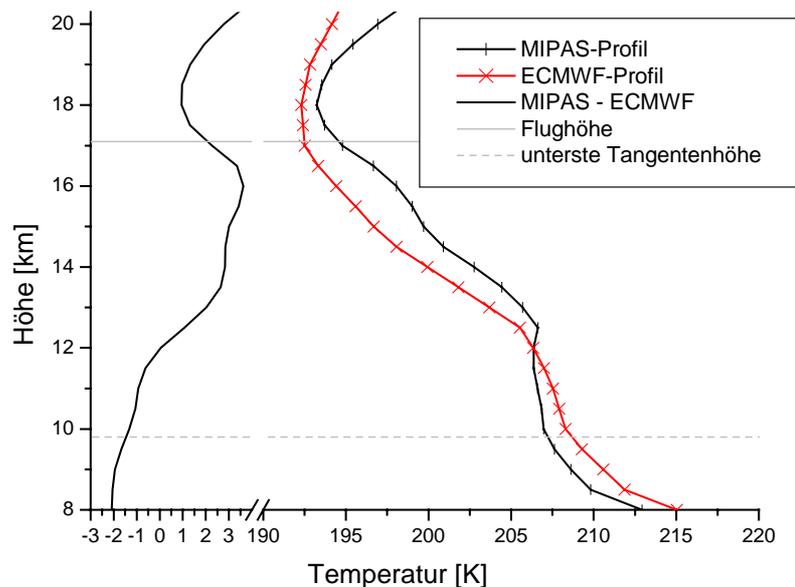


Abb. 4.7 Temperaturprofile von MIPAS-STR und aus ECMWF-Daten bei 67,5°S und 59,1°W sowie die Differenz

Wenn man die Temperaturen aus ECMWF-Daten, MIPAS- und in-situ-Messungen auf Flugniveau und anderen Höhen vergleicht, wird diese systematische Abweichung deutlich. In Abb. 4.8 sind in der Grafik oben links die Temperaturen aus ECMWF- sowie MIPAS-STR-Daten und in-situ-Messungen direkt am Flugzeug aufgetragen. In den anderen Grafiken sind die auf die Höhen 15, 13 und 11 km interpolierten Temperaturen aus ECMWF- und berechnetem Profil enthalten. In Flughöhe wird im dritten und vierten Flugabschnitt eine systematische Differenz der Temperatur um ca. +2,5 K von ECMWF- zu MIPAS-Werten deutlich. Die in-situ-Messungen zeigen in diesen Abschnitten ebenfalls höhere Temperaturen. Diese Tendenz ist in anderen Flugabschnitten auch erkennbar, jedoch zu geringeren Höhen hin immer weniger ausgeprägt. In dem Vergleich für 11 km Höhe hat sich die Differenz umgekehrt: in allen Abschnitten ist die berechnete Temperatur kälter als die aus ECMWF-Daten interpolierte. Mögliche Ursachen sind Wolken in Höhe der unteren Tangentepunkte, unterschiedliche Gradienten entlang des Sehstrahls bei Hin- und Rückflug, welche in der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

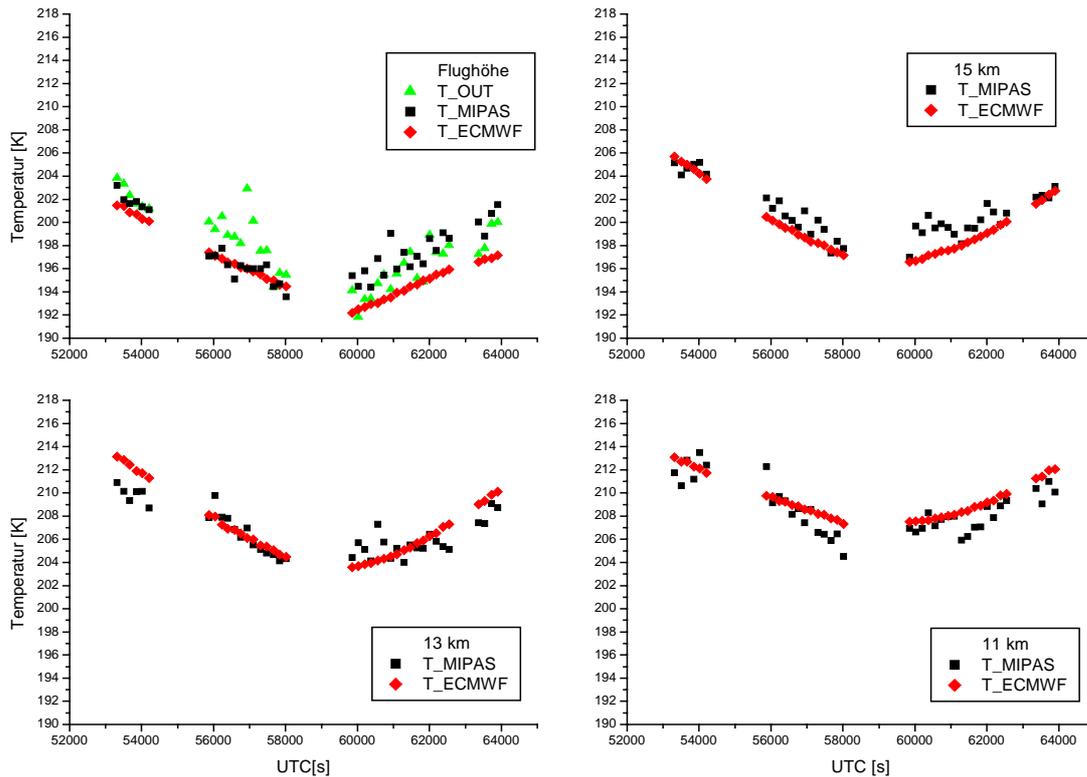


Abb. 4.8 Vergleich der Temperaturen von MIPAS (T_{MIPAS}) und aus ECMWF-Daten (T_{ECMWF}) in verschiedenen Höhen. Die in-situ gemessene Temperatur in der Flughöhe ist zusätzlich eingetragen

Eine weitere Möglichkeit für Vergleiche liefern die Temperaturmessungen von Sonden in Nähe der Flugroute. Am 23.09. wurden zwei in Frage kommende Sonden gestartet: die des Finish Meteorological Institute (FMI) von Marambio ($63,2^{\circ}S$ $56,7^{\circ}W$, Start 17:10 UTC) und die des British Antarctic Survey (BAS) von Rothera ($67,6^{\circ}S$ $68,1^{\circ}W$, Start 15:02 UTC). Die Temperaturprofile dieser Sondaufstiege wurden mit Profilen aus MIPAS-Messungen zusammen aufgetragen (siehe Abb. 4.9). Dafür wurden Profile ausgewählt, deren Tangentenpunkte im Bereich des Startorts der Sonden liegen. Außerdem enthalten beide Figuren ein Temperaturprofil, dass aus ECMWF-Daten auf den Sondenstartort interpoliert wurde.

Im direkten Vergleich von Rothera ist die berechnete Temperatur bis in 14,5 km Höhe kälter als die Sondentemperatur, im anschließenden Bereich bis 16 km dann wärmer. Die ECMWF- Temperaturen sind bis 12 km zunächst wärmer, dann kälter und zwischen 15 und 16 km Höhe wieder wärmer als die der Sonde.

Im Fall von Marmabio liegt die ECMWF-Temperatur bis in 12 km Höhe im Bereich der Sondentemperatur, darüber ist sie dann durchgehend kälter. Beide MIPAS-Profile liefern bis 14,5 km Höhe gute Übereinstimmung mit der Sonde, sind im Abschnitt zwischen 14,5 und 17,5 km dann wärmer, und liegen ab 17,5 km Höhe wieder dicht bei der Sondentemperatur.

Die MIPAS-Messungen können kleinräumige Schwankungen wie sie aus dem Temperaturprofil einer Sonde hervorgehen nicht auflösen (wie die mit geringerer Auflösung zur Verfügung stehenden ECMWF-Daten auch nicht). Die Sonde liefert aber nur ein

einziges Vertikalprofil. Hier wird deutlich, dass die MIPAS-STR-Messungen eine Art Zwischenschritt von der großen räumlichen Überdeckung der Satelliten-Daten zu den vertikal hochaufgelösten Sondenprofilen bilden.

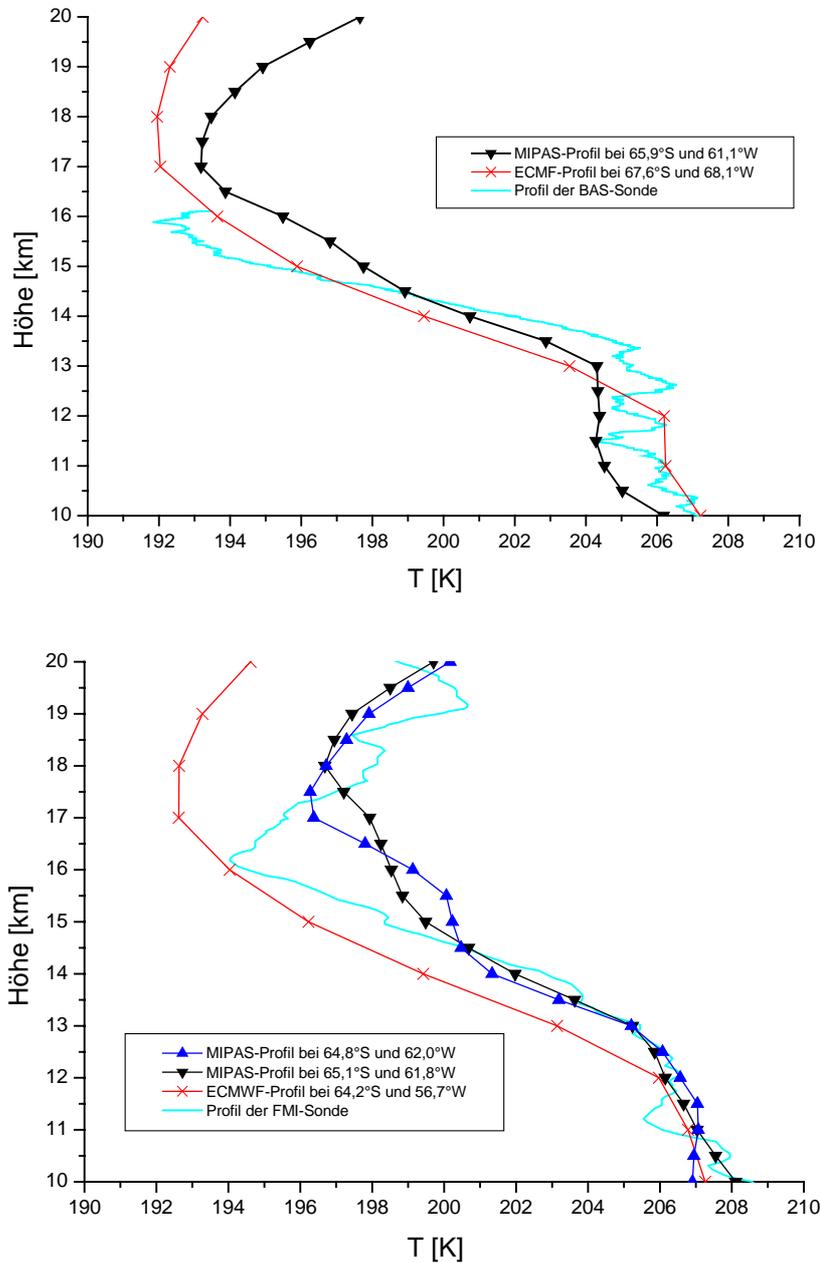


Abb. 4.9 Vergleich von ausgewählten Temperaturprofilen der MIPAS-Messungen mit Temperaturen von Sonden (oben: Rothera, unten: Marambio)

Ein direkter Vergleich (wie z.B. bei Start- und berechnetem Profil) mit dem MIPAS-Profil ist hier eigentlich nicht möglich, da die Messungen zum einen nicht direkt am Ort und auch nicht zur selben Zeit durchgeführt wurden. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Sonde mit dem Wind driftet. Dadurch ergeben sich auf jeden Fall Unterschiede zwischen den Profilen.

Für die Berechnung der Spurengasprofile sollte der Zustand der Atmosphäre möglichst genau bekannt sein, da die Emission der einzelnen Gase temperaturabhängig ist. U.a. wegen derselben Messgeometrie werden die berechneten MIPAS-Temperaturverteilungen den folgenden Berechnungen der vmr-Profile zugrunde gelegt.

4.2.2 HNO₃

4.2.2.1 Eingaben für die Profilberechnung

Für die Inversionsrechnung von Salpetersäure wurden drei Auswertefenster (siehe Tab. 4.2) im Bereich zwischen 866 cm⁻¹ und 874 cm⁻¹ gewählt. Der Bereich der Wasserlinie bei 871 cm⁻¹ wurde ausgespart. Abb. 4.10 zeigt Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten spektralen Strahldichten. Für die Stärke der Regularisierung wurde ein Wert von 10⁶ eingesetzt.

