

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6729

**Entwicklung und Verifikation der
Sichtlinienstabilisierung für MIPAS auf dem
hochfliegenden Forschungsflugzeug M55
Geophysica***

Corneli Keim

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

*Von der Fakultät für Physik der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2002

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

**Entwicklung und Verifikation der Sichtlinienstabilisierung
für MIPAS auf
dem hochfliegenden Forschungsflugzeug M55 Geophysica**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN
von der Fakultät für Physik der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl. Phys. Corneli Keim
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung

10. Mai 2002

Referent

Prof. Dr. H. Fischer

Korreferent

Priv. Doz. Dr. C. E. Blom



Zusammenfassung

Das Fernerkundungsgerät MIPAS-STR (Michelson Interferometer für Passive Atmosphärische Sondierung - Stratosphärenflugzeug) bestimmt vertikale Konzentrationsschnitte der meisten für das Klima und die Ozonchemie relevanten, atmosphärischen Spurengase. Es wird auf dem hochfliegenden Flugzeug M55-Geophysica eingesetzt. Dadurch können Emissionsspektren im mittleren infraroten Spektralbereich nach der Methode der Horizontsondierung unter verschiedenen Elevationswinkeln gemessen werden. Die vertikale Auflösung und die Qualität der gemessenen Spektren wird maßgeblich durch die Stabilität und Einstellgenauigkeit des Elevationswinkels auf dem bewegten Träger bestimmt. Die vorliegende Arbeit zeigt, wie diese Aufgabe für MIPAS-STR gelöst wurde. Es wird dargestellt, welche Information über die Stabilität und Genauigkeit des Elevationswinkels in den gemessenen Spektren enthalten ist.

Bei MIPAS-STR wird die Lage des Instruments mit einem hochpräzisen inertialen Navigationssystem gemessen. Im ersten Teil dieser Arbeit wird dieses Navigationssystem mit dem Navigationssystem der M55-Geophysica verglichen. Dadurch konnte die Präzision der Navigationssysteme analysiert werden.

Zur Kompensation der Lageänderungen wird die einfallende Strahlung über einen geregelt drehbaren Umlenkspiegel in das Instrument geleitet. Der zweite Teil dieser Arbeit widmet sich der Bestimmung des einzustellenden Drehwinkels und dem verwendeten Regelkreis. Es wird die funktionale Abhängigkeit des Elevationswinkels vom Drehwinkel, von statischen Einbauwinkeln und von den gemessenen Lagewinkeln entwickelt. Die Funktion wird nach dem Drehwinkel aufgelöst. Dieser wird zeitlich extrapoliert, um den Zeitpunkt der Lagewinkelmessung zu berücksichtigen. Des Weiteren wird gezeigt, wie die Einbauwinkel durch Messung ermittelt werden.

Im dritten Teil dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit die Information in den Spektren dazu verwendet werden kann, den Elevationswinkel zu bestimmen, unter dem sie aufgenommen wurden. Die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ist sehr gut bekannt und kann durch In-situ-Messungen nachgeprüft werden. Deshalb können die CO_2 -Linien im Spektrum genutzt werden, um von den drei Unbekannten Druckprofil, Temperaturprofil und Elevationswinkel mindestens eine zu bestimmen. Druck- und Temperaturprofile können auch den Analysedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) entnommen werden.

Es wird gezeigt, dass der Fehler der Elevationsregelung gegenüber dem Fehler der Lagemessung vernachlässigbar ist. Der Elevationsfehler durch die Lagemessung kann aus den Spektren bestimmt werden. Durch Berücksichtigung dieses Elevationsfehlers kann die Spurengasauswertung deutlich verbessert werden.

Abstract

Development and verification of the line of sight stabilisation system for MIPAS on the high-altitude aircraft M55-Geophysica

The remote sensing instrument MIPAS-STR (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding - Stratospheric aircraft) measures 2-dimensional cross sections of many atmospheric trace gases relevant to the climate and ozone chemistry. It is operated on board of the high-altitude aircraft M55-Geophysica. A limb sounding technique is used to detect mid-infrared emission spectra at several elevation angles. The quality of the measured spectra and the vertical resolution of the derived cross sections is strongly dependent on the stability and accuracy of the elevation angle. This thesis shows how the MIPAS-STR stabilisation was realised. The stability and accuracy information of the elevation angle contained in the measured spectra will be presented.

The attitude of the MIPAS-STR instrument is measured by an inertial navigation system of high precision. In the first part of this work the navigation system is compared with the navigation system used by the M55-Geophysica, so that the precision of the navigation systems could be analysed.

For compensation of the attitude variations, the incoming radiation is directed into the instrument using a controlled rotating mirror. The second part of the thesis focuses on the calculation of the rotation angle to be set and on the control circuit. The functional dependence of the elevation on the rotation angle, the static installation, and the measured attitude is derived. The rotation angle is obtained by inverting the function. This angle is extrapolated in time, so that the time of the attitude measurement is taken into account. Further, the determination of the installation angles by measurements is shown.

The third part of the thesis demonstrates how the spectral information can be used to determine the true elevation angle. The concentration of CO_2 is well known in the atmosphere and can be verified by in-situ measurements. The CO_2 lines in the spectra can therefore be used to determine at least one of the three unknowns: pressure profile, temperature profile and elevation angle. Pressure and temperature profiles can also be obtained from the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) data.

It is shown, that the error of the elevation control is negligible compared to the error of attitude measurement. The elevation angle error due to the attitude measurement can be determined from the atmospheric spectra. By considering this elevation error, the trace gas retrieval is improved considerably.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Kapitel 1 Einleitung	1
Kapitel 2 MIPAS-STR: ein gekühltes, flugzeuggetragenes Fouriertransformationsspektrometer	3
2.1 Die Messgeometrie	7
2.2 Die Optik	9
2.2.1 Das Spektrometer	9
2.2.2 Das Teleskop	10
2.3 Elektronik und Datenfluss	12
Kapitel 3 Das Trägheitsnavigationssystem AHRS und dessen Test auf der Geophysica	15
3.1 Das AHRS: ein schulerabgestimmtes Trägheitsnavigationssystem mit GPS-Stützung	15
3.2 Das Navigationssystem der Geophysica	17
3.3 Vergleich der Rollwinkel von AHRS und GNS	17
3.3.1 Datenaufbereitung	17
3.3.2 Der Flug am 7.1.1997 von Rovaniemi nach Spitzbergen und zurück	19
3.3.3 Der Flug am 23.9.1999 von Ushuaia aus nach Süden und zurück	23
3.3.4 Der Flug am 2.10.1999 von Ushuaia zur Antarktis und zurück: ein Flug mit einer Schulerschwingung	23
3.4 Frequenzspektrum des Flugzeug-Rollwinkels	26
3.4.1 Der Flug am 7.1.1997 von Rovaniemi nach Spitzbergen und zurück	26
3.4.2 Der Flug am 23.9.1999 von Ushuaia aus nach Süden und zurück	27
3.5 Kurze Zusammenfassung dieses Kapitels	28
Kapitel 4 Das Sichtlinien-Stabilisierungs-System	29
4.1 Die funktionale Abhängigkeit der Elevation von der Stellung des Scanspiegels	30
4.1.1 Die Auflösung der Elevation nach dem Scanwinkel - zur Stabilisierung der Elevation während eines Fluges	34
4.1.2 Die Auflösung der Elevation nach den Einbauwinkeln - zur Kalibrierung vor einem Flug	35
4.2 Der Aufbau der Elektronik und des Regelkreises	36
4.3 Die Datenverarbeitung im Flug: Die zeitliche Extrapolation des Scanwinkels und die Kompensation von Sprüngen in den ausgegebenen Lagewinkeln	40
4.4 Die Synchronisation von Elevationswinkeländerung und Interferogrammaufnahme	42

4.5	Beschreibung des Programms der Sichtlinienstabilisierung	44
4.6	Der Flug am 23.9.1999: Ergebnisse der Sichtlinienstabilisierung	46
4.6.1	Kalibrierung der Einbauwinkel	46
4.6.2	Bewertung der IFME-LOSE Synchronisation	47
4.6.3	Interferogramme, bei denen der Rand der Schieberöffnung innerhalb des FOV war	48
4.6.4	Die Stabilität des Elevationswinkels	53
Kapitel 5 Die Validierung der Sichtlinienstabilisierung durch Spektren		57
5.1	Vom atmosphärischen Signal zum Interferogramm	57
5.2	Vom Interferogramm zum kalibrierten Spektrum	58
5.3	Das 'Linie-für-Linie'-Strahlungsübertragungsprogramm KOPRA und das Inversionsmodul KOPRAFIT	60
5.3.1	KOPRA	60
5.3.2	Die Strahlungsübertragungsgleichung	61
5.3.3	KOPRAFIT	62
5.4	Elevationsbestimmung mit Hilfe von KOPRAFIT	63
5.5	Auswahl der Spektren für eine gemeinsame Korrektur der Elevation einer ganzen Limbsequenz	66
5.6	Bestimmung von Elevation und Temperaturprofil aus einer Sequenz	73
5.7	Elevationsabstand für einzelne Spektren	81
5.8	Streulicht	88
5.9	Verfahren zur Bestimmung eines streulichtkorrigierten Elevationsabstands	92
5.10	Bewertung und Vergleich mit der Rollwinkeldifferenz von AHRS zu GNS	97
5.11	Fehlerabschätzung	99
5.11.1	Fehler im Elevationsabstand durch Fehler im vmr von CO ₂	100
5.11.2	Fehler im Elevationsabstand durch Fehler im Temperaturprofil	101
5.11.3	Einfluss von Kalibrierung, Temperatur-Gradienten und Flughöhe	103
5.12	Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieses Kapitels	104
Kapitel 6 Offene Fragen und Ausblick		107
Literaturverzeichnis		109
WWW-Adressen		112
Anhang:		
Anhang A	Interferogramm-Kontrolle	113
Anhang B	Nichtlinearität des Detektors, Abschätzung des Fehlerbeitrags	117
Anhang C	Gewichtete Mittelung der Einzel-Elevationsabstände	119
Anhang D	Abbildungsverzeichnis	121
Anhang E	Tabellenverzeichnis	124
Anhang F	Symbole und Abkürzungen	125
Anhang G	Tabelle der Interferogramme	129

Kapitel 1

Einleitung

Neben Feuer, Wasser und Erde galt die Luft in der Antike als eines der vier Urelemente. Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts galt die Luft als einheitlich. Allerdings hatte man schon Ende des 17. Jahrhunderts entdeckt, dass Luft bei der Verbrennung eine Rolle spielt. Es dauerte noch fast ein ganzes Jahrhundert, bis Carl Willhelm Scheele, Antoine Laurent Lavoisier, Joseph Priestley und Henry Cavendish 1770-77 in Experimenten herausfanden, dass Luft aus zwei Bestandteilen besteht. Zu einem Fünftel aus 'Feuerluft', die bei der Verbrennung umgesetzt und dem Luftvolumen entzogen wird, und der 'verdorbenen Luft', in der weder Verbrennung noch Leben möglich ist. Heute lächeln wir darüber, suchen wir doch in der Luft nach Spurenstoffen, von denen nur ein einziges Molekül in einer Billion (10^{12}) Luftmolekülen zu finden ist.

Das Leben auf der Erde wird nicht nur durch die Hauptbestandteile der Luft geprägt, in seiner jetzigen Form wird es erst durch die Spurenstoffe in den verschiedenen Atmosphärenschichten ermöglicht. Neben reichlich vorhandenem Wasser (bis zu 4 %) sorgt Kohlendioxid, mit nur 370 ppmv (parts per million) vertreten, durch seine breite Absorption im Infraroten dafür, dass es auch nachts auf der Erde angenehm warm ist. Die Ozonschicht, in der das Ozon nur eine Konzentration von bis zu 10 ppmv erreicht, sorgt dafür, dass unser Erbgut nicht durch die energiereiche UV-Strahlung zerstört wird. Wegen der katalytischen Eigenschaft der Chlorradikale reichen aber auch sehr geringe Mengen an FCKWs aus, um das ganze Wunder anzugreifen.

Die Atmosphärenforschung versucht, mit immer besseren Modellen die Vorgänge in der Atmosphäre zu beschreiben. Mit Hilfe dieser Modelle können Vorhersagen zu unterschiedlichen Szenarien, z.B. verschieden starke Zunahmen der CO_2 -Emission, gewagt werden, die dann die Entscheidungsgrundlage für internationale Übereinkommen darstellen.

Zum Erstellen und Verifizieren dieser Modelle werden möglichst viele und vielfältige Messungen benötigt. Die verwendeten Messgeräte lassen sich aufgrund des Messprinzips in zwei Gruppen unterteilen: zum einen die 'In-situ'-Geräte, die direkt am Ort analysieren, und zum anderen die Fernerkundungsgeräte. Diese messen über mehrere Hunderte von Kilometern hinweg die Zusammensetzung eines Luftvolumens. Neben den Zeitreihen, die von bodengebundenen fernerkundenden Messstationen geliefert werden, bilden die Messungen von Ballonen und Flugzeugen ein weiteres wichtiges Standbein. Diese liefern zwar nur wenige Stichproben, aber bei Anwendung der Horizontsondierung mit einer deutlich besseren Höhenauflösung. Durch den Einsatz von Satellitengeräten kann eine kontinuierliche, die Erdoberfläche global abdeckende Messung erreicht werden. Aufgrund des großen Abstands von dem zu untersuchenden Luftvolumen und der hohen Umlaufgeschwindigkeit ist die horizontale Auflösung jedoch deutlich schlechter als bei Flugzeuggeräten. Die vertikale Auflösung wird weniger stark beeinträchtigt.

Das Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Forschungszentrums Karlsruhe betreibt und entwickelt Fernerkundungsgeräte auf den unterschiedlichen Plattformen. Die Geräte der MIPAS-Familie (Michelson Interferometer für passive atmosphärische Sondierung) [Fischer 1992], zu der auch das für diese Arbeit verwendete MIPAS-STR gehört, messen die Emission der Atmosphäre im mittleren infraroten Spektralbereich. Sie vereinen eine hohe spektrale Auflösung mit einer niedrigen Nachweisgrenze der atmosphärischen Emissionslinien. Dazu werden nicht nur die Detektoren, sondern auch die Interferometer gekühlt.

Aus den gemessenen Spektren werden Vertikalprofile der Mischungsverhältnisse der atmosphärischen Spurengase abgeleitet. Dazu muss die gemessene Emission den Höhenschichten zugeordnet werden. Einerseits wird hierzu mit Hilfe eines Teleskops das Gesichtsfeld des Messinstruments begrenzt und andererseits wird die Blickrichtung tangential zu einer Höhenschicht ausgerichtet. Die Bewerkstellung einer gut stabilisierten und bekannten Sichtlinie wird vor allem beim Einsatz auf dem Flugzeug durch die Vibrationen und Rollbewegungen erschwert. Die vorliegende Arbeit befasst sich in den beiden vorderen Teilen mit der Realisierung dieser Sichtlinienstabilisierung.

Zur Verifikation der Sichtlinienstabilisierung wird bei MIPAS-B2, der ballongetragenen Version von MIPAS, eine Sternkamera verwendet. Bei MIPAS-STR, das im Gegensatz zu MIPAS-B2 Messungen vor allem bei Tageslicht durchführt, kann diese Methode der Validierung nicht verwendet werden. Für MIPAS-STR wurde deshalb untersucht, in wieweit aus den Spektren selber die Information über den Blickwinkel gewonnen werden kann, unter dem sie aufgenommen wurden. Der hintere Teil dieser Arbeit stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung vor.

Kapitel 2

MIPAS-STR: ein gekühltes, flugzeuggetragenes Fouriertransformationsspektrometer

In diesem Kapitel wird die Flugzeugversion der MIPAS-Experimente beschrieben. Dieses MIPAS-STR (Michelson Interferometer für passive atmosphärische Sondierung - Stratosphärenflugzeug) wird zusammen mit Instrumenten anderer Arbeitsgruppen in einem russischen Stratosphärenflugzeug, der M55-Geophysica, geflogen (Abb. 2.1). Mit MIPAS-STR werden vertikale Konzentrationsschnitte von atmosphärischen Spurengasen bestimmt.

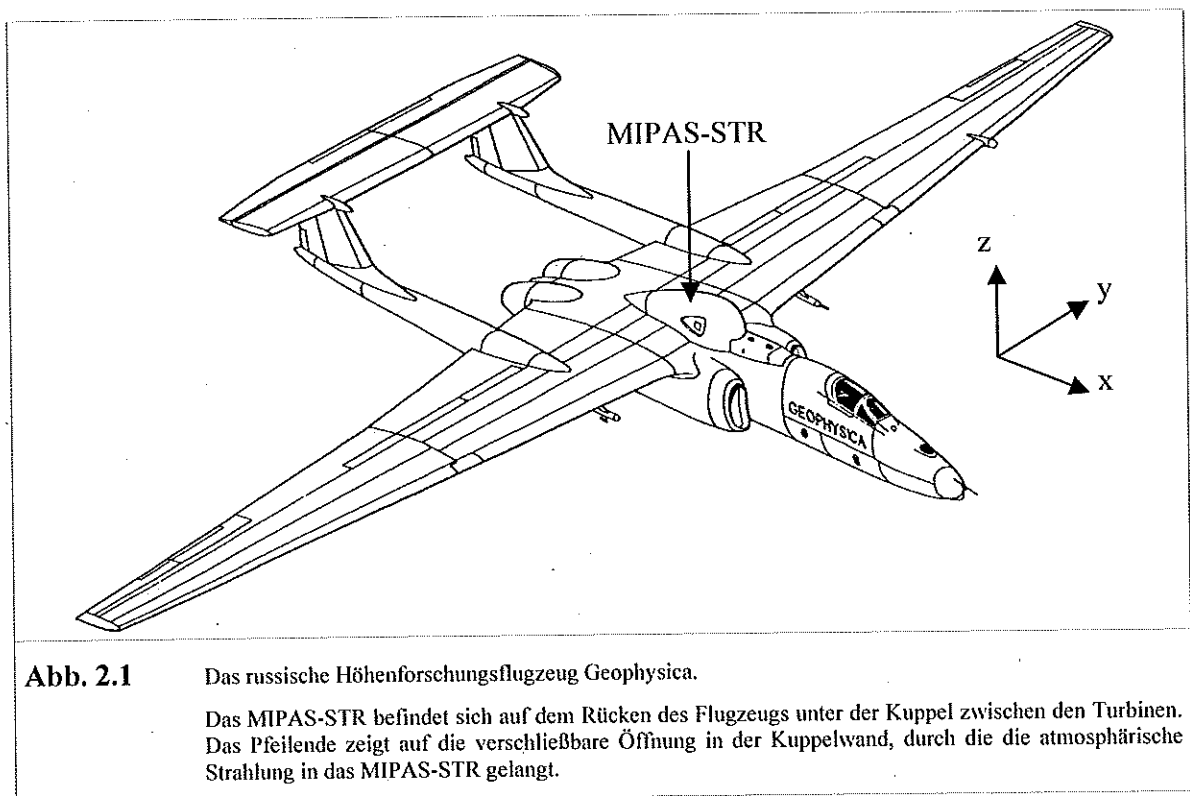


Abb. 2.1

Das russische Höhenforschungsflugzeug Geophysica.

Das MIPAS-STR befindet sich auf dem Rücken des Flugzeugs unter der Kuppel zwischen den Turbinen. Das Pfeilende zeigt auf die verschließbare Öffnung in der Kuppelwand, durch die die atmosphärische Strahlung in das MIPAS-STR gelangt.

MIPAS-STR misst die Emission atmosphärischer Spurengase, wie z.B. O_3 , CO_2 , NO_y -Verbindungen und FCKWs, im mittleren Infrarot (770 cm^{-1} bis 1940 cm^{-1}). Dazu werden mit der Methode der Horizontsondierung (s. Abb. 2.2) unter verschiedenen Blickwinkeln Interferogramme aufgenommen. Der Raumwinkel, aus dem die gemessene Emission stammt, wird durch die Optik begrenzt (Abschnitt 2.2.2). Dadurch kann eine gute Höhenauflösung erreicht werden.