Auswertefenster [cm ⁻¹]	866,0 – 868,0
	868,0 – 870,5
	872,0 – 874,0
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	HNO ₃ , $\gamma_{\text{HNO}_3} = 1 \times 10^6$ Shift (ohne Regularisierung) Offset (ohne Regularisierung)

Tab. 4.2 Parameter für die Profilberechnung von HNO₃

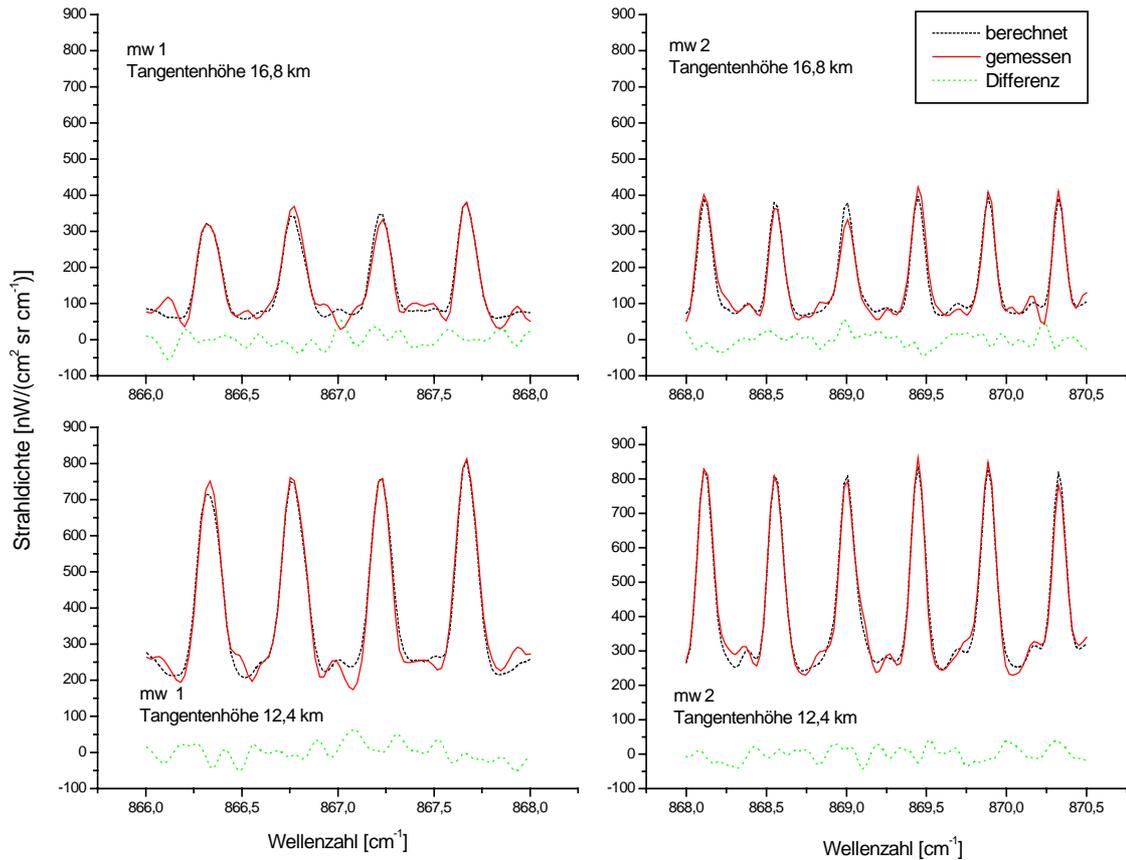


Abb. 4.10 Vergleich der gemessenen und berechneten Strahl-dichten für die ersten zwei Auswertefenster von HNO_3 in zwei Tangentenhöhen

4.2.2.2 Fehlerabschätzung

Aufgrund des spektralen Rauschens ergibt sich für HNO_3 ein statistischer Fehler, der unterhalb der Flughöhe bei ca. 10% liegt (siehe Fehlerbalken in der Abb. 4.11).

Der Fehler von 5% aus der Kalibrierung ist bei HNO_3 direkt proportional zum Fehler im vmr. Dies gilt auch für alle im Folgenden behandelten Spurengase, da diese in den ausgewerteten Spektralbereichen im wesentlichen optisch dünn sind. Es ist aber anzunehmen, dass die Auswirkung eines systematischen Kalibrierungsfehlers auf das vmr teilweise durch die Verwendung der aus den selben Spektren berechneten Temperatur kompensiert wird: Ein durch die Kalibrierung in der Intensität zu niedriges Spektrum führt zu systematisch niedrigen Temperaturen, weshalb das vmr einen größeren Wert haben muss, um die gleiche Linienstärke hervorzubringen.

Abb. 4.11 enthält zwei Profile des vmr von HNO_3 . Das mit Fehlerbalken versehene Profil wurde mit der berechneten Temperatur gefittet, das andere mit der aus ECMWF-Daten interpolierten. Damit lässt sich in diesem die Auswirkung des Temperaturfehlers veranschaulichen. Ab ca. 12 km Höhe wird die ECMWF-Temperatur bis zu 3,5 K kälter als die berechnete (siehe Abb. 4.7). Dadurch ergibt sich eine Differenz im vmr von fast 14% in 16 km Höhe, wo die Differenz der Temperaturen ihr Maximum hat.

Hinzu kommt noch ein möglicher Fehler aus den Liniendaten von ca. 10% [von Clarmann et al., 1998].

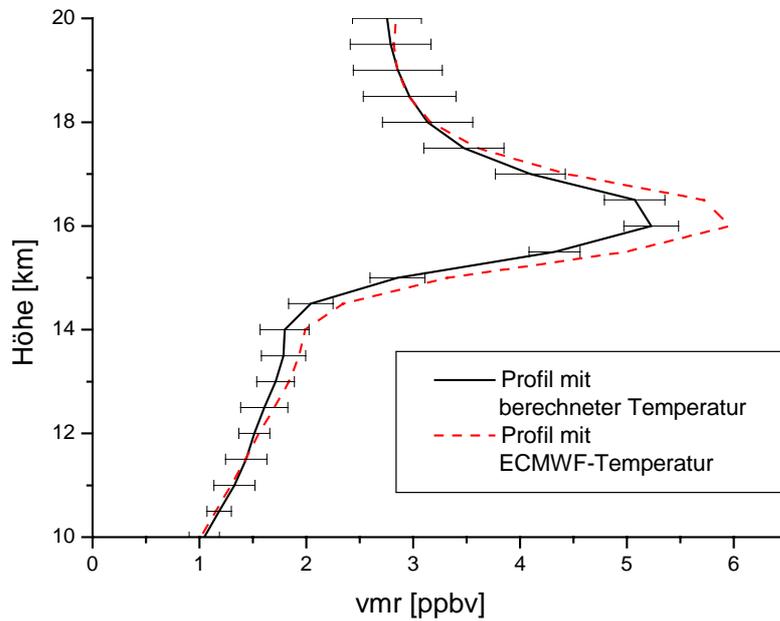


Abb. 4.11 vmr-Profile von HNO_3 bei $67,5^\circ\text{S}$ und $59,1^\circ\text{W}$

4.2.2.3 Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von HNO_3

Die Abb. 4.12 und Abb. 4.13 zeigen im ersten und vierten Abschnitt, dass das vmr von HNO_3 im gezeigten Höhenbereich mit der Höhe zunimmt, so wie auch im Startprofil (Standardprofil für mittlere Breiten). In den beiden südlichen Abschnitten bildet sich ein Maximum unterhalb von 17 km aus.

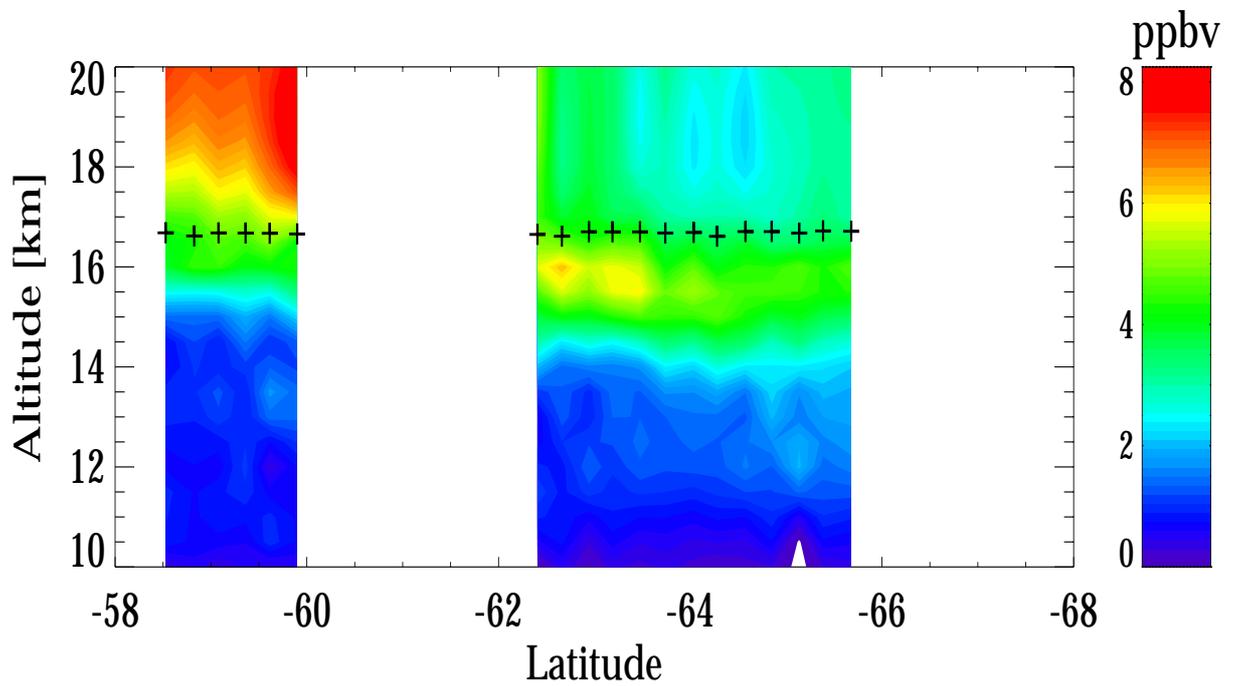


Abb. 4.12 Zweidimensionale Verteilung des HNO₃ und die Flughöhe am 23.09.99 (Hinflug)

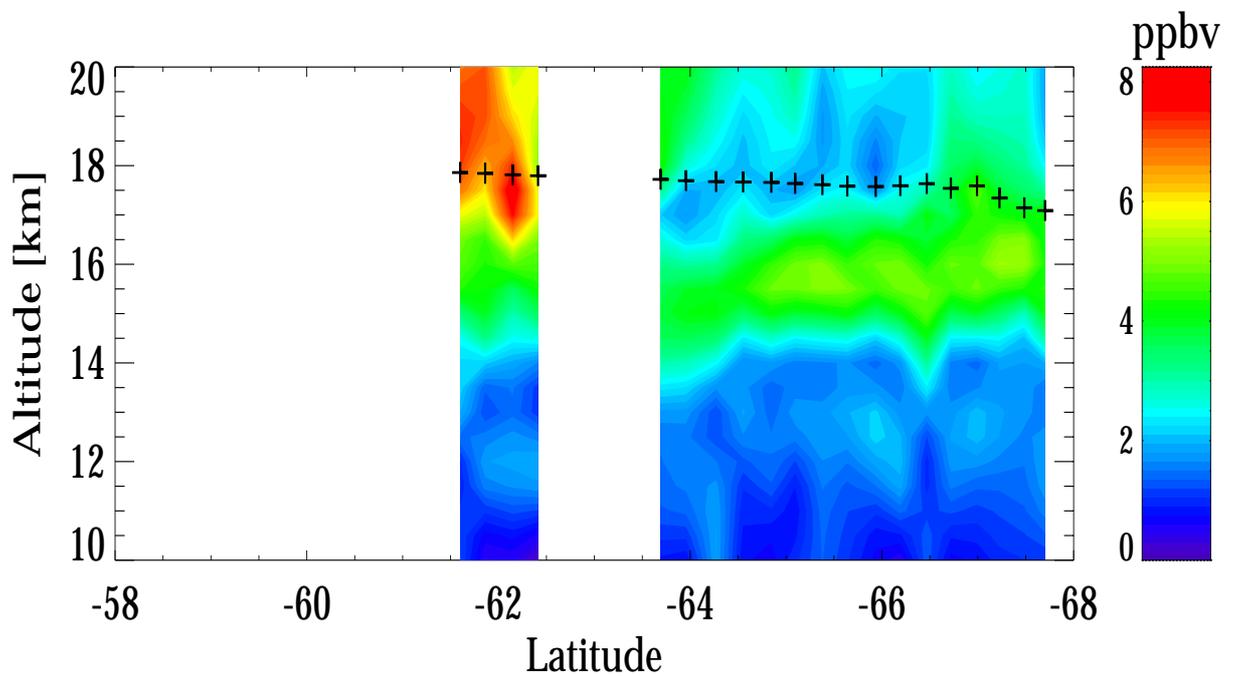


Abb. 4.13 Zweidimensionale Verteilung des HNO₃ und die Flughöhe am 23.09.99 (Rückflug)

Abb. 4.14 zeigt zwei ausgewählte Profile um diesen Zustand zu veranschaulichen. Die Konzentration oberhalb des Flugzeugs nimmt nach Süden stark ab. In den südlicheren Bereichen zwischen 63,5°S und 65°S auf dem Hinflug und 64,5°S und 66°S auf dem Rückflug liegt oberhalb der Flughöhe ein Minimum mit ca. 2 ppbv. Das entspricht einer Abnahme des Volumenmischungsverhältnisses um ca. 65%. Die Werte sind aber mit stärkeren Unsicherheiten behaftet als die im Bereich der Horizontsondierungen, da die Profile oberhalb des Flugniveaus aus den durch Aufwärtssondierung gewonnen Säulengehalten abgeleitet werden.

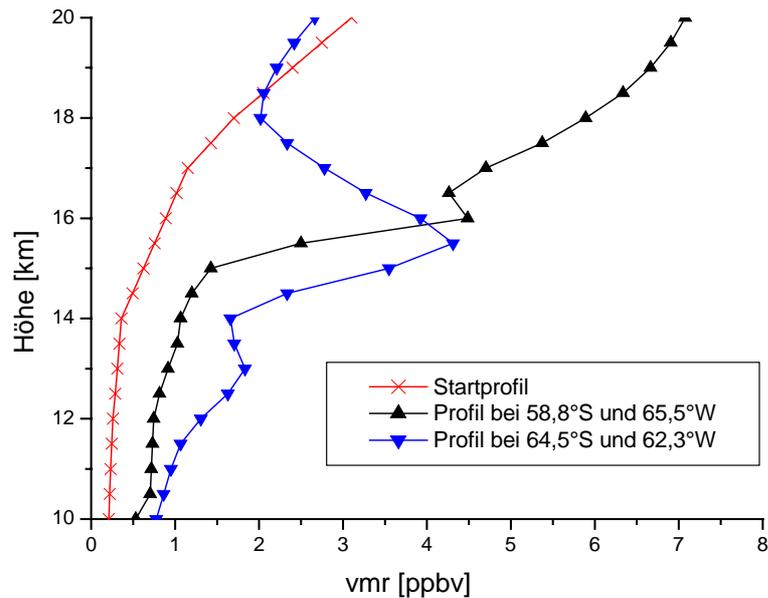


Abb. 4.14 HNO₃-Profile bei 58,8°S 65,5°W und bei 64,5°S 62,3°W, sowie das Startprofil

4.2.3 ClONO₂

4.2.3.1 Eingaben für die Profilberechnung

Chlornitrat ist ein Gas, das für die polare stratosphärische Ozonchemie von besonderem Interesse ist (siehe Abschnitt 5). Den durchgeführten Inversionsrechnungen wurde der spektrale Bereich zwischen 779,5 cm⁻¹ und 781 cm⁻¹ zugrunde gelegt (siehe Abb. 4.15). Für die Regularisierung wurde ein Wert von 10⁸ festgelegt (siehe Tab. 4.3). Aufgrund seiner schwachen Signatur und um den Einfluss von Ozon als Störgas im spektralen Auswertefenster gering zu halten, wurde das Ozon mit angepasst, und zwar mit einem Regularisierungsparameter von 5. Die spektroskopischen Daten sind die temperatur- und druckabhängigen Wirkungsquerschnitte von Birk et al. [M. Birk, private Mitteilung, 2000].

Auswertefenster [cm ⁻¹]	779,5 – 781,0
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	ClONO ₂ , $\gamma_{\text{ClONO}_2} = 1 \times 10^8$ O ₃ , $\gamma_{\text{O}_3} = 5$ Shift (nicht regularisiert) Offset (nicht regularisiert)

Tab. 4.3 Eingaben für die Profilberechnung von ClONO₂

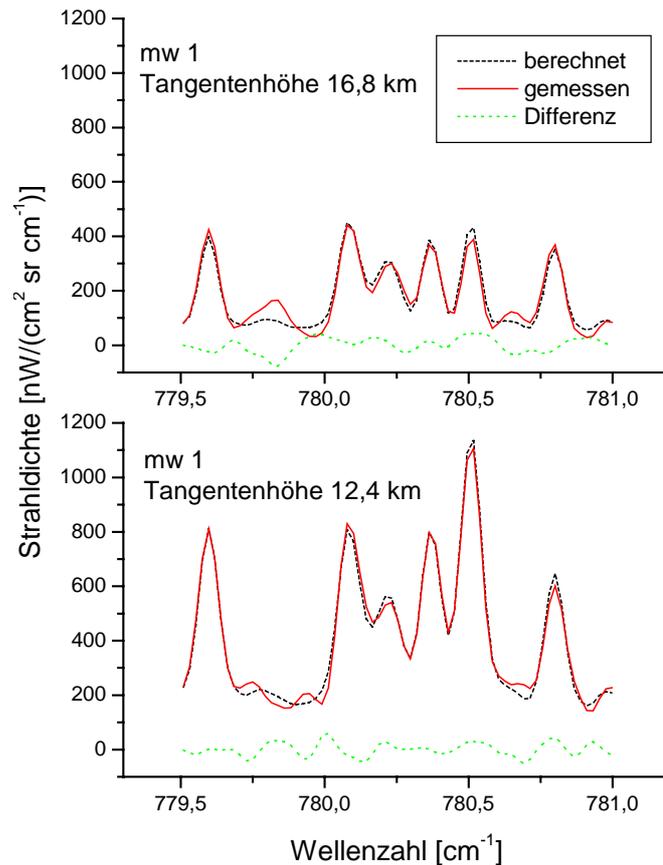


Abb. 4.15 Vergleich der gemessenen und berechneten Strahldichten für das Auswertefenster von ClONO₂ in zwei Tangentenhöhen (der Q-Zweig von ClONO₂ liegt bei 780,2 cm⁻¹, sonstige Linien sind Signaturen von O₃ und CO₂)

4.2.3.2 Fehlerabschätzung

An den Fehlerbalken in Abb. 4.16 ist zu erkennen, dass das Rauschen zu einem Fehler von bis zu 0,05 ppbv unterhalb des Flugniveaus führt.

Wie bereits erwähnt ist der Fehler von 5% aus der Skalierung direkt proportional zum Fehler des vmr von ClONO₂. Für die bisher verwendeten Absorptionsquerschnitte von Ballard wurde ein Fehler von 25% angenommen [von Clarmann et al., 1998]. Durch die Verwendung der neuen Wirkungsquerschnittsdaten von Birk et al. wird dieser aber geringer vermutet.

Anhand der Abb. 4.16 kann man erkennen, dass die Abweichung für das vmr aus der Temperaturdifferenz durchgehend noch im Bereich des Fehlers aus dem Rauschen liegt. Das gilt auch im Bereich oberhalb der Flughöhe, wo aus den Säulengehalten auf die Profilform des vmr geschlossen wird.

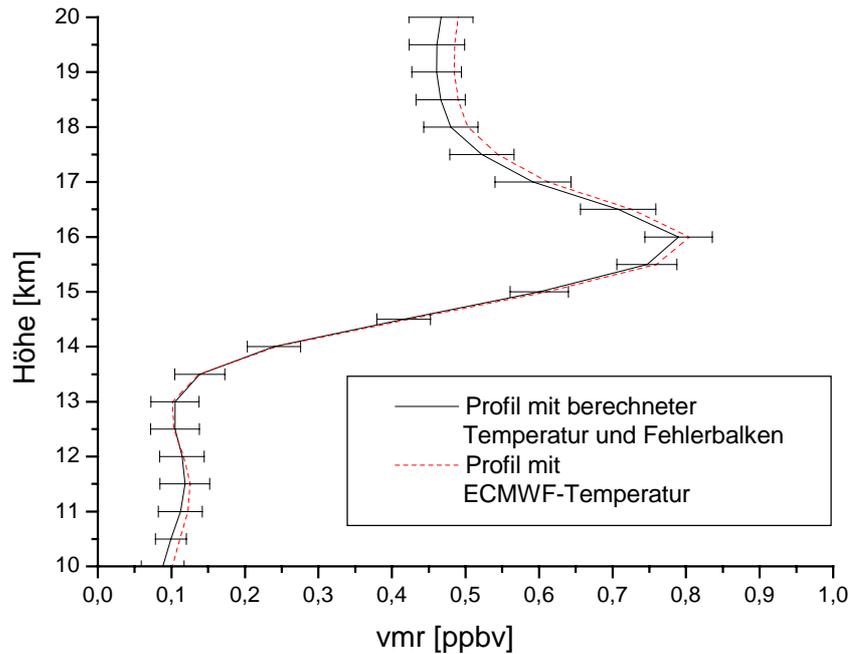


Abb. 4.16 vmr-Profile von ClONO₂ bei 67,5°S und 59,1°W

4.2.3.3 Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von ClONO₂

Die zweidimensionale Verteilung von ClONO₂ ist in Abb. 4.17 für den Hinflug und Abb. 4.18 für den Rückflug dargestellt. Die weißen Flecke in den Abbildungen sind Bereiche mit sehr geringen ClONO₂-Konzentrationen, für welche die Inversionsrechnung sogar negative Werte liefert. Sie werden durch die geringe Intensität der ClONO₂-Signaturen, das Rauschen und den Einfluss der Störgase verursacht. Oberhalb von 15 km ist die Konzentration höher, so dass der Wert des vmr durchgehend positiv ist. Besonders in den zwei nördlicheren Abschnitten ist mit der Höhe eine deutliche Zunahme bis auf 2 ppbv zu erkennen. Auf dem Weg Richtung Süden nimmt die Konzentration in Flughöhe und der Säulengehalt oberhalb immer weiter ab. Im südlichsten Abschnitt ist die Konzentration auf 0,8 ppbv (von ca. 1,4 ppbv bei Beginn der Messung) abgesunken.

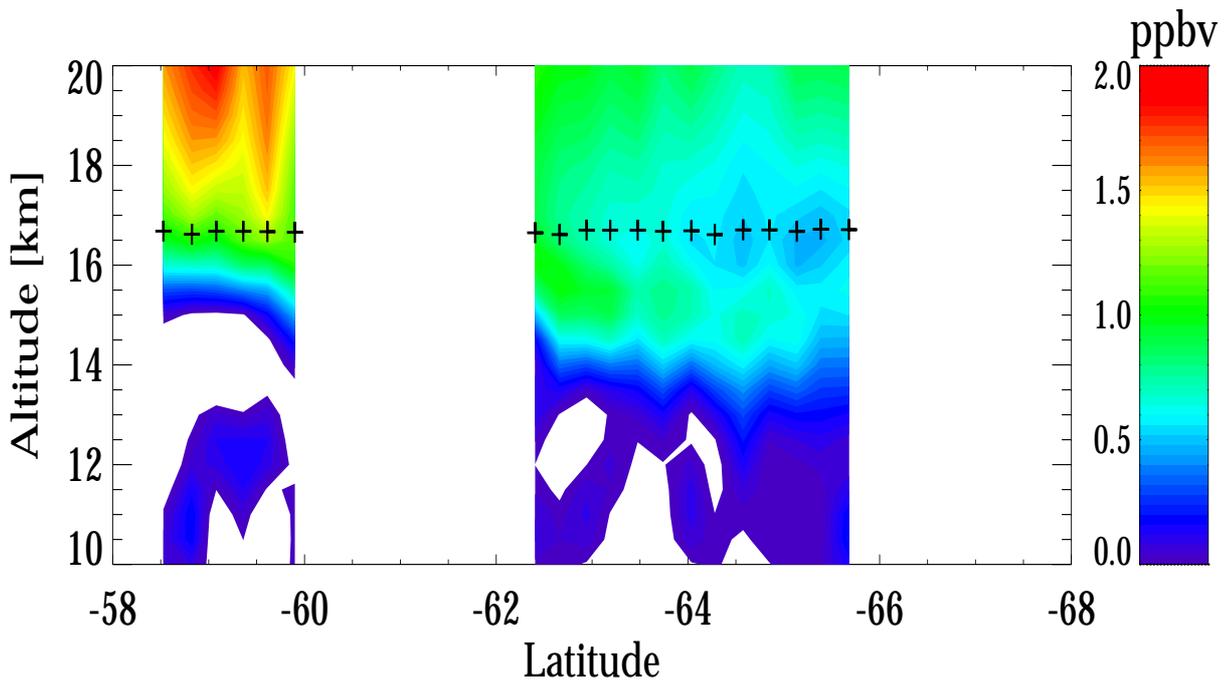


Abb. 4.17 Zweidimensionale Verteilung des ClONO₂ und die Flughöhe am 23.09.99 (Hinflug)

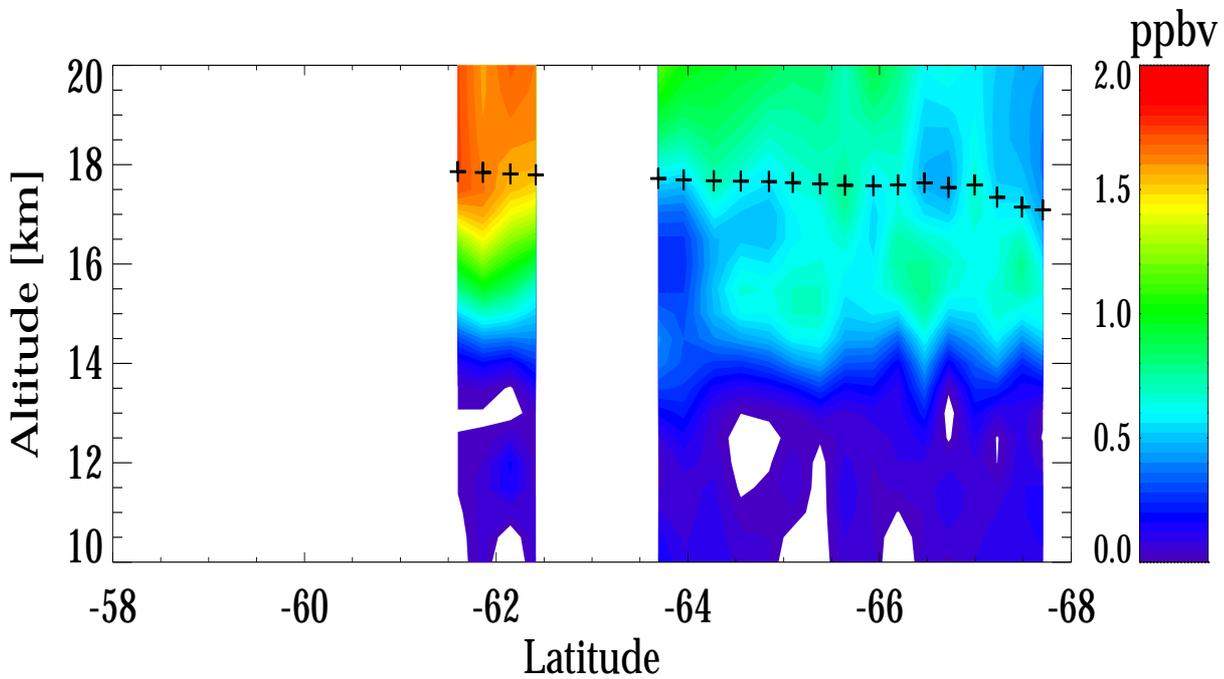


Abb. 4.18 Zweidimensionale Verteilung des ClONO₂ und die Flughöhe am 23.09.99 (Rückflug)

4.2.4 Ozon

4.2.4.1 Eingaben für die Profilberechnung

Die Berechnung der Ozonprofile erfolgte in zehn spektralen Auswertefenstern im Bereich von 780 cm^{-1} bis 812 cm^{-1} . Die Regularisierung wurde auf einen Wert von 10 gesetzt (siehe Tab. 4.4). Außerdem wurde CCl_4 mit einem Regularisierungsparameter von 10^9 mitgefittet, da sich dessen Bande noch bis in den o.g. Wellenzahlbereich erstreckt. Um den Einfluss von HNO_3 und ClONO_2 in diesem spektralen Bereich zu berücksichtigen wurden die vorher abgeleiteten Profile dieser Gase eingesetzt. In Abb. 4.19 sind Beispiele der gemessenen und berechneten Spektren dargestellt.