Aus den gemessenen Interferogrammen werden Spektren gewonnen (Abschnitt 5.2). Jedes Spektrum beinhaltet die Information über die Verteilung der Spurengaskonzentration entlang der Sichtlinie, also in den Atmosphärenschichten über der jeweiligen Tangentenhöhe. Zur Bestimmung eines Vertikalprofils wird eine Sequenz von Spektren benötigt, die bei verschiedenen Tangentenhöhen aufgenommen wurden. Durch ein globales Ausgleichsverfahren (Abschnitt 5.3) kann die modellierte Spurengaskonzentration in den einzelnen Atmosphärenschichten gleichzeitig an alle Spektren angepasst werden. Diesem Vertikalprofil wird die mittlere geografische Länge und Breite der Spektren zugeordnet. Durch räumliche Aneinanderreihung der einzelnen Vertikalprofile ergibt sich ein zweidimensionaler Konzentrationsschnitt entlang des Flugweges. Der in dieser Arbeit untersuchte Flug fand am 23. September 1999 im Rahmen der Messkampagne APE-GAIA [Carli et al. 2000] von Ushuaia (54,82° Süd, 68,32° West) aus statt. In Abb. 2.3 sind die Flüge der Kampagne dargestellt, bei denen MIPAS-STR atmosphärische Messungen durchgeführt hat.

In der Geophysica sind zwei einander ergänzende Fernerkundungsinstrumente eingebaut, SAFIRE-A und MIPAS-STR. SAFIRE-A misst im fernen Infrarot, wodurch komplementäre Spurengase erfasst werden können. Durch Einsatz beider Messgeräte können fast alle für die Ozonchemie relevanten Spurengase untersucht werden (s. Tabelle 2.1). Spurengase, die in beiden Spektralbereichen deutliche Signaturen haben, eignen sich zur Validierung der Geräte gegeneinander. Abb. 2.4 zeigt den Konzentrationsschnitt von Ozon am 23.9.1999, wie er aus den Messungen von MIPAS-STR bestimmt wurde. Abb. 2.5 zeigt zum Vergleich das Ergebnis aus Daten von SAFIRE-A. Beide Messungen zeigen das "Ozonloch" in 16-17 km Höhe und vergleichbare Mischungsverhältnisse ober- und unterhalb. Die Unterschiede lassen sich teilweise durch die unterschiedlichen Höhen- und Horizontalauflösung erklären. Bei 60000 s (UTC) taucht die Geophysica in die Troposphäre, die Geräte wurden zum Schutz vor der feuchten Luft unterhalb der Tropopause geschlossen. Die übrigen Lücken in der Messung von MIPAS werden durch den Ausfall des Geräts erzeugt.

	Tracer, Quellgase										NO _y			Cl _y			HO _x		Br _y					
	O ₃	O ₃ -Isotope (¹⁷ O, ¹⁸ O)	HF	N ₂ O	CFC1 ₃ , CF ₂ Cl ₂	CCl ₄ , CF ₄ , CHF ₂ Cl	H ₂ O	HDO	CH ₄	OCS	NO	NO ₂	N ₂ O ₅	HNO ₃	ClONO ₂	ClO	HCl	ClONO ₂	HOCl	OH	HO ₂	H ₂ O ₂	HBr	HOBr
MIPAS-STR	A	-	-	A	A	B	A	B	A	C	C	B	B	A	A	C ²	-	A	C	-	-	-	-	-
SAFIRE-A ¹	A	B	A	A	-	-	A	A	-	-	C	B	-	A	-	A ²	A	-	B	A ²	B	B	C	C

- A: Spezies, die „einfach“ zu messen sind. Die Integrationszeit pro Spektrum beträgt 10-60 s
 B: wie A. Die Integrationszeit pro Spektrum beträgt jedoch 1-10 min
 C: Diese Spezies sind schwierig zu messen, oder es ist eine lange Integrationszeit nötig.
¹: Abhängig vom verwendeten Detektor ist nur eine Auswahl simultan messbar.
²: Diese Spezies sind nur bei speziellen atmosphärischen Bedingungen messbar.

Tabelle 2.1 Die von MIPAS-STR und SAFIRE-A erfassbaren atmosphärischen Spurengase [Blom 1998].

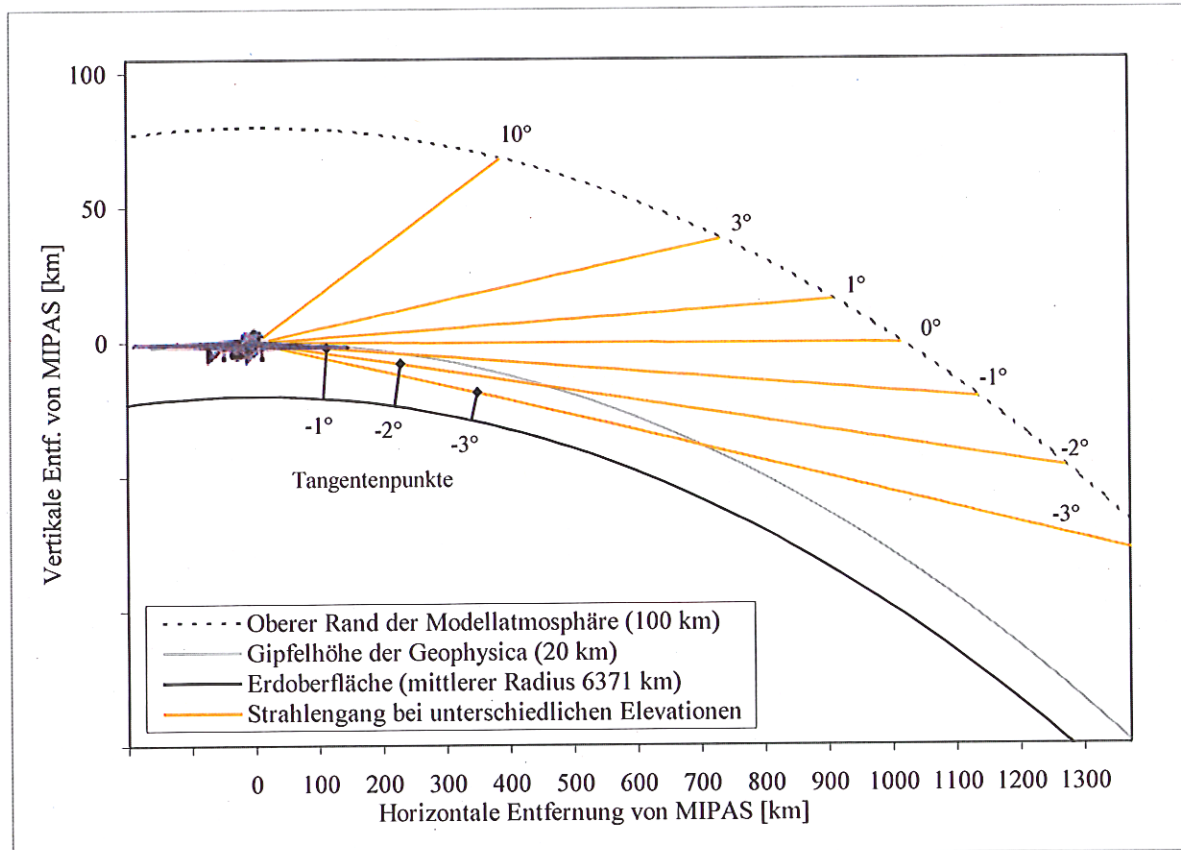


Abb. 2.2 Horizontsondierung unter verschiedenen Winkeln.

Die Abbildung zeigt die Messgeometrie bei MIPAS-STR. Die Atmosphäre wird unter verschiedenen Winkeln sondiert, diese Winkel sind im Bereich -3° bis $+10^\circ$ gegen die Horizontale. Am Tangentialpunkt ist der Abstand der Sichtlinie (orange) zur Erdoberfläche minimal. Die Schicht oberhalb des Tangentialpunktes liefert den größten Beitrag zu den Strahldichtespektren.

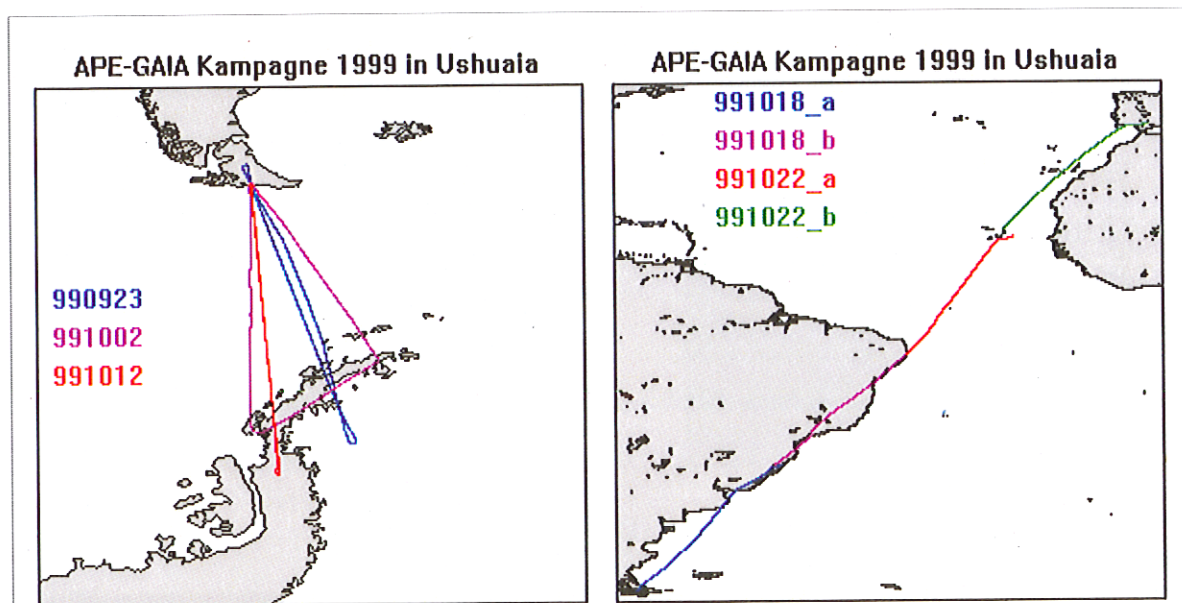


Abb. 2.3 Messflüge, die während der APE-GAIA Kampagne 1999 durchgeführt wurden.

Die linke Grafik zeigt alle antarktischen Flüge, die rechte Grafik die Transferflüge von Ushuaia zurück nach Europa (Sevilla). In dieser Arbeit wird der Flug vom 23.9.1999 (links, blau) näher betrachtet.

Das Fernerkundungsinstrument SAFIRE-A wird hier kurz erwähnt, da das Lagemesssystem AHRS des MIPAS-STR während der APE-POLCAT-Kampagne in Rovaniemi zusammen mit einer Datenerfassungseinheit in SAFIRE-A eingebaut war. Die Messungen im Januar 1997 waren einerseits für MIPAS nützlich, um das AHRS auf einem Flugzeug zu testen. Andererseits konnten aus dem Vergleich der Lageinformationen des AHRS und des im Flugzeug eingebauten GNS die Bewegungen von SAFIRE-A relativ zum Flugzeug abgeschätzt werden [Carli et al. 1999]. Durch den direkten Vergleich konnte auch die Genauigkeit der beiden Systeme untersucht werden (siehe Kapitel 3).

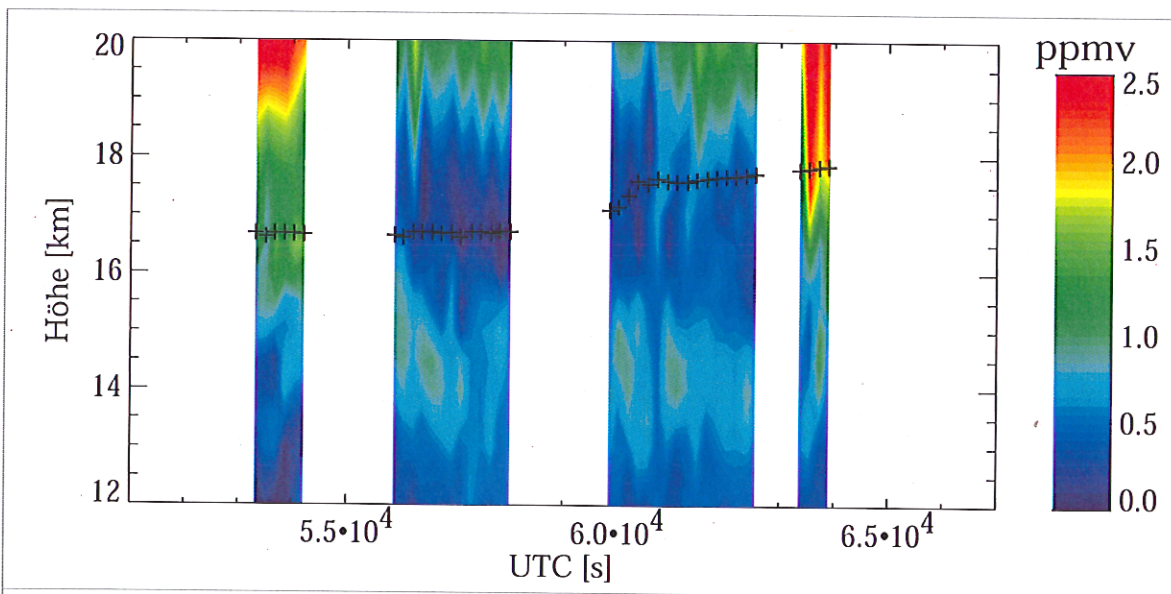


Abb. 2.4 Ein O₃-Schnitt am 23.9.1999, der aus den Daten von MIPAS-STR bestimmt wurde [Lessenich 2000].

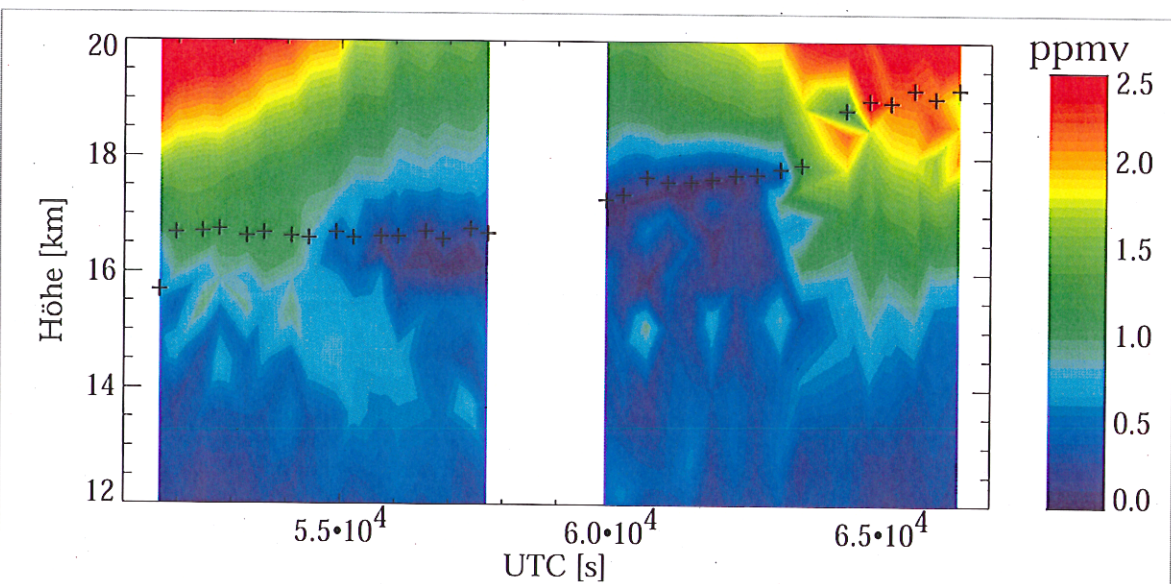


Abb. 2.5 Ein O₃-Schnitt am 23.9.1999, der aus den Daten von SAFIRE-A bestimmt wurde [Cortesi et al. 2001].

2.1 Die Messgeometrie

Beim Einsatz von MIPAS auf einem Ballon, der mit der zu analysierenden Luftmasse driftet, werden nur wenige Vertikalprofile bestimmt. Im Gegensatz dazu soll der Einsatz von MIPAS auf einem relativ zur Luft schnell (ca. 650 km/h) fliegenden Flugzeug möglichst viele Vertikalprofile entlang des Weges liefern, um eine gute horizontale Auflösung des Konzentrationsschnittes zu erreichen. Dadurch können horizontale Gradienten der Spurengaskonzentrationen nachgewiesen und Inhomogenitäten der durchflogenen Luft (z.B. Filamente oder die Wirbelgrenze) aufgelöst werden. Die Anzahl der gewonnenen Profile ist umgekehrt proportional zur Aufnahmedauer einer Interferogrammsequenz. Bei 19 Spektren pro Sequenz (s.u. und Abb. 2.6) und 10 Sekunden pro Interferogramm ergibt sich eine horizontale Auflösung in Flugrichtung von ca. 35 km.

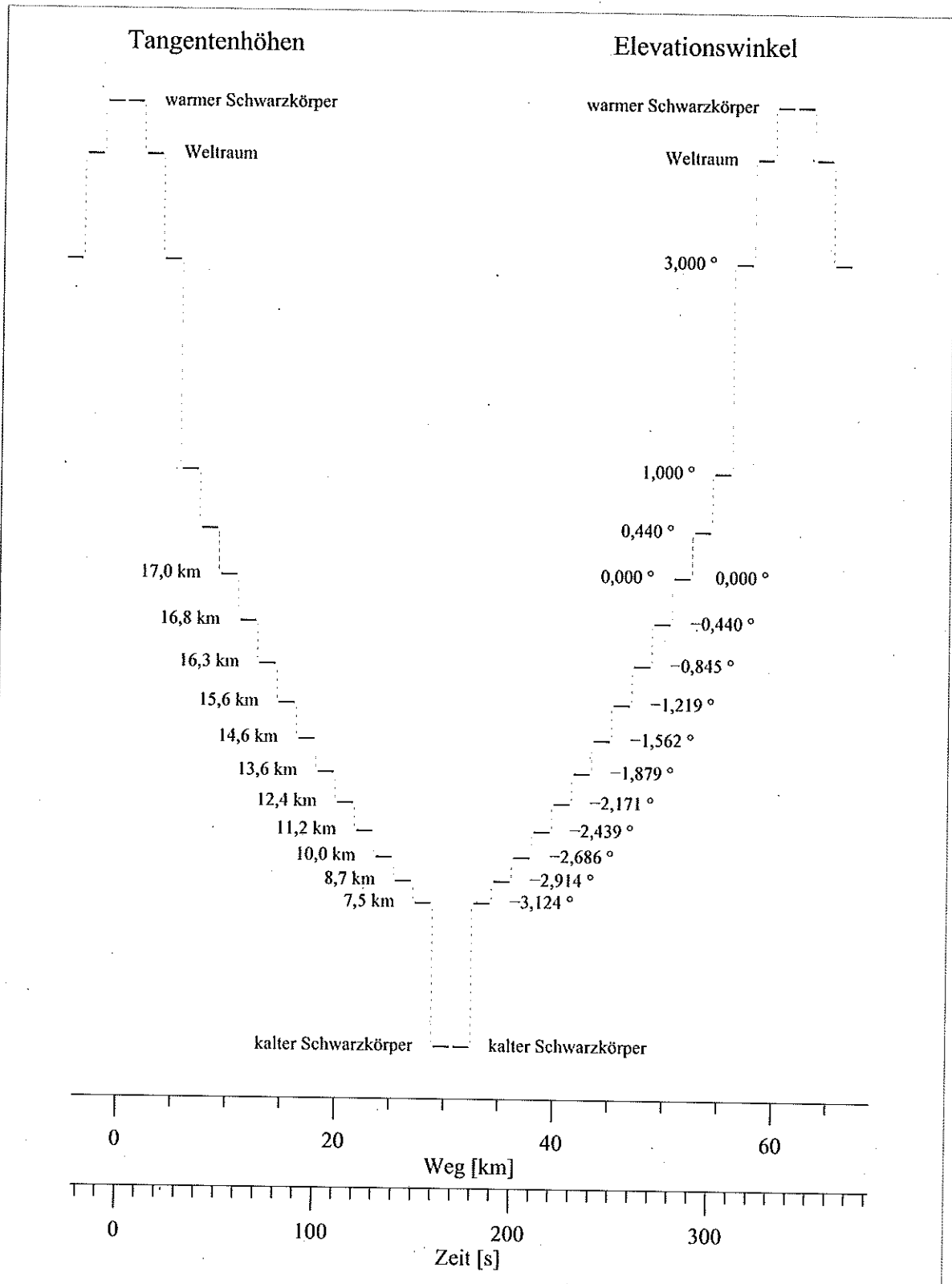


Abb. 2.6 Der Standard-Beobachtungsmodus des MIPAS-STR.