Auswertefenster [cm^{-1}]	782,5 – 783,5 785,3 – 786,5 787,0 – 788,0 788,5 – 789,6 794,2 – 795,2 795,5 – 795,9 804,9 – 806,0 806,5 – 807,6 811,1 – 812,3 812,7 – 813,7
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	O_3 , $\gamma_{\text{O}_3} = 10$ CCl_4 , $\gamma_{\text{CCl}_4} = 1 \cdot 10^9$ Shift (nicht regularisiert) Offset (nicht regularisiert)

Tab. 4.4 Eingaben für die Profilberechnung von O_3

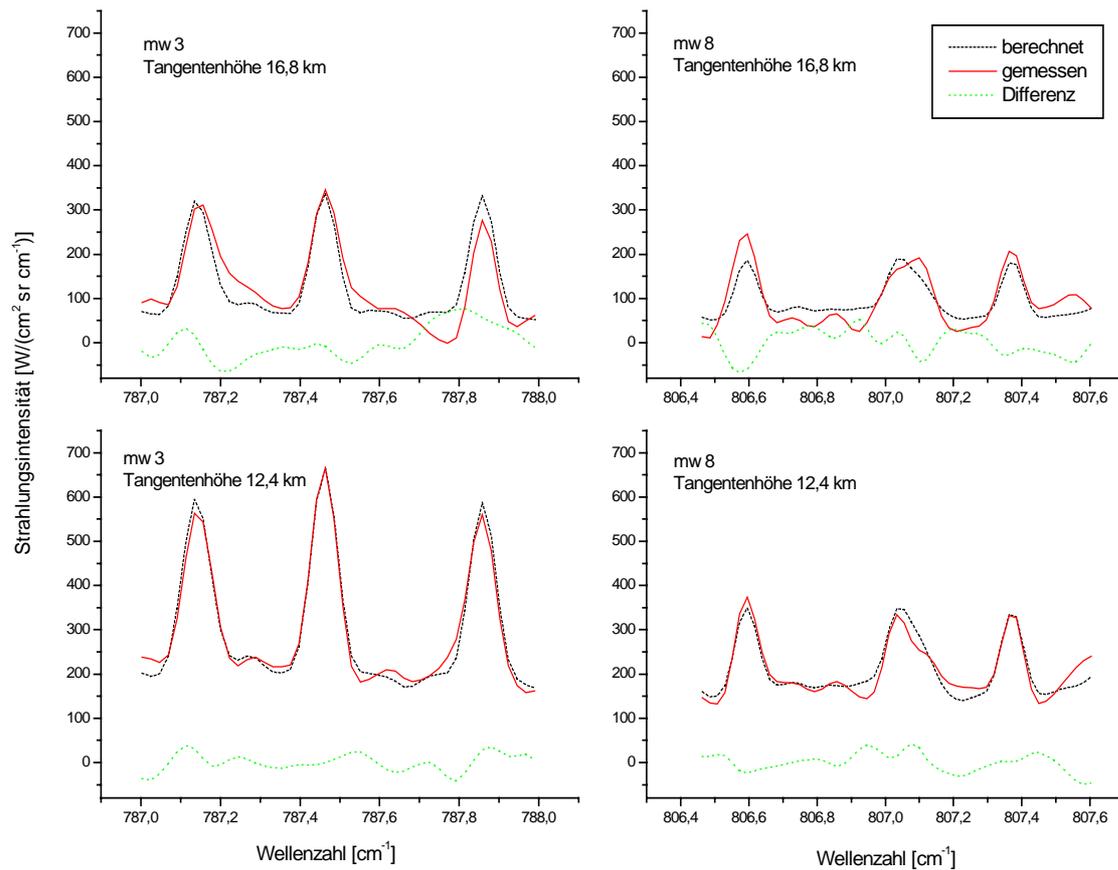


Abb. 4.19 Vergleich der gemessenen und berechneten spektralen Strahllichkeiten für das dritte und achte Auswertefenster von O₃ in zwei Tangentenhöhen

4.2.4.2 Fehlerabschätzung

Wegen des schlechten S/N ergibt sich ein Rauschfehler zwischen 10% im Maximum des Ozonprofils und 33% für sehr niedrige Werte, wie sie im Flugniveau beobachtet werden. Die Ozonlinien bei 980 cm⁻¹ wären deshalb zur Auswertung besser geeignet, stehen aber leider nicht zur Verfügung.

Bei Ozon wirkt sich ein Kalibrierungsfehler von 5% ebenfalls mit 5% im vmr aus. Aufgrund des in Abschnitt 4.2.2.2 erläuterten Kompensationseffekts ist die tatsächliche Auswirkung im vmr aber vermutlich geringer.

In Abb. 4.20 sind zwei Ergebnisse mit unterschiedlicher Eingabe der Temperaturprofile aufgetragen. Aus dem Unterschied in den verwendeten Temperaturen ergibt sich eine maximale relative Abweichung von 18,2% in 16 km Höhe, wo auch die Differenz von MIPAS- und ECMWF-Temperatur mit 3,5 K maximal ist (siehe Abschnitt 4.2.1.3). Die Abweichungen liegen aber im Bereich des Rauschfehlers. Oberhalb der Flughöhe laufen die beiden Kurven stark auseinander, da hier größere systematische Abweichungen der Temperaturprofile vorliegen.

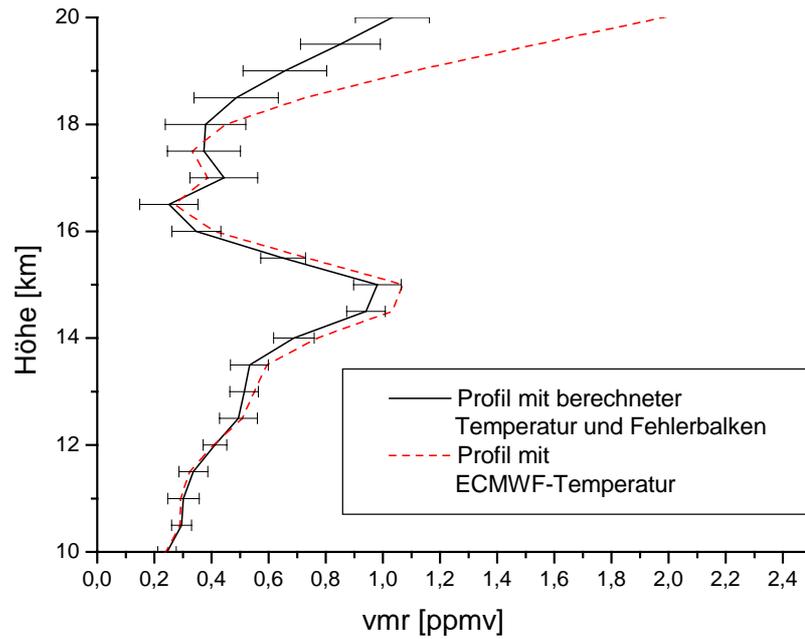


Abb. 4.20 vmr-Profile von Ozon bei 67,5°S und 59,1°W

4.2.4.3 Die zweidimensionale Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses von O_3

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 4.21 und Abb. 4.22 dargestellt. Auf dem Hinflug ist im zweiten Abschnitt zwischen 16 km und 18 km Höhe ein lokales Minimum des Volumenmischungsverhältnisses mit einem Wert von 0,1 ppmv zu erkennen. Auf dem Rückflug ist das Minimum zwischen 66 und 68°S ähnlich stark ausgeprägt, weist aber weiter nördlich etwas höhere Werte auf als beim Hinflug. Die Flughöhe in Abschnitt eins und zwei lag knapp unterhalb des Ozonlochs, in der Mitte des dritten Flugabschnitts etwas oberhalb davon.

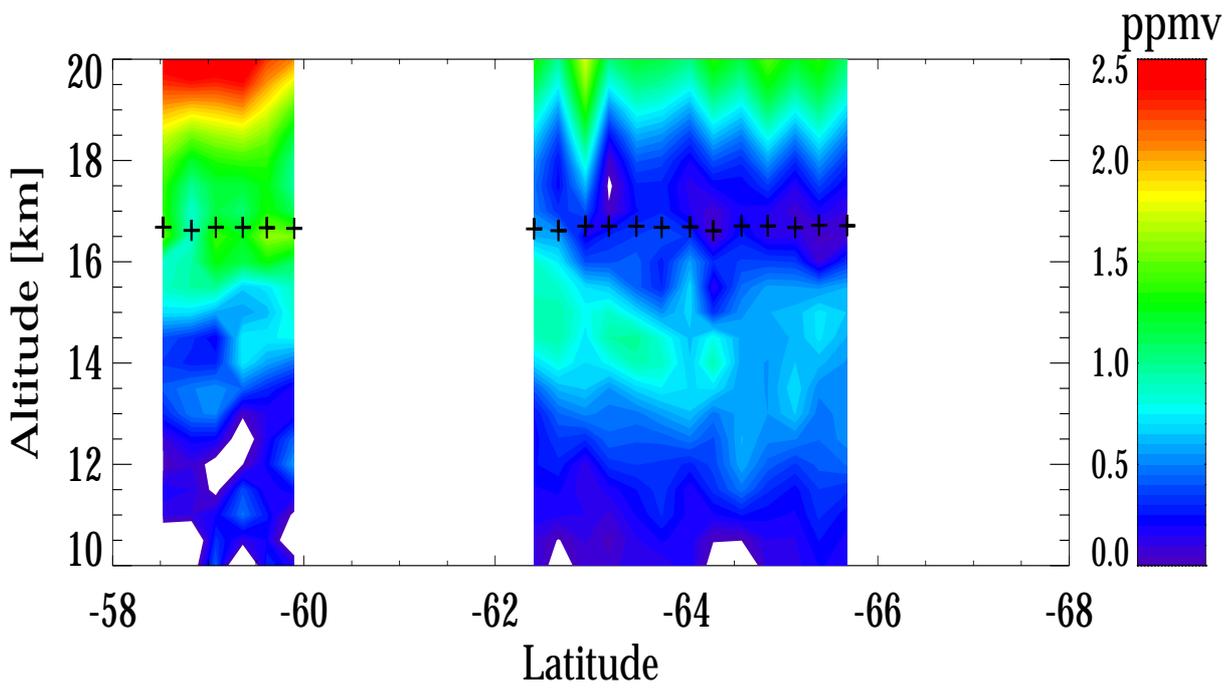


Abb. 4.21 Zweidimensionale Verteilung des O₃ und die Flughöhe am 23.09.99 (Hinflug)

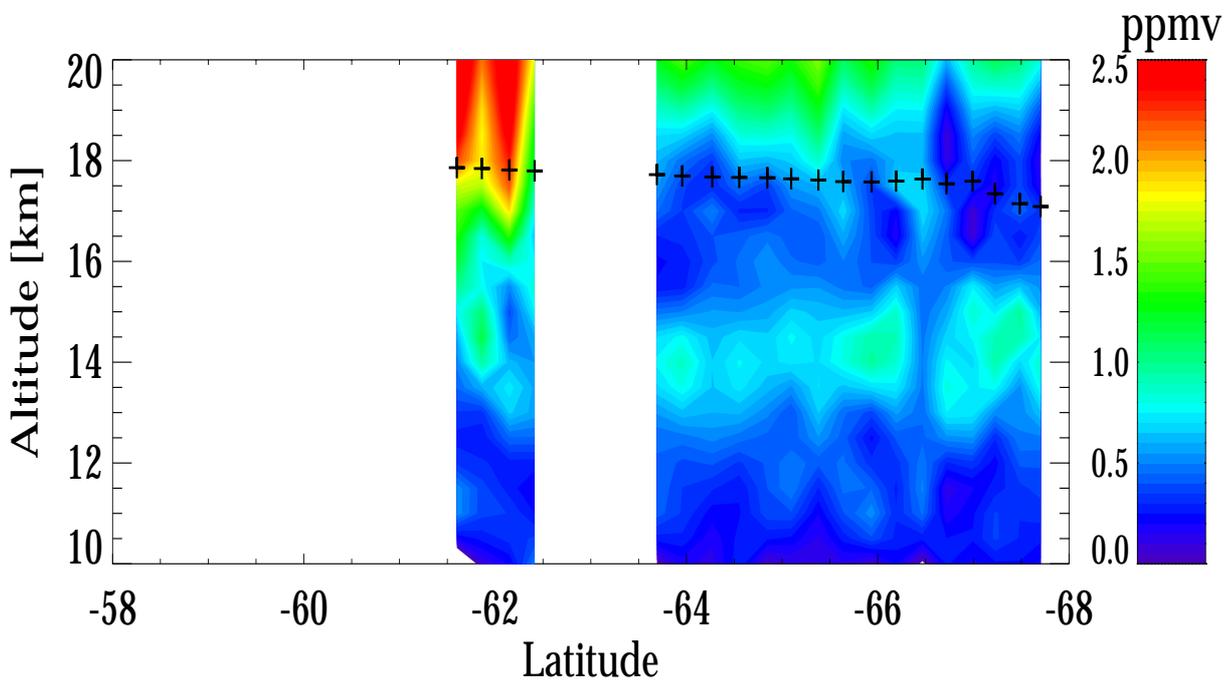


Abb. 4.22 Zweidimensionale Verteilung des O₃ und die Flughöhe am 23.09.99 (Rückflug)

Bei einem Vergleich von MIPAS-STR-Ergebnissen mit in-situ-Messungen am Flugzeug (Abb. 4.23) sieht man an den hochaufgelösten Messungen von ECOC und FOZAN, dass die Werte innerhalb des Polarwirbels auf dem Flugniveau zwischen 0,25 ppmv und 0,4 ppmv variieren. Der Verlauf der beiden Kurven der Ozonmessgeräte zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die MIPAS-Werte streuen bis zu einem Faktor von 2 um die in-situ-Daten. Hierfür sind drei Ursachen denkbar: In die MIPAS-Messung geht nicht nur der Beitrag direkt am Flugzeug ein, sondern auch ein Beitrag entlang des Sehstrahls. Daraus ergibt sich auch der zweite mögliche Grund: Der Sehstrahl kann durch einen Bereich mit starkem O₃-Gradienten blicken, wodurch die Berechnung verfälscht wird. Als dritte Ursache kommt ein Temperaturgradient entlang der Sichtlinie in Frage. Die MIPAS-Daten geben jedoch einen extremen Verlauf, wie den im vierten Abschnitt durchflogenen starken Anstieg (ab ca. 62500 Sekunden), gut wieder.

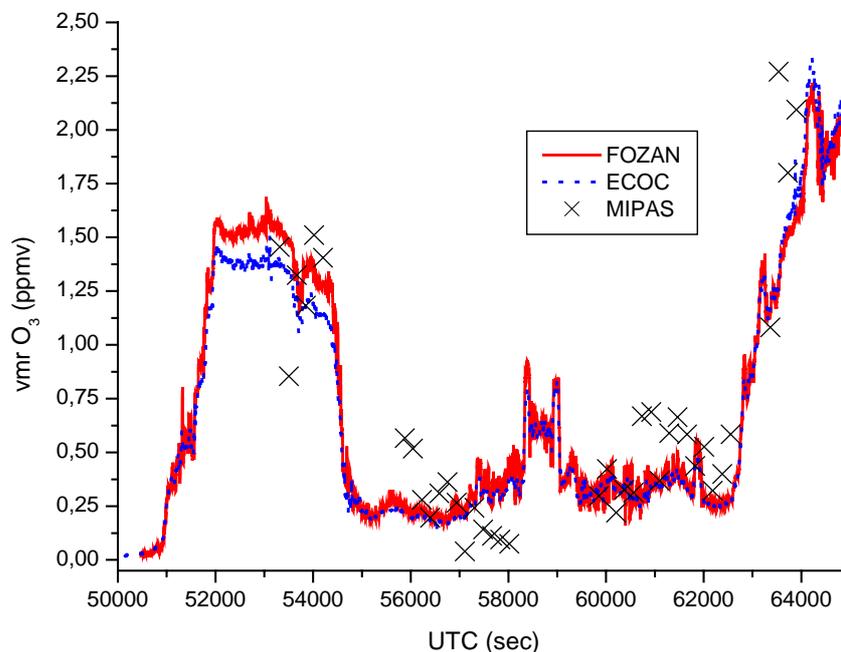


Abb. 4.23 Von MIPAS-STR, FOZAN und ECOC gemessene Ozonwerte in Flughöhe

Die in Abstimmung mit dem Flug der Geophysica gestartete Ozonsonde von Marambio bietet eine weitere Vergleichsmöglichkeit (siehe Abb. 4.24). Es muss dabei berücksichtigt werden, dass der Ort des Sondenaufstiegs nicht exakt dem der MIPAS-Messung entspricht. Deshalb wurden wie auch schon bei der Temperatur die Profile ausgewählt, deren Tangentenpunkte in der Nähe der Ozonsonde liegen. Bis in Flughöhe verlaufen die Profile sehr ähnlich, wenn auch das lokale Maximum der Ozonsonde in der Höhe von 15,2 km von MIPAS nicht aufgelöst werden kann. Oberhalb des Flugniveaus wurden dann von der Sonde niedrigere Werte im Vergleich zu MIPAS erhalten.

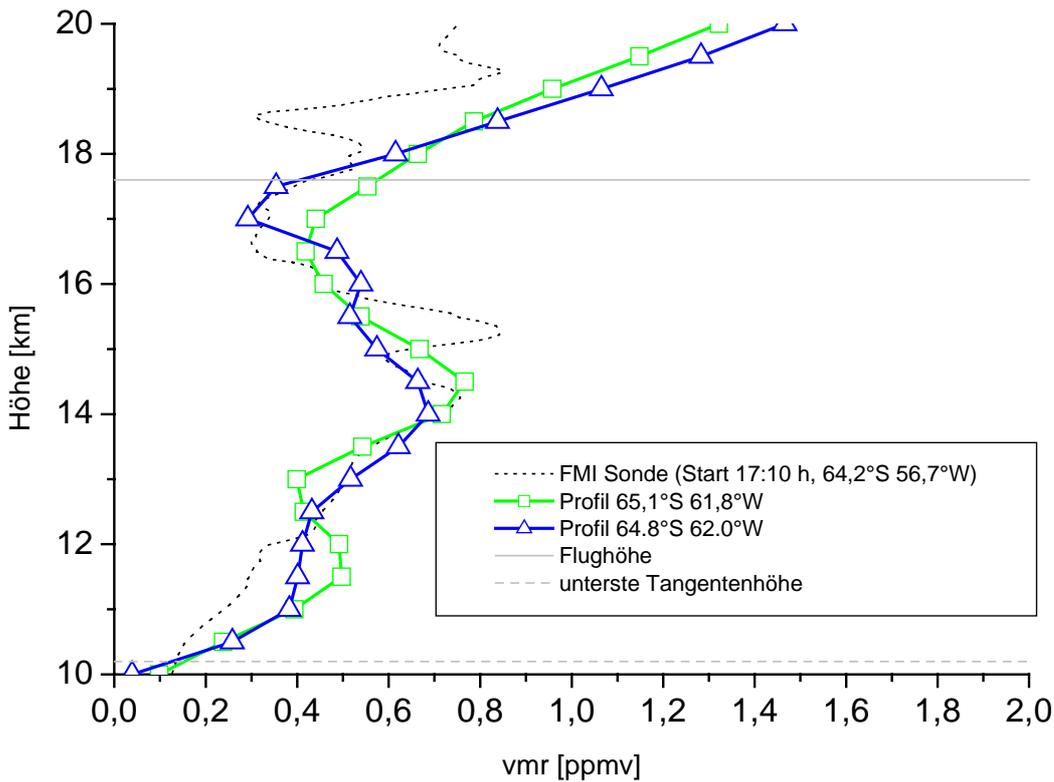


Abb. 4.24 Ozon: Vergleich ausgewählter MIPAS-Profile mit einer FMI-Sonde

Durch den in Kapitel 3 erwähnten Abstieg des Flugzeugs ergibt sich ebenfalls eine Möglichkeit, Daten von unterschiedlichen Geräten zu vergleichen. In Abb. 4.25 sind die von ECOC gemessenen Ozonwerte während des Abstiegs gegen die Höhe aufgetragen worden. Die Lage (etwa 15,5 km) und der Wert des relativen Maximums (0,8 ppmv) stimmen bei der Sonde in Abb. 4.24 und ECOC in Abb. 4.25 gut überein.

Die MIPAS-Profile in Abb. 4.25 wurden aus Messungen zu Beginn des Rückflugs ausgewählt. Alle Profile zeigen eine starke Abnahme der Volumenmischungsverhältnisse von 15 auf 16,5 km Höhe. Kleinräumige Strukturen wie sie während des Abstiegs von ECOC zwischen 14 und 15 km Höhe gemessen wurden, werden von MIPAS-STR nicht aufgelöst.

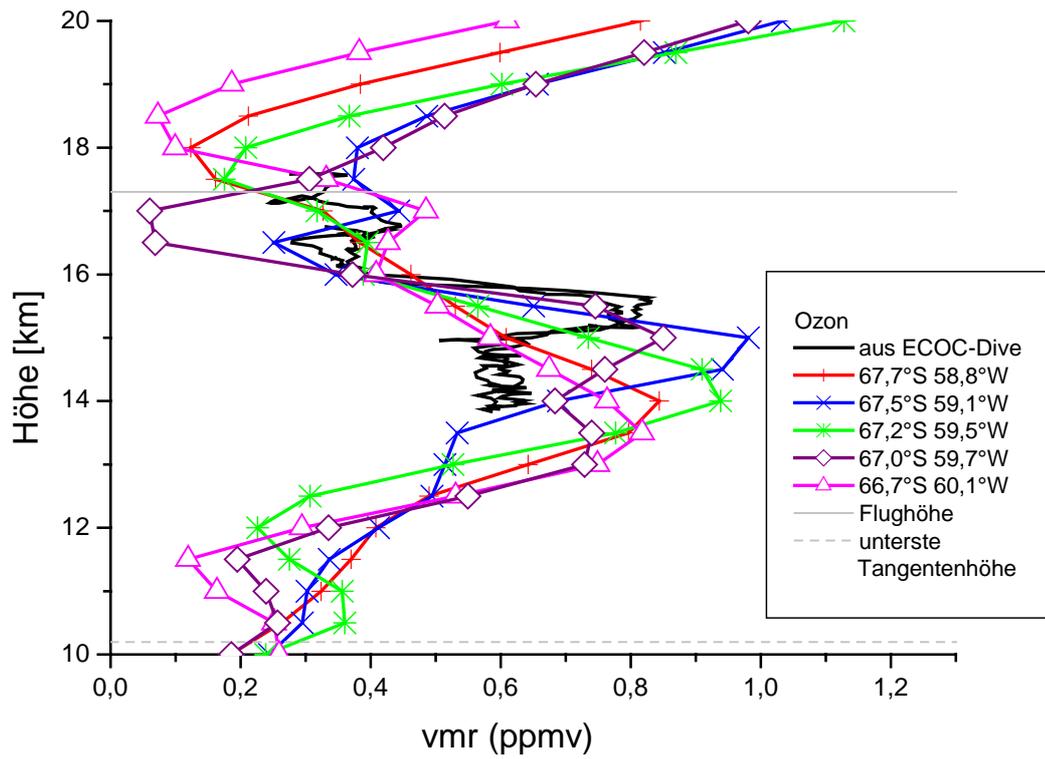


Abb. 4.25 Ozonprofile aus dem Abstieg und ausgewählte MIPAS-Profile

4.2.5 FCKW-11 und FCKW-12

FCKW-11²⁴ und FCKW-12²⁵ weisen in der zweidimensionalen Verteilung sehr ähnliche Strukturen auf. Sie werden deshalb hier gemeinsam beschrieben.

4.2.5.1 Eingaben für die Profilberechnung

Für FCKW-11 wurde zur Auswertung der spektrale Bereich von 840 cm^{-1} bis 860 cm^{-1} mit einer Regularisierung von 5×10^9 verwendet (siehe Tab. 4.5). Dieses Spektralintervall ist fast komplett von HNO_3 -Linien und vereinzelt von H_2O -Linien überlagert. Es ist aber dennoch das einzige Auswertefenster in Kanal 1, der für die Berechnung von FCKW-11-Profilen in Frage kommt [Echle et al., 1992]. Deshalb wurden bei der Berechnung diese beiden Gase mitgefittet, und zwar mit folgenden Werten für die Regularisierung: $\gamma_{\text{HNO}_3} = 10^7$ und $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$. Abb. 4.26 zeigt anhand von Beispielen die gemessenen und so berechneten spektralen Strahldichten.

Auswertefenster [cm^{-1}]	840,0 – 860,0
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	FCKW-11, $\gamma_{\text{FCKW-11}} = 5 \times 10^9$ HNO_3 , $\gamma_{\text{HNO}_3} = 1 \times 10^7$ H_2O , $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \times 10^{-2}$ Shift (nicht regularisiert) Offset (nicht regularisiert)

Tab. 4.5 Eingaben für die Profilberechnung von FCKW-11

²⁴ Trichlorfluormethan, CCl_3F

²⁵ Dichlordifluormethan, CCl_2F_2

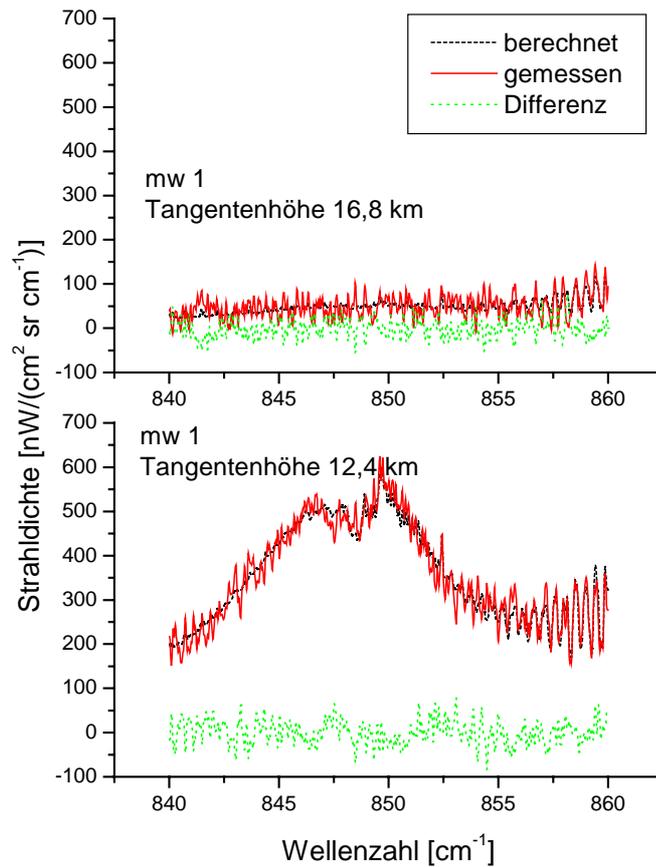


Abb. 4.26 Vergleich der gemessenen und berechneten Strahllichten für das Auswertefenster von FCKW-11 in zwei Tangentenhöhen

Bei der Berechnung von FCKW-12 liegt der einzige zur Auswertung gewählte spektrale Bereich zwischen 920 cm^{-1} und 924 cm^{-1} (siehe Tab. 4.6). Der von HNO_3 -Linien überlagerte Bereich wurde abgeschnitten, der Einfluss der Wasserlinie durch das Mitfitten von H_2O mit $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$ berücksichtigt. Die Regularisierung für FCKW-12 betrug 5×10^8 . Zwei Beispiele der berechneten und gemessenen Strahllichten sind in Abb. 4.27 dargestellt.

Auswertefenster [cm^{-1}]	920,5 – 924,0
Abgeleitete Größen und Regularisierungsparameter	FCKW-12, $\gamma_{\text{FCKW-12}} = 5 \times 10^9$ H_2O , $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \times 10^{-2}$ Shift (nicht regularisiert) Offset (nicht regularisiert)

Tab. 4.6 Eingaben für die Profilberechnung von FCKW-12

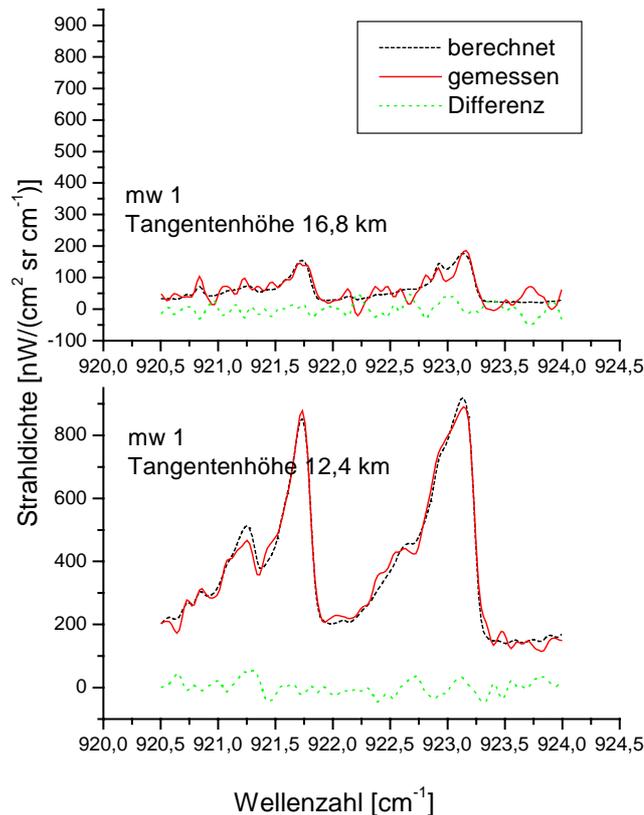


Abb. 4.27 Vergleich der gemessenen und berechneten Strahllichte für das Auswertefenster von FCKW-12 in zwei Tangentenhöhen

4.2.5.2 Fehlerabschätzung

Der Rauschfehler wirkt sich bei FCKW-11 im vmr mit einem absoluten Fehler von etwa 6 pptv aus, bei FCKW-12 liegt der Fehler im Bereich von 15 – 20 pptv (siehe Fehlerbalken von Abb. 4.28 und Abb. 4.29).