Die Elevation der Sichtlinie wird nach jedem aufgenommenen Interferogramm geändert. Das zugrundeliegende Schema wird abwechselnd vorwärts und rückwärts durchlaufen. Die Abbildung zeigt eine solche Doppelsequenz. Jede Sequenz (= halbe Doppelsequenz) beinhaltet neben den Atmosphärenmessungen auch Weltraum- und Schwarzkörpermessungen zur Kalibrierung. Die angegebenen Tangentenhöhen sind für eine Flughöhe von 17 km berechnet.

Bei konstanter Flughöhe ist die Vorgabe der Tangentenhöhe äquivalent zur Vorgabe des Elevationswinkels. Das Messprogramm ist deshalb eine periodische Aneinanderreihung einer Sequenz von verschiedenen Elevationswinkeln. Zu jedem Elevationswinkel wird ein einziges Interferogramm aufgenommen. Zur Kalibrierung der Spektren (Abschnitt 5.2) sind in jeder Sequenz Interferogramme enthalten, bei denen gegen die beiden internen Schwarzkörper gemessen wird. Um die Einstellungsdauer der verschiedenen Elevationswinkel zu optimieren, wird die Messsequenz mit einem „warmen“ (240 K) Schwarzkörperinterferogramm begonnen. Die Stellung des Scanspiegels entspricht dabei einer Elevation von $+90^\circ$. Dann folgen die Atmosphäreninterferogramme mit immer kleiner werdenden Elevationswinkeln ($+10^\circ$, 3° , ..., -4°), die Sequenz endet mit einem Interferogramm vom „kalten“ (200 K) Schwarzkörper, der einem Winkel von ca. -90° entspricht (siehe Abb. 2.8). Die folgende Sequenz wird rückwärts durchlaufen, da hierdurch einerseits die Spiegelverstellung von -90° nach $+90^\circ$ vermieden wird, und andererseits beim Mitteln von jeweils zwei Spektren zur gleichen Tangentenhöhe der mittlere Messort bei allen Tangentenhöhen gleich ist. Das Interferometer nimmt die Interferogramme abwechselnd vorwärts und rückwärts auf. Bei der Wahl der Sequenz ist es daher auch wichtig, dass die Interferogramme zu gleichen Elevationswinkeln abwechselnd vorwärts und rückwärts aufgenommen werden, um eventuelle Asymmetrien durch Addition von zwei Sequenzen ausgleichen zu können. Durch die Spiegelung der Sequenz ist dies automatisch gewährleistet.

2.2 Die Optik

2.2.1 Das Spektrometer

Ein Fourierspektrometer führt eine optische Fouriertransformation des Spektrums der einfallenden Strahlung durch. Das Prinzip des bei MIPAS-STR verwendeten Fourierspektrometers basiert auf dem Michelson-Prinzip. Die einfallende Strahlung wird mit einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt. Diese durchlaufen die optischen Arme des Interferometers, werden zurückgespiegelt und am Strahlteiler wieder zu einem Strahl zusammengeführt. Durch Verschieben der Spiegel kann die optische Weglänge in den Armen variiert werden. In Abhängigkeit von der Differenz der zurückgelegten Wege der Teilstrahlen führt dies zu einer Interferenzerscheinung, dem sogenannten Interferogramm (IFG), welches eine Funktion der optischen Wegdifferenz x ist. Mit Hilfe einer mathematischen Fouriertransformation kann die optische Fouriertransformation umgekehrt und eine Frequenzanalyse der eingefallenen Strahlung durchgeführt werden.

Das bei den MIPAS-Emissionsgeräten verwendete Interferometer [Burkert et al. 1983] ist eine Sonderform der Grundidee von Michelson. Durch die in Abb. 2.7 skizzierte Bauform wird eine achtfache Übersetzung von mechanischer Bewegung in optische Weglängendifferenz erreicht. Wesentliches Element ist dabei das Doppelpendel, an dessen Armen je eine Spiegelecke angebracht ist. Die beiden Teilstrahlen laufen zu jeweils einer Spiegelecke, werden dort umgelenkt und anschließend von den planen Retroreflektoren, die fest unter dem Strahlteiler montiert sind, in sich selbst zurückreflektiert. Hinter dem Strahlteiler interferiert der rekombinierte Strahl, wodurch am IR-Detektor ein analoges Helligkeitssignal entsteht. Zur späteren Verarbeitung wird das Signal abgetastet und digitalisiert. Die Bearbeitung der gespeicherten Interferogramme ist in den einleitenden Abschnitten von Kapitel 5 beschrieben.

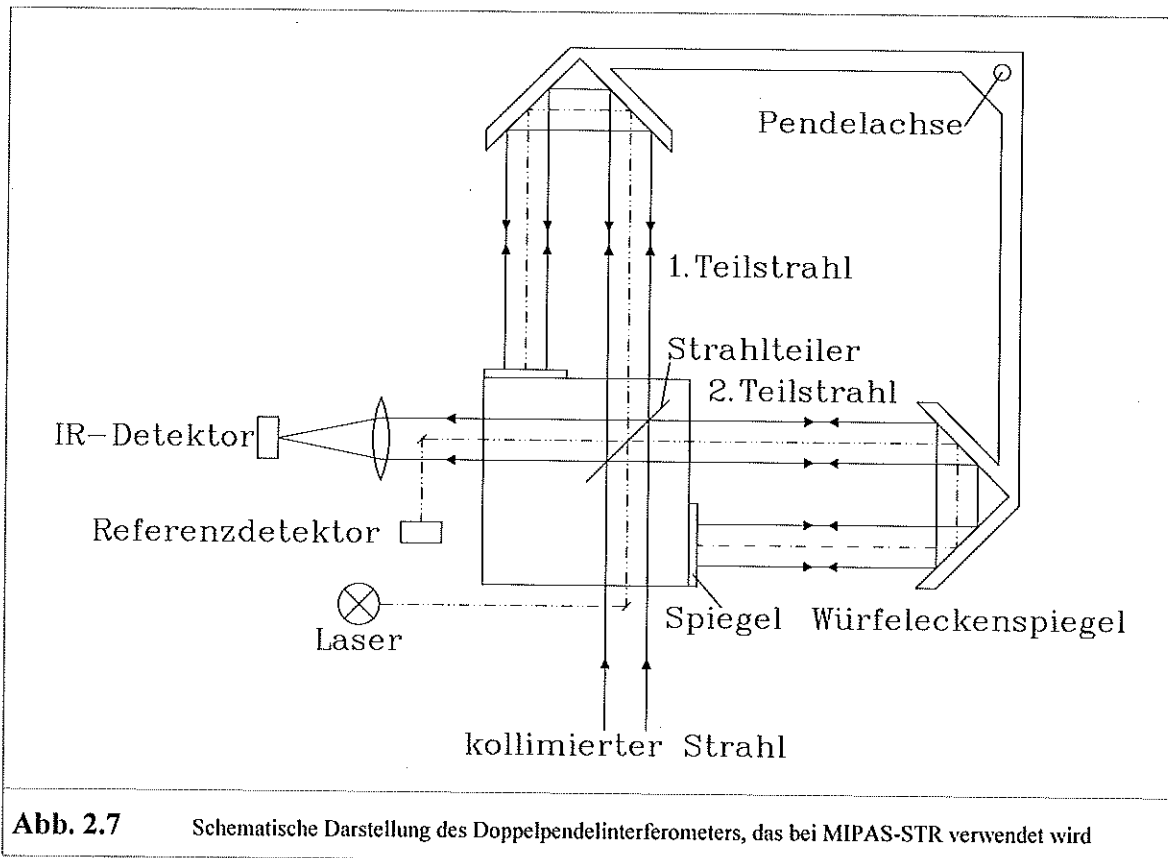


Abb. 2.7 Schematische Darstellung des Doppelpendelinterferometers, das bei MIPAS-STR verwendet wird

Zur Messung der Wegdifferenz x läuft parallel zum atmosphärischen IR-Strahl ein monochromatisches Laserbündel ($\lambda = 633\text{nm}$). Das am Referenzdetektor entstehende kosinusförmige Längenmess-Interferogramm $\text{LMI}(x) = \cos(2\pi x/\lambda)$ wird zur ortsäquidistanten Abtastung des IR-Interferogramms verwendet. Jeder zweite Nulldurchgang des LMI löst die analog-digital Wandlung des IR-Detektorsignals aus. Dieses Verfahren wird bei fast allen Labor-Interferometern und wurde bis 2001 bei der Ballonversion des MIPAS verwendet. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten der beiden Signale in den elektronischen Komponenten geschieht die Abtastung nicht exakt zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs des LMI, sondern um Δt später. Solange die dazugehörigen Abtastorte weiterhin genau eine Wellenlänge des Lasers auseinander liegen, kann der Versatz bei der Phasenkorrektur berücksichtigt werden.

Wie von W. Kimmig [Kimmig 2001] gezeigt wurde, ist bei Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit des Pendels diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt. Das oben beschriebene Abtastverfahren führt dann zu sogenannten Geisterlinien im Spektrum. 1996 wurde von J. Brault ein neues Verfahren vorgestellt, mit dem die Entstehung von Geisterlinien verhindert werden kann [Brault 1996]. Das IR-Detektorsignal wird nicht mehr ortsäquidistant, sondern *zeitäquidistant* abgetastet. Durch Interpolation wird das IR-Signal zum gemessenen Zeitpunkt des LMI-Nulldurchgangs rekonstruiert. Bei MIPAS-STR wird dieses Abtastverfahren nach Brault eingesetzt.