Neben dem bisher angenommenen Fehler von 5% im vmr infolge des Kalibrierungsfehlers gibt es auch bei den FCKWs einen systematischen Fehler aus falscher Temperatureingabe. Hierfür wurde eine Abschätzung anhand von berechneten Profilen gemacht, in die einmal das ECMWF-Temperaturprofil und einmal das berechnete eingeht. Bei FCKW-11 beträgt diese Abweichung im dargestellten Höhenbereich 8,5%, für FCKW-12 11,3%.

Grundlage für die Berechnungen der Spektren liefern die druck- und temperaturabhängigen Absorptionsquerschnitte von P. Varanasi. Diese sind aber nicht veröffentlicht worden und es existieren keine Fehlerangaben dazu. Fehlerabschätzungen mit früher verwendeten Absorptionsquerschnitten ergaben einen relativen Fehler von 8%, der für die Daten von Varanasi im gleichen Bereich vermutet wird.

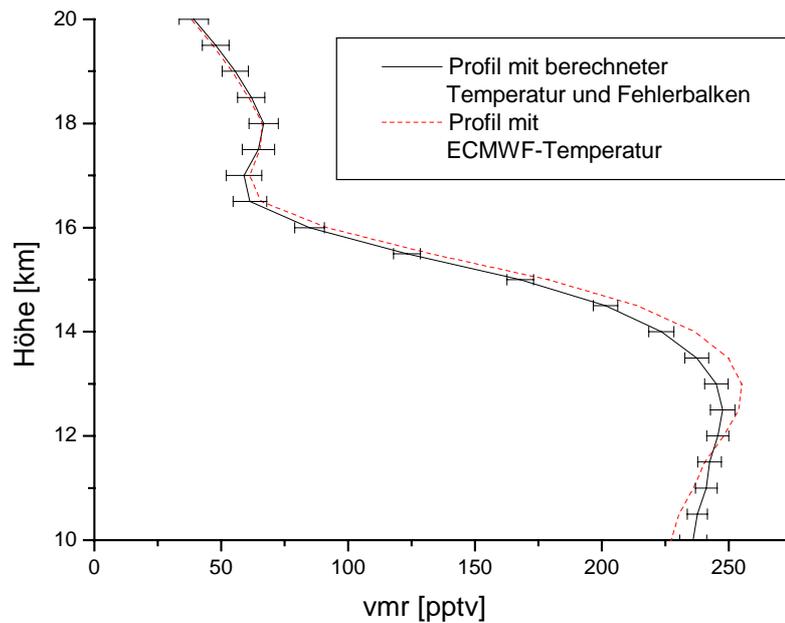


Abb. 4.28 vmr-Profile von FCKW-11 bei 67,5°S und 59,1°W

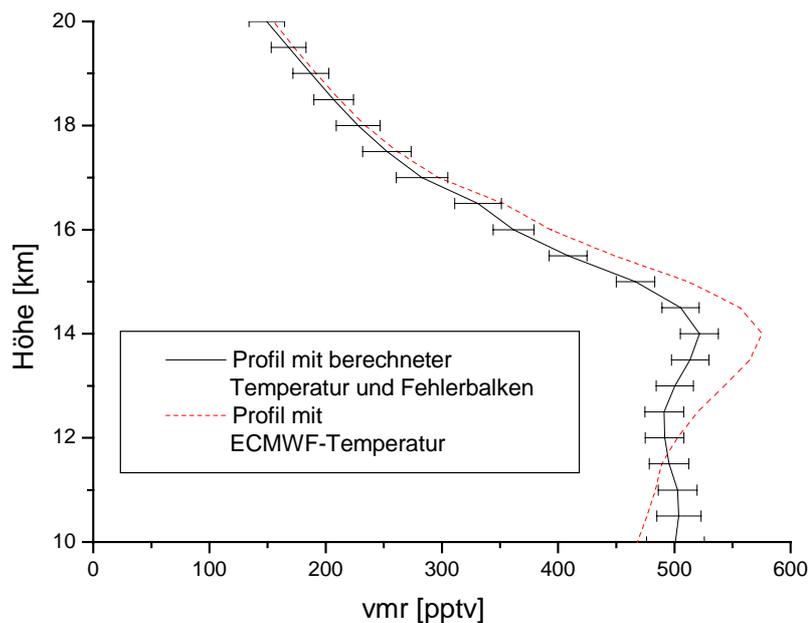


Abb. 4.29 vmr-Profile von FCKW-12 bei 67,5°S und 59,1°W

4.2.5.3 Die zweidimensionalen Verteilungen der Volummischungsverhältnisse der FCKWs

Die zweidimensionalen Schnitte der vmr-Verteilung sind in Abb. 4.30 bis Abb. 4.33 dargestellt. Das vmr beider Gase nimmt in allen Abschnitten mit der Höhe ab. Auf dem Hinflug ist ein Absinken des Profils zwischen Norden und Süden zu erkennen Während des Rückflugs sind die Werte in konstanter Höhe von einigen Einschnitten abgesehen eher gleich.

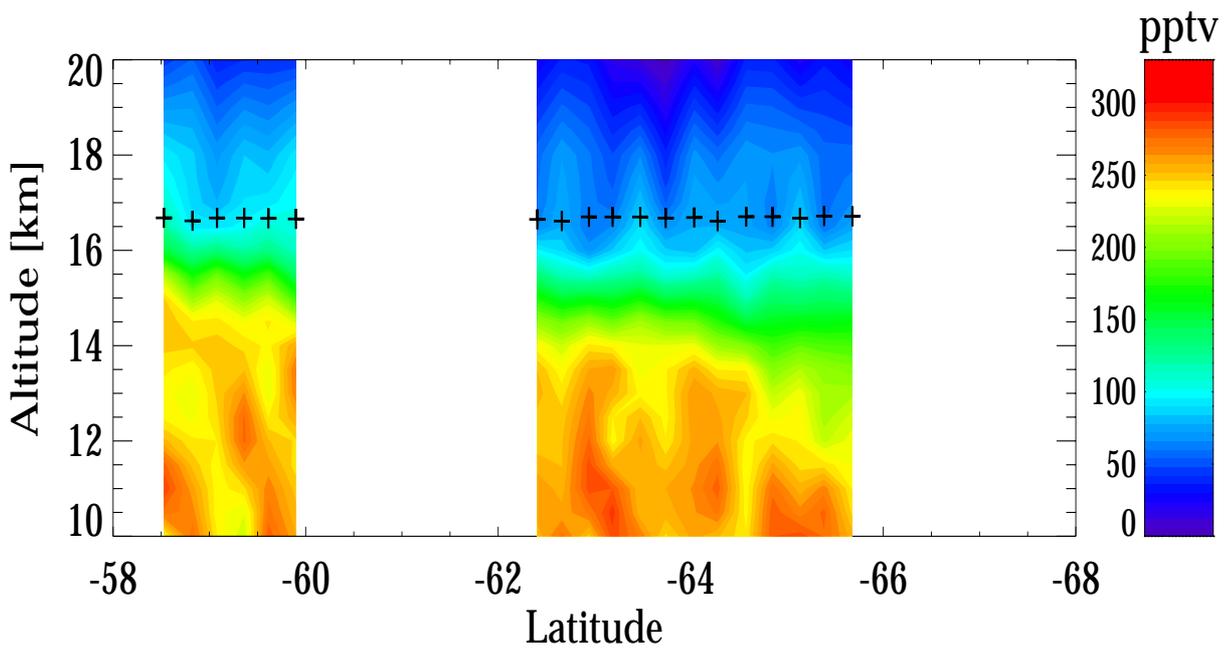


Abb. 4.30 Zweidimensionale Verteilung des FCKW-11 und die Flughöhe am 23.09.99 (Hinflug)

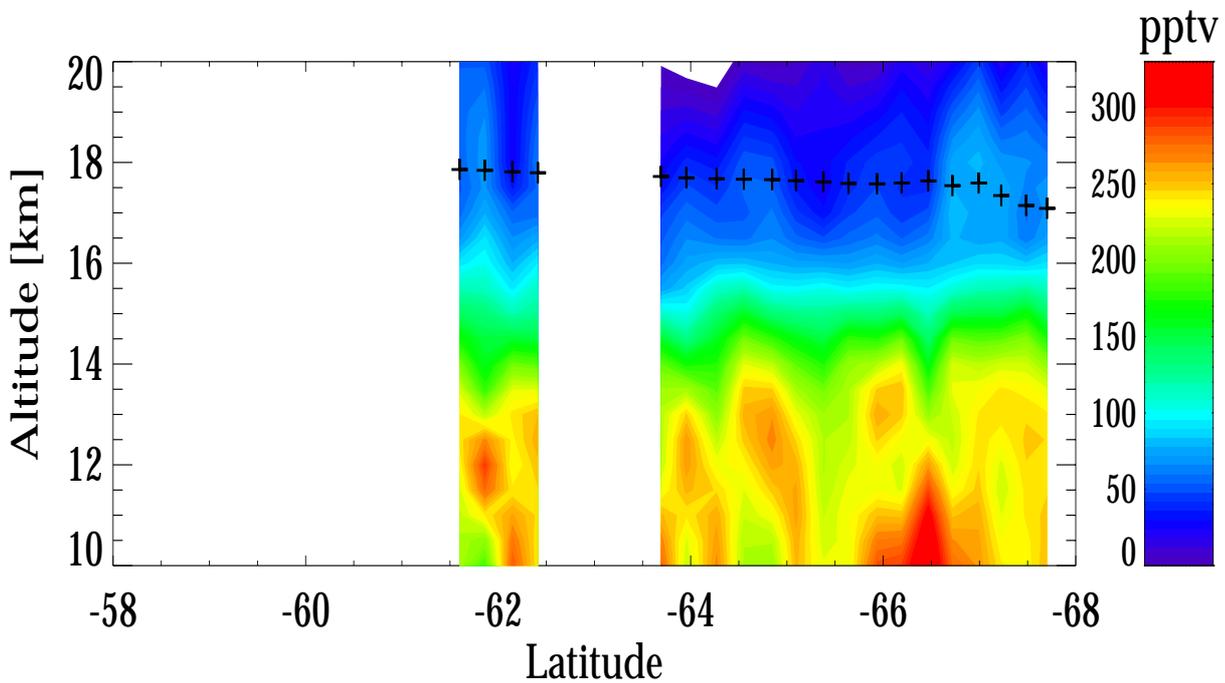


Abb. 4.31 Zweidimensionale Verteilung des FCKW-11 und die Flughöhe am 23.09.99 (Rückflug)

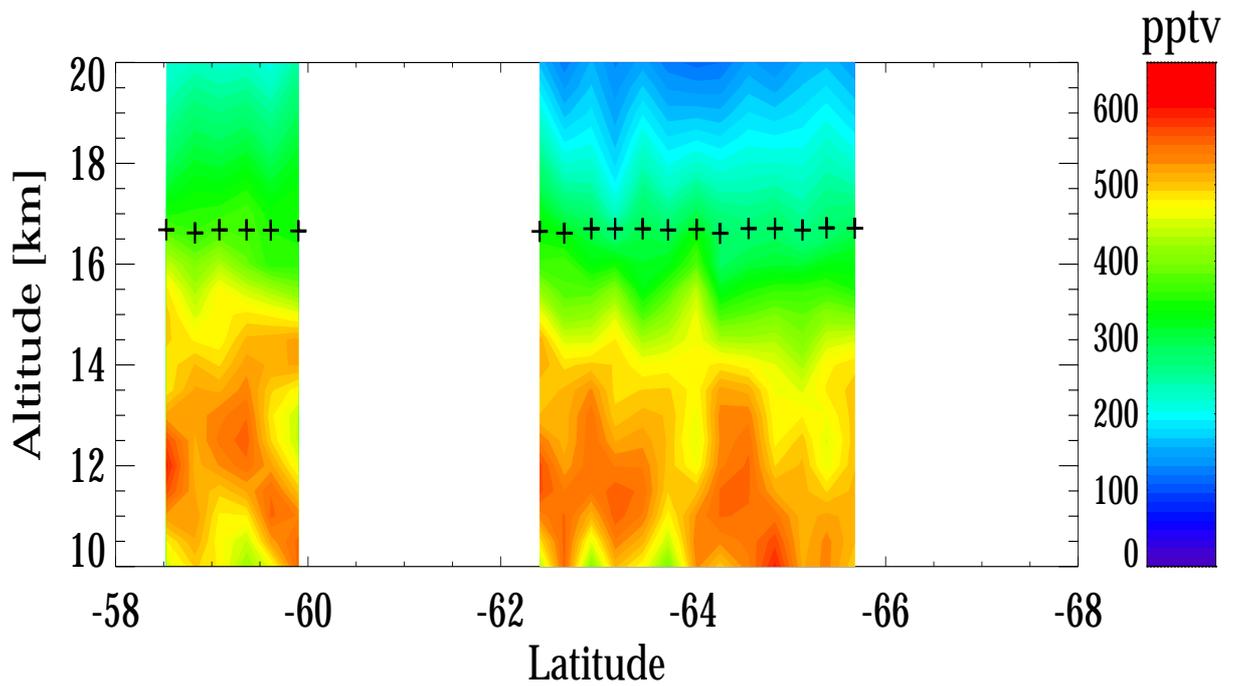


Abb. 4.32 Zweidimensionale Verteilung des FCKW-12 und die Flughöhe am 23.09.99 (Hinflug)