2.2.2 Das Teleskop

Der mit Trockeneis auf 200 K gekühlte Sensor von MIPAS-STR ist mechanisch in zwei Ebenen unterteilt (Abb. 2.8).

Die atmosphärische Strahlung fällt durch den geöffneten Schieber (in der Kuppel in Abb. 2.1) auf den drehbaren Scanspiegel (Kapitel 3) in der oberen Ebene. Dieser lenkt die Strahlung in das Teleskop um. Der linearisierte Strahlengang ist in Abb. 2.9 dargestellt. Das

Drei-Spiegel-Teleskop mit den abbildenden Spiegeln M_1 , M_2 und M_3 ($M_{1,3}$: paraboloidal, M_2 : toroidal) befindet sich ebenfalls in der oberen Ebene. Die optische Abbildungsqualität muss nicht extrem gut sein, aber die Strahlung muss möglichst vollständig auf die Detektoren fokussiert werden. Die Aufgaben des Teleskops sind

- das Störlicht zu unterdrücken und
- das externe vertikale Gesichtsfeld von $0,44^\circ$ (entspricht 3 km am tiefsten Tangentenpunkt) an den interferometrischen Raumwinkel anzupassen.

Das Übersetzungsverhältnis des Teleskops wird aus dem Gesichtsfeld des Teleskops und dem Gesichtsfeld des Interferometers (= Etendue / Aperturfläche) bestimmt. Bei einem nutzbaren Strahlteilerdurchmesser von 57 mm und einer Etendue von $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ sr cm}^2$ ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von 1,7 für das Teleskop.

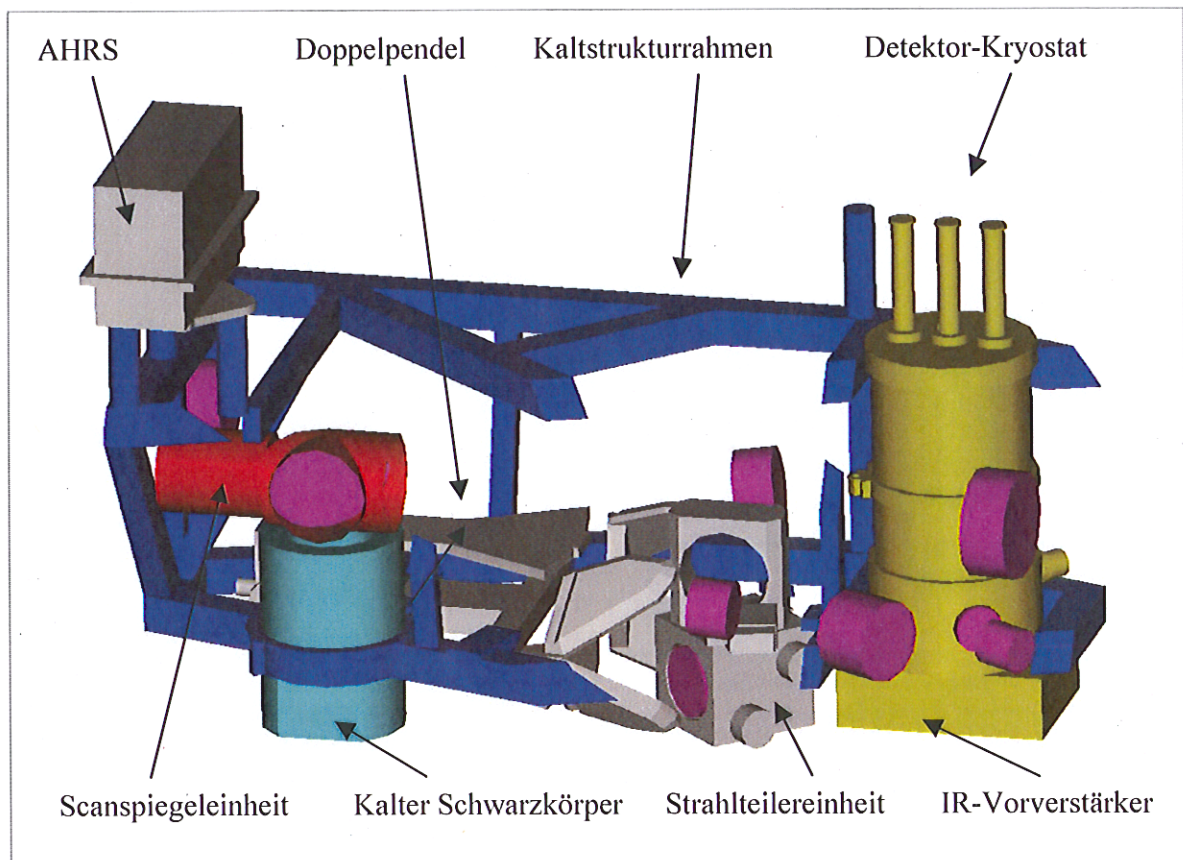


Abb. 2.8 3D-Ansicht des gekühlten Bereichs des Optikmoduls des MIPAS-STR.

In der oberen Ebene befinden sich die Scanspiegeleinheit (rot) und die Spiegel (lila) des Teleskops, in der unteren Ebene das DPI und in den Kryostat (gelb) eingebaut, die vier IR-Detektoren. Nicht dargestellt ist die umgebende Isolationswanne mit dem Schieber und dem warmen Schwarzkörper in der Deckplatte.

Zwei plane Faltungsspiegel (in Abb. 2.9 nicht dargestellt) koppeln die Strahlung aus dem Teleskop in der oberen Ebene in das Interferometer in der unteren Ebene ein. Das Doppelpendelinterferometer besteht aus einem Strahlteiler mit Kompensationsplatte BS, den Spiegelecken Triple_1 und Triple_2 und den zwei Retroreflektoren R_1 und R_2 . Über den sphärischen Spiegel M_4 und die Planspiegel F_3 und F_4 wird die rekombinierte Strahlung des Interferometers in den Detektorkryostat gelenkt. In der Detektoroptik wird die Strahlung mit dichroitischen Strahlteilern in die vier Wellenlängenbereiche (Kanäle 1 bis 4) aufgeteilt und nach optischer Filterung auf die vier Detektoren fokussiert. Die auf ca. 4 K gekühlten, optischen Filter begrenzen die Strahlung auf den interessanten Bereich jedes Kanals. Dadurch

wird die Anzahl der am Detektor ankommenden Photonen reduziert und somit das Photonenrauschen verringert.

Das Gesichtsfeld und die Apertur des Spektrometers werden über eine abbildende Optik im Detektorkryostat durch kalte Blenden (4 K) beschränkt. Die vergleichsweise warmen (200 K) Gesichtsfeldblenden FS₁ und FS₂, die Eintrittsaperturblinde AS₁ und der Lyotstop AS₂ im Teleskop dienen der Störlichtunterdrückung.

Die Gesichtsfeldblenden haben zusätzlich noch eine wichtige Funktion bei der Bestimmung der Sichtlinie. Durch ihre Mittelpunkte ist die optische Achse des Instruments definiert. Diese Achse bildet den Bezug bei der Messung des Gesichtsfelds jedes Detektors. Außerdem wird, wie in Kapitel 3 näher beschrieben, die optische Achse bei der Messung der Abhängigkeit der Blickrichtung von der Stellung des Scanspiegels als Referenz verwendet.

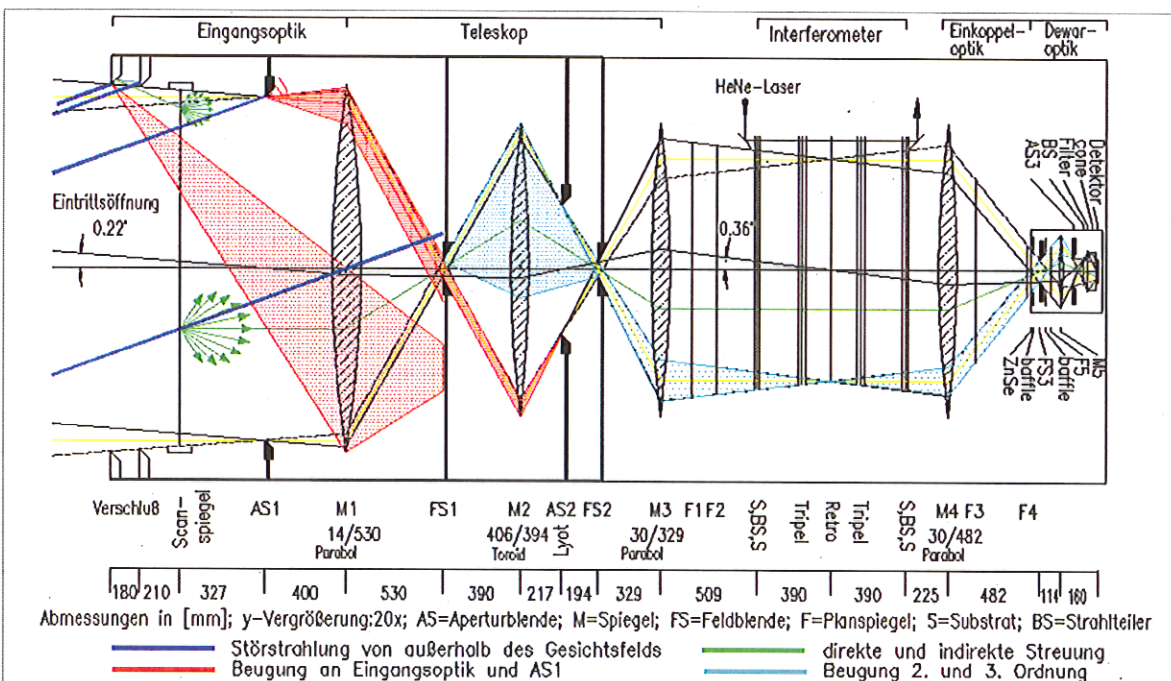


Abb. 2.9 Lineare Darstellung des optischen Strahlengangs des MIPAS-STR.

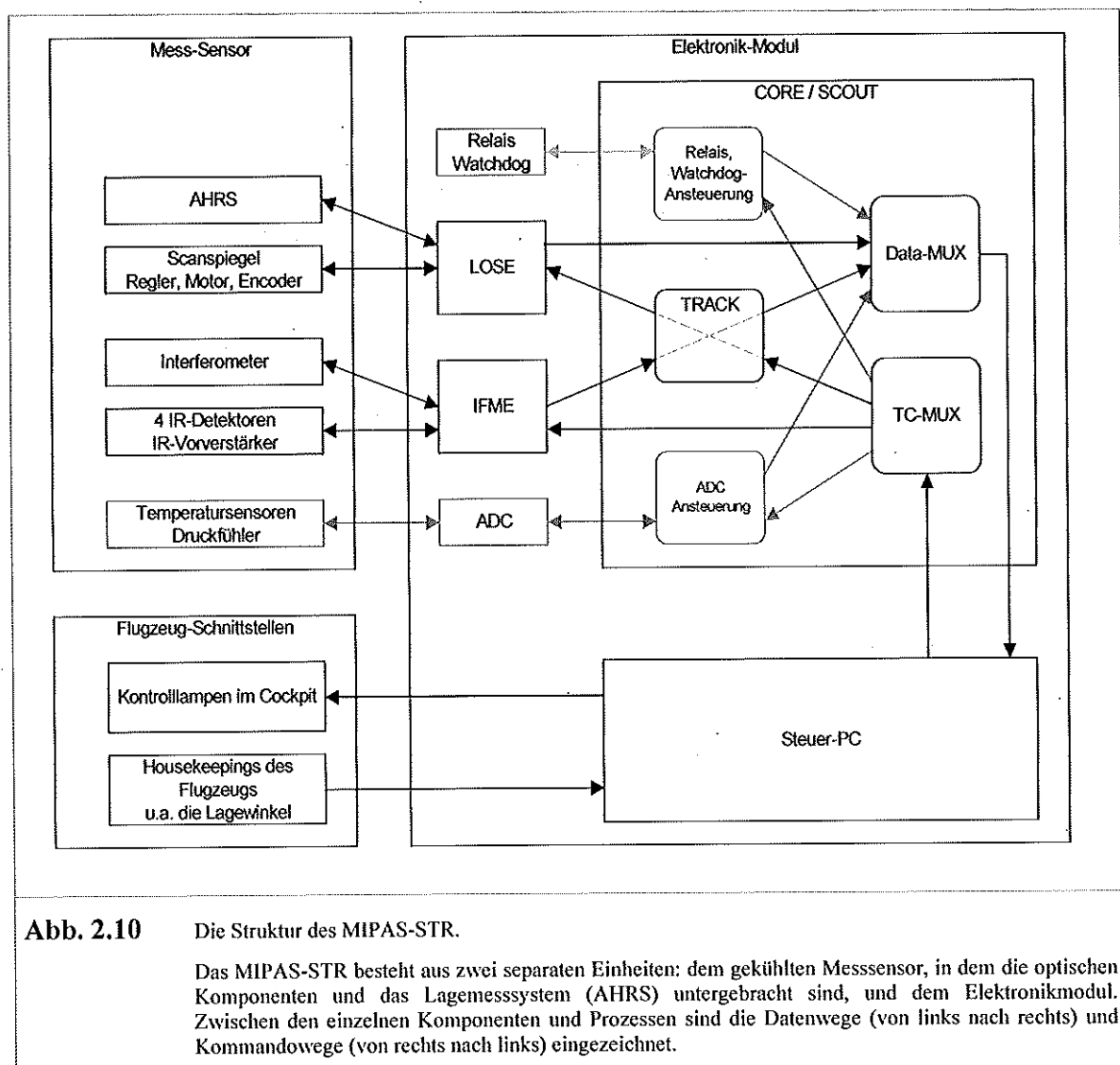
Die IR-Strahlung gelangt vom Scanspiegel über das Teleskop zum Interferometer und wird dann zur Detektoreinheit geführt. Das Gesichtsfeld (FOV) des Instruments wird durch die Blenden FS₃ und AS₃ definiert. Die Blenden AS₁ und FS₁ reduzieren die Strahlung von außerhalb des FOV. Die an den Blendenrändern gebeugte Strahlung wird von der Lyot- und der FS₂-Blende unterdrückt (aus [Piesch et al. 1996]).

2.3 Elektronik und Datenfluss

Das komplette MIPAS-STR Experiment (Abb. 2.10) besteht aus zwei mechanisch getrennten Teilen: dem Mess-Sensor (Optikmodul) und dem Elektronikmodul, das vom Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelt und realisiert wurde. Datenleitung und Stromversorgung zwischen den beiden Einheiten erfolgt über flexible Kabel. Die für diese Arbeit wichtigen Teile des Mess-Sensors sind das AHRS, die Scanspiegelsteuerung und das Interferometer.

Die Ansteuerung und Datenerfassung der einzelnen Komponenten soll unabhängig und parallel erfolgen, deshalb wurde die Elektronik aus mehreren vernetzten Prozessoren aufgebaut, denen jeweils eine begrenzte Menge an Prozessen zugeordnet ist. So ist z.B. der

LOSE-Prozessor hauptsächlich für die Regelung der Sichtlinie zuständig. Als Prozessortyp wurden für LOSE (Line of Sight Electronics) und CORE (Core Electronics) Transputer (T805 der Firma STMicroelectronics) ausgewählt. Diese RISC-Prozessoren waren zum Zeitpunkt der Entwicklung sehr leistungsfähig und sind aufgrund ihrer Architektur (vier Transputer-Links: schnelle, parallel ansteuerbare, serielle Schnittstellen) einfach zu vernetzen. Außerdem kommt ein Einplatinen-PC (VR5 der Firma SBS-or) zur Anwendung, der mit einem der CORE-Transputer über Link verbunden ist. Hiermit werden Aufgaben wie Speicherung der Daten auf die Festplatte, Anbindung des Gesamtsystems an das Intranet, Bildschirmausgabe, Ausführen des Flugprogramms im „Batch“-Betrieb realisiert, die auf Transputerbasis nur mit sehr hohem Aufwand möglich wären. Die IFME (Interferometer Electronics), die von der Firma Bruker gebaut wurde, besteht aus mehreren DSP (digitale Signalprozessoren), die über einen Transputer koordiniert werden. Dieser Transputer ist über einen seiner Links mit der CORE verbunden.



Die im Flug auf dem PC laufende Ablaufsteuerung steuert die Komponenten über Telekommandos. Diese 4byte-Kommandos enthalten Adresse, Befehl und optional einen Wert. Alle Kommandos werden vom PC an den CORE-Prozess TC-MUX gesendet, der sie anhand der Adresse an die einzelnen Komponenten verteilt. Gegenläufig werden alle

gemessenen Daten über einen Demultiplex-Prozess (Data-MUX) auf der CORE zusammengefasst und an den PC weitergegeben, wo sie dann auf der Festplatte gespeichert werden. Ein weiterer wichtiger CORE-Prozess ist der TRACK-Prozess, der die Elevationsänderung der Sichtlinie mit der Interferogrammaufnahme koordiniert. Dieser Prozess ist in Abschnitt 4.4 näher beschrieben. Des Weiteren sollen hier noch die beiden Schnittstellen zum Flugzeug erwähnt werden. Zum einen gibt es für jedes mitfliegende Experiment zwei Lampen (gelb und grün) im Cockpit der Geophysica, die vom jeweiligen Experiment angesteuert werden. Diese Lampen sollen den Piloten über den Zustand der Geräte informieren. Die zweite Schnittstelle kommt vom zentralen Rechner des Flugzeugs. Dort laufen alle Daten zusammen, die für den Flugbetrieb notwendig sind. Dies sind Navigationsdaten wie Geschwindigkeit und Lage, außerdem Umgebungsdaten wie Druck und Temperatur und sonstige Informationen. Diese Daten werden an alle Experimente weitergegeben. In Kapitel 2 werden diese Daten verwendet, wenn die Messung der Lagewinkel durch das AHRS mit der Messung durch die Geophysica verglichen wird.

Kapitel 3

Das Trägheitsnavigationssystem AHRS und dessen Test auf der Geophysica

Das Navigationssystem AHRS (Attitude and Heading Reference System), das im Experiment MIPAS-STR zur Bestimmung der Lage verwendet wird, wurde zunächst im Labor erfolgreich getestet. Danach bestand im Januar 1997 die Möglichkeit, das AHRS auf dem Stratosphärenflugzeug M55-Geophysica einzusetzen. Außer einem Kennenlernen des Flugzeugs und des Ablaufs der Flugvorbereitung sollte dabei vor allem ein Vergleich des AHRS mit dem Navigationssystem der Geophysica (GNS) vorgenommen und das Schwingungsspektrum der Geophysica im Flug gemessen werden. Deshalb wurde aus dem AHRS und Teilen des Elektronikmoduls (s. Abb. 2.10) eine selbstständige Einheit gebaut, die sowohl die Ausgabe des AHRS als auch die des Navigationssystems der Geophysica aufzeichnete. Im Rahmen der APE-POLCAT Kampagne in Rovaniemi [Stefanutti et al. 1999] wurde diese Einheit als Erweiterung des Experiments SAFIRE-A [Carli et al. 1999] in die Geophysica eingebaut.

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengestellt. Außerdem werden Messergebnisse beschrieben, die während der APE-GAIA Kampagne im September 1999 in Feuerland entstanden sind. Bei dieser Kampagne war das AHRS Bestandteil des MIPAS-STR Instruments.

3.1 Das AHRS: ein schulerabgestimmtes Trägheitsnavigationssystem mit GPS-Stützung

Aufgrund der Drehimpulserhaltung behält ein Kreisel seine Lage im Raum bei¹. Die Lage eines Objekts kann relativ zu der des Kreisels bestimmt werden. Ist die Kreiselachse zum Erdhorizont ausgerichtet, kann die Lage des Objekts auch relativ zum Erdhorizont bestimmt werden.