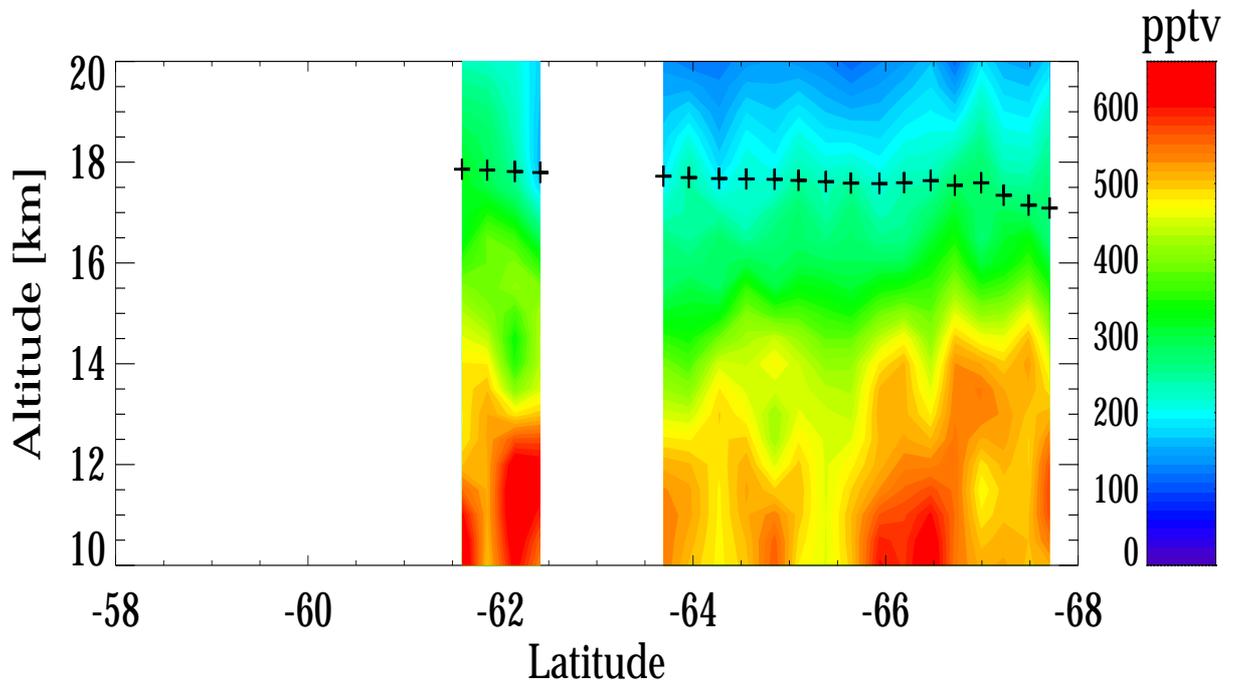


Abb. 4.33 Zweidimensionale Verteilung des FCKW-12 und die Flughöhe am 23.09.99 (Rückflug)

In Abb. 4.34 werden jeweils zwei MIPAS-STR-Profile gezeigt, eins aus dem nördlichen Abschnitt (14:45 GMT, 59,0°S 65,4°W) und eins aus dem Süden (16:37 GMT, 67,7°S 58,8°W). Das letzte Profil wurde ausgewählt, da es Vergleiche mit in-situ-Messungen von HAGAR während des Abstiegs am Ende des zweiten Flugabschnitts ermöglicht.

Der Vergleich der zwei MIPAS-STR-Profile zeigt das oben bereits erwähnte Absinken der Luftmassen im Wirbel. Der Vergleich der südlichen Profile mit den HAGAR-Messungen liefert gute Übereinstimmung.

Unterhalb von 13 km tauchen sowohl bei FCKW-11 als auch bei FCKW-12 systematische Probleme auf, die bisher noch nicht verstanden sind. Das vmr von FCKW-11 sollte in polaren Breiten unterhalb von 10 km Höhe auf einen nahezu konstanten Wert von ca. 300 pptv ansteigen. Es weist aber meist geringere Werte auf und schwankt außerdem stark. Ursachen hierfür könnten Wolken oder Aerosol sein. Es ist denkbar, dass der Einfluss von Wolken in den Spektralbereichen der beiden FCKWs unterschiedlich ist, je nach Größenverteilung der Tröpfchen. Das würde möglicherweise die oftmals zu hohen Werte für FCKW-12 erklären. Bei FCKW-12 wird in der polaren Region unterhalb von 10 km ein maximaler Wert des vmr von etwa 520 pptv erwartet, den das vmr der berechneten Profile manchmal übersteigt.

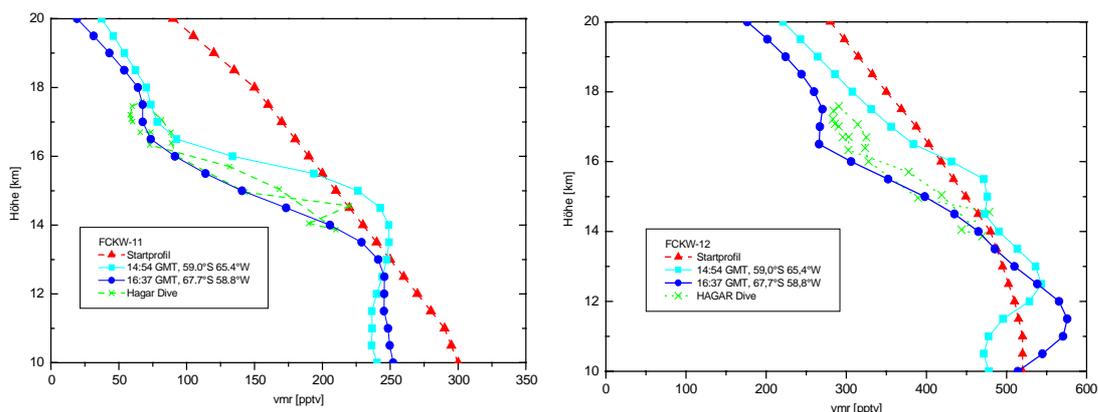
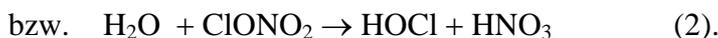
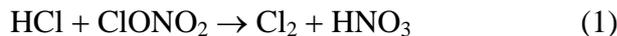


Abb. 4.34 Profile von FCKW-11 (links) und FCKW-12 (rechts) aus verschiedenen Breiten mit Startprofil aus mittleren Breiten und Profil von HAGAR aus dem Abstieg

5 Interpretation der Ergebnisse

Ziel der APE-GAIA Kampagne war es, die Ursachen und Prozesse des massiven Ozonabbaus in der antarktischen Stratosphäre zu untersuchen. Entscheidend für die Entstehung des Ozonlochs ist die Aktivierung von Chlor in der unteren Stratosphäre. Voraussetzung dafür ist die Bildung von polaren stratosphärischen Wolken (engl. Abkürzung: PSCs²⁶), die bei den extrem niedrigen Temperaturen ($T < 195 \text{ K}$) in der unteren Stratosphäre im polaren Winter entstehen. Diese niedrigen Temperaturen kommen im antarktischen Polarwirbel häufig vor. Durch die zum Südpol nahezu symmetrische Land-See-Verteilung hat der Wirbel eine stabile Lage über der Antarktis und durch die beständige Dunkelheit sowie die Isolation der Luftmassen kühlt die Luft stark aus. Neben der stratosphärischen Ozonchemie mit dem Chapman-Zyklus [Chapman, 1930] und homogenen katalytischen Reaktionen weist die polare Region eine Besonderheit auf. An der Oberfläche der PSC-Teilchen laufen während der Polarnacht heterogene chemische Reaktionen ab. Dadurch wird das in Reservoirgasen (ClONO_2 , HCl) gespeicherte Chlor in reaktivere Verbindungen (Cl_2 , HOCl) überführt:



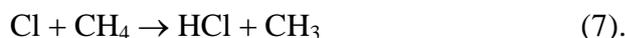
Parallel dazu kommt es zur Bildung von HNO_3 aus Stickoxiden:



HNO_3 wird in den Partikeln gebunden, welche unter gewissen Umständen sedimentieren können. Auf diese Weise kommt es dann nach der in Gl. (3) und (4) dargestellten Denoxifizierung²⁷ zur Denitrifizierung²⁸. Somit verschiebt sich das ursprüngliche Konzentrationsverhältnis zwischen Stickstoff- und Chlorradikalen. Als Folge davon können die nach Sonnenaufgang im Frühjahr durch Photolyse aktivierten Chlorradikale extrem viel Ozon zerstören, weil das aus dem verbliebenen HNO_3 photolysierte NO_2 nicht ausreicht, um genügend Chlorradikale zu binden:



Während der sogenannten Recovery-Phase können die Chlorradikale durch Reaktion mit CH_4 in das Reservoirgas HCl umgewandelt werden:



²⁶ Polar Stratospheric Clouds

²⁷ Umwandlung von NO_x (NO und NO_2) in Reservoirgase

²⁸ Entfernung von HNO_3 durch Sedimentation

Nach dem Aufbrechen des Polarwirbels kann ozonhaltige Luft aus mittleren Breiten nachströmen und zum Auffüllen des Ozonlochs beitragen.

Der 23. September war ein Flugtag zu Beginn der Recovery-Phase. Der Polarwirbel war noch stabil und das Auffüllen des Ozonlochs hatte noch nicht eingesetzt. Anhand der Ozonmessung in Flughöhe kann man das Ozonloch gut lokalisieren (siehe Abb. 4.23, Von MIPAS-STR, FOZAN und ECOC gemessene Ozonwerte in Flughöhe). Im Bereich der geographischen Breite von $61,3^{\circ}\text{S}$ (ca. $5,45 \times 10^4$ s) ist ein starker Abfall des vmr von Ozon zu beobachten. Auf dem Rückflug liegt der Anstieg im Bereich der südlichen Breite von $63,8^{\circ}\text{S}$ (entspricht einer Zeit von $6,25 \times 10^4$ s). Die Gründe für den verschobenen Ozonlochrand sind sowohl ein zeitlicher als auch ein räumlicher Unterschied der Messung. Bis zum zweiten Überqueren des Rands sind etwa 100 Minuten vergangen, außerdem erfolgte der Rückflug etwa 1 km höher und 50 km weiter westlich als der Hinflug.

Die Auswirkungen der alljährlich wiederkehrenden Ozonzerstörung innerhalb des Polarwirbels sind in den Abb. 4.21 und Abb. 4.22 gut zu erkennen. Im nicht gestörten Fall müsste das Volumenmischungsverhältnis von Ozon in polaren Breiten bis in ca. 35 km Höhe kontinuierlich auf einen Wert von ca. 4,5 ppmv zunehmen. Die beobachteten Ozonwerte nehmen im Bereich um 17 km Höhe bis auf 0,1 ppmv ab, im ungestörten Fall würden sie bei ca. 1,8 ppmv liegen.

Einen entscheidenden Beitrag zur Bildung der Chlorradikale bilden die in der Troposphäre inerten FCKWs. Durch ihre lange Lebensdauer können sie in die Stratosphäre gelangen, wo sie photolysiert werden. In den Verteilungen der im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten FCKWs, nämlich FCKW-11 und FCKW-12, kann man die Abnahme dieser Gase erkennen. In der Troposphäre haben diese Verbindungen anthropogenen Ursprungs eine homogene Verteilung. Erst oberhalb der Tropopause werden sie durch UV-Strahlung aufgespalten und das Volumenmischungsverhältnis nimmt mit zunehmender Höhe stark ab. Das in Abb. 4.34 dargestellte Absinken der Profile erfolgt erst im Inneren des Wirbels und kann auch zur Lokalisierung des Vortex herangezogen werden. In den Messungen vom 23.09.99 ist dies leider nicht möglich, da für diesen Bereich weder beim Hin- noch beim Rückflug MIPAS-STR-Messungen vorliegen.

Bei FCKW-11 ist im ersten Abschnitt des Hinflugs in 15 km Höhe eine Zick-Zack-Struktur erkennbar (siehe Abb. 4.30). Eine derartige Struktur ist auch bei Ozon zu sehen, besonders ausgeprägt beim Hinflug ab einer geographischen Breite von 63°S in ca. 18,5 km Höhe (siehe Abb. 4.21). Das wiederholte Auftreten bei unterschiedlichen Gasen legt nahe, dass der Ursprung in der Berechnung der Profile aus Sequenzen mit abwechselnd auf- und abwärts durchlaufenen Elevationswinkeln liegt.

In den zwei südlichen Abschnitten ist in den vmr-Verteilungen von HNO_3 oberhalb von ca. 17 km Höhe die Denitrifizierung zu erkennen (Abb. 4.12 und Abb. 4.13). Unterhalb dieses Bereichs ist ein leichter Anstieg des Volumenmischungsverhältnisses gegenüber dem in den nördlichen Flugabschnitten zu erkennen (siehe Abb. 4.14). Dies kann ein Indiz für die Umverteilung des HNO_3 sein.

Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 erwähnt bildet sich am Rand des Wirbels eine Art Kragen mit hohen ClONO_2 -Konzentrationen aus. Hierfür gibt es verschiedene Gründe. Am Wirbelrand könnte NO_2 von außerhalb des Wirbels NO_2 mit ClO aus dem Inneren reagieren, da die Wirbelgrenze möglicherweise keine unüberwindbare Barriere für die Luftmassen bildet. In den Luftmassen am Rand des Wirbels kann HNO_3 photolysieren, so dass NO_2 für die Bildung von ClONO_2 zur Verfügung steht.

Wie es die Abb. 4.17 und Abb. 4.18 zeigen, ist innerhalb des Wirbels oberhalb von 15 km Höhe ein großer Teil des ClONO_2 aufgrund der heterogenen Reaktionen abgebaut worden. Für die Rückbildung dieses Reservoirgases wird im Frühjahr NO_2 benötigt. Aufgrund der vorangegangenen Denitrifizierung steht aber wenig davon zur Verfügung. In der Antarktis kann dann verstärkt Reaktion (7) ablaufen, die zur Bildung von HCl führt. Voraussetzung hierfür ist, dass das O_3 nahezu vollständig abgebaut ist, so dass das reaktive Chlor atomar und nicht in Form von ClO vorliegt. Diese These soll im Rahmen des APE-GAIA Experiments verifiziert werden.

6 Schlussbemerkung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurden erstmals aus flugzeuggebundenen Horizontsondierungen Vertikalprofile von atmosphärischen Zustandsparametern abgeleitet. Die aus den einzelnen Profilen zusammengestellten Verteilungen entlang der Flugroute zeigen einige spezielle antarktischen Strukturen im Bereich direkt oberhalb der Tropopause bis in 18 km Höhe in hoher Auflösung. So kann man in der Verteilung des Volumenmischungsverhältnisses das Ozonloch sehr deutlich erkennen, bei den FCKWs ist das Absinken im Polarwirbel zu sehen, in den HNO_3 -Verteilungen wird die Denitrifizierung deutlich und der ClONO_2 -Kragen ist ebenfalls zu erkennen.

Insgesamt funktionierte die Automatisierung der Auswertung zufriedenstellend. Sie könnte allerdings durch Überarbeitung der Programme und Vereinheitlichung der Eingaben noch vereinfacht und auch verbessert werden.

Die Qualität der abgeleiteten Temperatur- und Spurengasprofile kann noch verbessert werden. Die im Kapitel 5 erwähnten Zick-Zack-Strukturen sind möglicherweise schon in den kalibrierten Spektren vorhanden. Diese unrealistischen Strukturen in der zweidimensionalen Verteilung können durch Auftragung eines gleitenden Mittels in der grafischen Darstellung geglättet werden.

Auch die Ableitung der Profile kann optimiert werden. Zum einen könnte Vorwärtsmodell könnte verbessert werden: Bislang wurde für den Strahlungstransport horizontale Homogenität angenommen, die in der Atmosphäre nicht immer gegeben ist. Darüber hinaus ließe sich aus den berechneten Profilen für die jeweiligen Flugabschnitte ein gemittelttes Profil erstellen und dieses könnte als Startprofil für eine erneute Berechnung verwendet werden.

Bei dem Vergleich mit anderen Messungen hat sich gezeigt, dass die aus MIPAS-STR-Daten abgeleiteten Profile Strukturen gut wiedergeben, deren Ausdehnung in der Größenordnung der Auflösung des Instruments liegen. Kleinräumige Strukturen, wie sie von in-situ-Geräten gemessen werden, können natürlich nicht aufgelöst werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse würde sich ein Vergleich mit Modelldaten anbieten, z.B. mit welchen des am IMK entwickelten KASIMA²⁹. Eine Korrelation von reaktiven Gasen und Tracern kann weitere Ergebnisse liefern. Z.B. könnte das Ausmaß der Denitrifizierung aus einer Korrelation von HNO_3 und FCKW-11 abgeschätzt werden.

Die in dieser Arbeit abgeleiteten Verteilungen wurden aus Daten des Kanals 1 erhalten. Es wurden in drei weiteren Kanälen Messungen durchgeführt, deren Auswertung noch aussteht. Kanal 2 ist zwar stärker verrauscht als erwartet, aber es ist vielleicht dennoch möglich, Profile von wichtigen Tracern, wie z.B. N_2O oder CH_4 , abzuleiten. Ein weiterer Versuch zur Ableitung von Profilen kann für NO_2 in Kanal 3 erfolgen.

Außer dem Flug am 23.09.99 wurden noch weitere Messflüge durchgeführt, der letzte am 12.10.99. Die Auswertung dieser Daten wird es ermöglichen, die Rückbildung der Reservoirgase zu beobachten und somit weitere Erkenntnisse über die komplexe stratosphärische polare Ozonchemie zu gewinnen.

²⁹ Karlsruhe simulation model of the middle atmosphere

Literaturverzeichnis

[Carli et al., 2000]

B. Carli, C.E. Blom, M.P. Chipperfield, U. Cortesi, G. De Rossi and G. Redaelli: Airborne Polar Experiment – Geophysica Aircraft in Antarctica (APE-GAIA), SPARC-Newsletter No 15, 2000

[Chapman, 1930]

S. Chapman: A theory of upper-atmospheric ozone, Mem. R. Meteorol. Soc., 3(26): S. 103-125, 1930

[von Clarmann et al., 1998]

T. von Clarmann, A. Dudhia, G. Echle, J.-M. Flaud, C. Harrold, B. Kerridge, K. Koutoulaki, A. Linden, M. Lòpez-Puertas, F.J. Martín-Torres, J. Reburn, J. Remedios, C.D. Rodgers, R. Siddans, R.J. Wells and G. Zaragoza: Study on the simulation of atmospheric infrared spectra. Technical report, European Space Agency, Final Report of ESA Contract12054/96/NL/CN, 1998

[Echle et al., 1992]

G. Echle, H. Oelhaf and A. Wegner: Measurements of atmospheric parameters with MIPAS, Final Report, ESA contract 9597/91/NL/SF, 1992

[Fischer, 1992]

H. Fischer: Remote sensing of atmospheric trace constituents using Fourier transform spectrometry, Berichte der Bunsen-Gesellschaft für physikalische Chemie, Vol. 96, Nr. 3, S. 306–314, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1992

[Höpfner et al., 1998]

M. Höpfner, G.P. Stiller, M. Kuntz, T. v. Clarmann, G. Echle, B. Funke, N. Glatthor, F. Hase, H. Kemnitzer and S. Zorn: The Karlsruhe Optimized and Precise Radiative Transfer Algorithm, Part II: Interface to retrieval applications. SPIE Proceedings, Vol . 3501, S. 186-195, 1998

[Höpfner et al., 2000a]

M. Höpfner, C.E. Blom, T. v. Clarmann, H. Fischer, N. Glatthor, T. Gulde, F. Hase, C. Keim, K. Lessenich, C. Piesch, C. Sartorius and G.P. Stiller: MIPAS-STR data analysis of APE-GAIA measurements, Proc. of the Internat. Radiation Symp. IRS-2000, St. Petersburg, Russia, July 24-29, 2000 (in press)

[Höpfner et al., 2000b]

M. Höpfner, C.E. Blom, G. Echle, N. Glatthor, F. Hase and G.P. Stiller: Retrieval simulations for MIPAS-STR measurements, Proc. of the Internat. Radiation Symp. IRS-2000, St. Petersburg, Russia, July 24-29, 2000 (in press)

[Phillips, 1962]

D. Phillips: A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind, *J. Ass. Comput. Math.*, 9, S. 84-97, 1962

[Piesch et al., 1996]

C. Piesch, T. Gulde, C. Sartorius, F. Friedl-Vallon, M. Seefelder, M. Wölfel, C.E. Blom, and H. Fischer: Design of a MIPAS instrument for high-altitude aircraft, *Proc. of the 2nd internat. airborne remote sensing conference and exhibition, ERIM, Ann Arbor, MI, Vol. II, S. 199-208, 1996*

[Stiller et al., 1998]

G.P. Stiller, M. Höpfner, M. Kuntz, T. v. Clarmann, G. Echle, H. Fischer, B. Funke, N. Glatthor, F. Hase, H. Kemnitzer and S. Zorn: The Karlsruhe Optimized and Precise Radiative Transfer Algorithm, Part I: Requirements, justification and model error estimation. *SPIE Proceedings, Vol. 3501, S. 257-268, 1998*

[Tihkonov, 1963]

A. Tihkonov: On the solution of incorrectly stated problems and a method of regularization, *Dokl. Acad. Nauk SSSR*, 151, S. 501, 1963

[Trieschmann et al., 1999]

O. Trieschmann, F. Friedl-Vallon, A. Lengel, H. Oelhaf, G. Wetzel and H. Fischer, An advanced phase correction approach to obtain radiometric calibrate spectra of the optically well balanced balloon borne Fourier Transform Spectrometer MIPAS-B2, *SPIE Proceedings, Vol. 3756, S. 17-24, 1999*

[Norton, Beer, 1976]

J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, No. 3, S. 259-264, 1976

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Dreidimensionale Ansicht des Optikmoduls von MIPAS-STR.....	4
Abb. 2.2 Das FOV für Kanal 1 wie es in das Strahlungsübertragungsmodul in KOPRA eingeht.....	6
Abb. 2.3 Skizze der Geophysica-M55 mit Haube für MIPAS-STR und Schieber.....	7
Abb. 2.4 Doppelsequenz mit Atmosphären-, Schwarzkörper- und Weltraummessung ...	8
Abb. 2.5 Real- und Imaginärteil eines Spektrums (15 km Tangentenhöhe) nach der Phasenkorrektur	9
Abb. 2.6 Verlauf des „Gain“ entlang des Flugs für zwei Wellenzahlen	10
Abb. 3.1 Flugroute der Geophysica (gestrichelt) am 23.09. und Lage der Tangentenpunkte der MIPAS-STR Messungen (Sternchen) mit Temperaturfeld im 70 hPa-Niveau (K)	11
Abb. 3.2 Verlauf der Flughöhe mit der Zeit	12
Abb. 4.1 Übersicht von Inversionsrechnungen zur Temperatur mit drei verschieden starken Regularisierungen und zwei verschiedenen Startprofilen	15
Abb. 4.2 Abgeleitete Temperaturprofile am 23.09.1999 bei 67,7 °S und 58,8°W	18
Abb. 4.3 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den dritten und neunten Auswertefenster der Temperatur in zwei Tangentenhöhen	19
Abb. 4.4 Temperaturprofil von MIPAS mit Fehlerbalken bei 67,5°S und 59,1°W am 23.09.1999	20
Abb. 4.5 Zweidimensionale Verteilung der Temperaturstartwerte	22
Abb. 4.6 Berechnetes Temperaturprofil	22
Abb. 4.7 Temperaturprofile von MIPAS-STR und aus ECMWF-Daten bei 67,5°S und 59,1°W	23
Abb. 4.8 Vergleich von Temperaturen aus Retrieval und ECMWF-Daten.....	24
Abb. 4.9 Vergleich von Sondenaufstiegen (oben: Rothera, unten: Marambio) mit ausgewählten Temperaturfits	25
Abb. 4.10 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den dritten und achten Auswertefenster von HNO ₃ in zwei Tangentenhöhen	27
Abb. 4.11 vmr-Profile von HNO ₃ bei 67,5°S und 59,1°W	28
Abb. 4.12 HNO ₃ -Schnitt Hinflug.....	29
Abb. 4.13 HNO ₃ -Schnitt Rückflug	29
Abb. 4.14 HNO ₃ -Profile bei 58,8°S 65,5°W und bei 64,5°S 62,3°W und Startprofil aus mittleren Breiten	30
Abb. 4.15 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den Auswertefenster von ClONO ₂ in zwei Tangentenhöhen	32
Abb. 4.16 vmr-Profile von ClONO ₂ bei 67,5°S und 59,1°W	33
Abb. 4.17 ClONO ₂ -Schnitt Hinflug.....	34
Abb. 4.18 ClONO ₂ -Schnitt Rückflug	34
Abb. 4.19 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den dritten und achten Auswertefenster von O ₃ in zwei Tangentenhöhen	36
Abb. 4.20 vmr-Profile von Ozon bei 67,5°S und 59,1°W	37

Abb. 4.21 Ozon in Flughöhe von MIPAS-STR, FOZAN und ECOC	39
Abb. 4.22 O ₃ -Schnitt Hinflug.....	38
Abb. 4.23 O ₃ -Schnitt Rückflug	38
Abb. 4.24 Ozon: Vergleich ausgewählte MIPAS-Fits und FMI-Sonde.....	40
Abb. 4.25 Ozon aus Dive (ECOC-Messung) und ausgewählte MIPAS-Profil.....	41
Abb. 4.26 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den Auswertefenster von FCKW-11 in zwei Tangentenhöhen	43
Abb. 4.27 Spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenzahl für den Auswertefenster von FCKW-12 in zwei Tangentenhöhen	44
Abb. 4.28 vmr-Profil von FCKW-11 bei 67,5°S und 59,1°W	45
Abb. 4.29 vmr-Profil von FCKW-12 bei 67,5°S und 59,1°W	45
Abb. 4.30 Profil von FCKW-11 (links) und FCKW-12 (rechts) aus verschiedenen Breiten mit Startprofil aus mittleren Breiten und Profil von Hagar aus dem Dive ..	48
Abb. 4.31 FCKW-11 Hinflug.....	46
Abb. 4.32 FCKW-11 Rückflug	46
Abb. 4.33 FCKW-12 Hinflug.....	47
Abb. 4.34 FCKW-12 Rückflug	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Charakteristische Parameter des MIPAS-STR für den Flug am 23.09.99.....	5
Tab. 4.1	Parameter für die Berechnung der Temperaturprofile.....	17
Tab. 4.2	Parameter für die Profilberechnung von HNO ₃	27
Tab. 4.3	Parameter für die Profilberechnung von ClONO ₂	31
Tab. 4.4	Parameter für die Profilberechnung von O ₃	35
Tab. 4.5	Parameter für die Profilberechnung von FCKW-11.....	42
Tab. 4.6	Parameter für die Profilberechnung von FCKW-12.....	43

Abkürzungen

APE-GAIA	Airborne Polar Experiment - Geophysica Aircraft In Antarctica
BAS	British Antarctic Survey
ECMWF	European Centre for Medium range Weather Forecast
ECOC	Electrochemical Ozone Cell
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FTIR	Fourier-Transformation Infrarot (- Spektrometer)
FMI	Finish Meteorological Institute
FOV	Field Of View
FOZAN	Fast Ozone Analyser
FWHM	Full Width at Half Maximum
GPS	Global Positioning System
GMT	Global Mean Time
HAGAR	High Altitude Gas Chromatograph for Atmospheric Research
IFG	Interferogramm
IFME	Interferometerelektronik
ILS	Instrumental Line Shape
IMK	Institut für Meteorologie und Klimaforschung
KOPRA	Karlsruhe Optimized and Precise Radiative Transfer Algorithm
LOSE	Line Of Sight Elektronik
LTE	Local Thermodynamic Equilibrium
MIPAS	Michelson Interferometer für passive atmosphärische Sondierung
- B2	- Ballon
- FT	- Flugzeug Transall
- STR	- Stratosphärenflugzeug
mw	microwindow (engl. Abk. für Auswertefenster)
NESR	Noise-Equivalent Spectral Radiance
PSC	Polar Stratospheric Cloud
rms	root mean square
SAFIRE-A	Spectroscopy of the Atmosphere using Far Infrared Emission – Airborne
vmr	Volume mixing ratio

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Herbert Fischer für die Überlassung der interessanten Aufgabenstellung. Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Priv. Doz. Dr. Cornelis Blom für die Übernahme des Korreferats und die Ausdauer und Geduld bei der Betreuung dieser Arbeit bedanken. Herr Dr. Michael Höpfner hat mir bei den vielen Berechnungen sehr geholfen. Er hat für die dabei auftretenden Probleme und andere Anliegen immer ein offenes Ohr gehabt. Dafür danke ich ihm sehr herzlich.

Mein Dank gilt allen, die darüber hinaus zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Corneli Keim und Wolfgang Kimmig danke ich für ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft. Ich bedanke mich bei allen MIPAS-STRlern und den Ballonis für die Beantwortung vieler Fragen und für die herzliche Aufnahme in ihre Gruppe. Und nicht zuletzt möchte ich mich bei denjenigen aus der AME-Gruppe bedanken, die es mir ermöglicht haben auf der „DEC“ zu rechnen.

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und die verwendete Literatur vollständig angegeben habe.

Karlsruhe, 20. Dezember 2000

.....

(Katrin Lessenich)