Wird der Kreisel drehmomentfrei entlang der gekrümmten Erdoberfläche bewegt, ändert sich seine Lage bezüglich des lokalen Erdhorizonts. Die Lage des Objekts kann ohne Kenntnis der Bewegung nicht mehr relativ zum lokalen Erdhorizont bestimmt werden.

Kombiniert man einen senkrecht ausgerichteten Kreisel mit zwei Beschleunigungssensoren, die die waagerechten Bewegungen messen, kann die Kreiselachse so nachgedreht werden, dass ihre Lage bezüglich des lokalen Erdhorizonts fixiert bleibt, s. Gleichung (3.1). Dieses Verfahren heißt Schulerabstimmung [Broxmeyer 1964].

¹ Dazu darf die Lagerung kein Drehmoment ausüben (cardanische Aufhängung) und der Kreisel muss so aufgezogen werden, dass die Rotation präzessions- und nutationsfrei um die Figurenachse erfolgt.

$$\begin{pmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{pmatrix} = \frac{1}{R} \int dt \int dt \begin{pmatrix} a_y \\ a_x \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

mit: $\alpha_{x,y}$: Nachdrehwinkel um x- bzw. y-Achse
 $a_{x,y}$: gemessene „waagerechte“ Beschleunigung in x- bzw. y-Richtung
 R : Pendellänge = lokaler Erdradius + Flughöhe

Durch Verwendung von zwei Kreisel, kann nicht nur die Lage des Objekts sondern auch seine Ausrichtung gegen Norden bestimmt werden.

Im Gegensatz zur cardanischen Version, bei der sich Kreisel und Beschleunigungsmesser auf einer realen Plattform im Innern eines dreiachsigen Cardanrahmens befinden, sind bei einem Strapdown-System (engl.: to strap down = festbinden) die Kreisel und Beschleunigungsmesser mit dem Gehäuse fest verbunden. Die Lage des Gehäuses wird relativ zu der nur virtuell im Rechner vorhandenen, horizontalen Plattform bestimmt. Bei einem Strapdown-System werden die Beschleunigungen in Richtung aller drei Achsen gemessen, die waagerechten Beschleunigungen werden durch Koordinatentransformation berechnet. Wird das Gehäuse gedreht, üben die Kreisel aufgrund der Drehimpulserhaltung Kräfte auf die Lagerung aus. Die im AHRS verwendeten Fesselkreisel werden durch eine elektromagnetische Gegenkraft gehalten. Die benötigte Leistung ist ein Maß für die Drehgeschwindigkeit mit der die virtuelle Plattform gedreht werden muss.

Nach Konvention (DIN 9300) ist das lokale, rechtshändige Erdkoordinatensystem, auf das die Lage eines Objekts bezogen wird, durch die in Richtung der Erdbeschleunigung weisende z-Achse und die waagrecht nach Norden weisende x-Achse gegeben.

Ein Fehler in der Horizontierung führt dazu, dass die vermeintlich waagerechten Beschleunigungen Anteile der Erdbeschleunigung enthalten. Das System scheint sich waagrecht zu bewegen, entsprechend wird die Plattform nachgedreht. Die Richtung der Nachdrehung ist dem ursprünglichen Horizontierungsfehler entgegengesetzt. Ohne Korrekturgröße entsteht dadurch die sogenannte Schulerschwingung.

Die von einem ruhenden System gemessenen waagerechten Beschleunigungen entstehen nur durch den Horizontierungsfehler. Bei einem Horizontierungsfehler in der Drehung um die y-Achse wird in x-Richtung die Beschleunigung

$$a_x = -g \cdot \sin(\gamma) \quad (3.2)$$

mit: g : Erdbeschleunigung
 γ : Horizontierungsfehler der virtuellen Plattform

gemessen. Einsetzen in Gleichung (3.1) liefert nach zweifachem Differenzieren:

$$\ddot{\gamma} = -\frac{g}{R} \sin(\gamma) \quad (3.3)$$

Damit schwingt die Plattform mit einer Periodenlänge $T_s = 2\pi\sqrt{R/g}$. Diese beträgt ungefähr 85 Minuten. Bei einem bewegten System ist diese Schwingung der wahren Bewegung überlagert.

Die Schulerschwingung in den Lagewinkeln tritt auch bei den Beschleunigungen auf (über Gleichung (3.2) sind die Winkel mit den Beschleunigungen verknüpft). Deshalb kann diese Schwingung gedämpft werden, indem das Integral der waagerechten Beschleunigungen mit unabhängig gemessenen horizontalen Geschwindigkeiten verglichen wird. Diese unabhängige Referenz kann mit einem GPS-Empfänger (GPS: Global Positioning System) bestimmt werden. Durch diese Stützung werden die Lagewinkel korrigiert [Maucher 1999].

Für MIPAS wurde ein solches GPS-gestütztes Strapdownsystem von der Firma SEG (System Entwicklungs- GmbH) in Riegel am Kaiserstuhl in Zusammenarbeit mit dem IMK entwickelt. Die Spezifikationen zu Azimut-, Roll- und Nickwinkel sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Weitere technische Angaben finden sich im Anhang.

Winkel	Symbol	Ausgaberate	Auflösung	Genauigkeit (3σ)
Azimut	Ψ	128 Hz	3,6"	0,9°
Roll	Φ	128 Hz	3,6"	1,5'
Nick	Θ	128 Hz	3,6"	1,5'

Tabelle 3.1 Die Spezifikationen des AHRS laut Hersteller SEG

3.2 Das Navigationssystem der Geophysica

Auf der Geophysica befinden sich neben einem Navigationssystem¹ (GNS) verschiedene Messsensoren, z.B. für Druck und Temperatur. Außerdem ist ein GPS installiert, das neben den Positionsdaten eine für alle Experimente einheitliche Uhrzeit (UTC) liefert. Für die Kommunikation der Flugzeugsysteme mit den Experimenten wurde eine Schnittstelle (UCSE = Unit for Connection with Scientific Equipment) realisiert, die die Daten dieser flugzeugeigenen Messsysteme zusammenfasst und den wissenschaftlichen Experimenten sowohl on-line als auch nach dem Flug zur Verfügung stellt.

Die Spezifikationen zu Azimut-, Roll- und Nickwinkel des Navigationssystems auf der Geophysica sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Winkel	Symbol	Ausgaberate	Auflösung	Genauigkeit (2σ)
Azimut	Ψ'	5 Hz	20"	$\leq 12'$
Roll	Φ'	50 Hz	20"	$\leq 6'$
Nick	Θ'	5 Hz	20"	$\leq 6'$

Tabelle 3.2 Die Spezifikationen des GNS laut Angaben im Investigators Handbook [MDB 1996]

3.3 Vergleich der Rollwinkel von AHRS und GNS

1.1.1 Datenaufbereitung

Um die Rollwinkel der beiden Navigationssysteme vergleichen zu können, sind zwei Bearbeitungsschritte erforderlich.

Erstens müssen die Daten auf gleiche Zeitstützstellen gebracht werden, da beide Systeme keinen direkten Zeitpunkt der Messung liefern. Des weiteren ist nicht bekannt, wie genau die Taktrate der Ausgabe ist. Da sowohl die Auflösung als auch die Ausgaberate des AHRS höher sind, werden diese Werte auf die GNS-Zeitpunkte interpoliert. Anschließend wird die

¹ Wie auf jedem Flugzeug gibt es ein zusätzliches, redundantes Navigationssystem. Es werden aber immer nur die Daten eines der beiden Systeme verwendet, so dass hier nur von einem System die Rede ist.

Zeitskala der AHRS-Daten verschoben und skaliert. Interpolation und Anpassung der Zeitskala werden solange wiederholt, bis die Varianz der Differenz zwischen den GNS-Rollwinkeln und den auf gleiche Stützstellen interpolierten AHRS-Rollwinkeln minimal ist.

Zweitens muss prinzipiell die durch den Einbau an verschiedenen Orten im Flugzeug entstandene Drehung der Systeme gegeneinander bestimmt und kompensiert werden. Da das Experiment an harten Federn zur Schockabsorption aufgehängt ist, kann sich seine Lage und Orientierung, und damit auch die des AHRS, bezüglich des GNS ändern.

Die Lage- und Orientierungsausgabe eines Navigationssystems beschreibt, wie das eigene, körperfeste Koordinatensystem gegenüber dem Referenzsystem Erde gedreht ist. Daher kann zu jedem Zeitstützpunkt eine Drehmatrix berechnet werden, die die vom GNS ausgegebenen Lagewinkel in das Koordinatensystem des AHRS überführt.

Sei ξ ein beliebiger Vektor, der sich in den Koordinatensystemen Erde, AHRS und GNS als ξ_E , ξ_A und ξ_G darstellt, dann gilt mit den Cardanwinkeln Ψ, Θ, Φ :

$$\begin{aligned}\xi_E &= D(\Psi, \Theta, \Phi) \cdot \xi_A \\ \xi_E &= D(\Psi', \Theta', \Phi') \cdot \xi_G \\ \xi_A &= D(\Psi_0, \Theta_0, \Phi_0) \cdot \xi_G\end{aligned}\tag{3.4}$$

wobei: Ψ, Θ, Φ die Lagewinkel des AHRS,

Ψ', Θ', Φ' die Lagewinkel des GNS und

Ψ_0, Θ_0, Φ_0 die Cardanwinkel der gesuchten Drehung sind.

$D(\Psi, \Theta, \Phi) = D_Z(\Psi) \cdot D_Y(\Theta) \cdot D_X(\Phi)$ gibt die Reihenfolge der elementaren Drehungen an.

Aus (3.4) kann man durch Umformen die gesuchte Drehmatrix

$$D(\Psi_0, \Theta_0, \Phi_0) = D^{-1}(\Psi, \Theta, \Phi) \cdot D(\Psi', \Theta', \Phi'),\tag{3.5}$$

und damit die gesuchten Cardanwinkel Ψ_0, Θ_0 und Φ_0 , die die Transformation der Lage des GNS in das AHRS-System angeben, entnehmen.

Um hochfrequente Schwingungen der Schockabsorber und das Rauschen der GNS-Ausgabe zu reduzieren, werden anschließend die berechneten Cardanwinkel über eine Minute gemittelt. Dies ist hilfreich zur Analyse von längerfristigen Trends.

Eine andere, bedeutend einfachere Methode ist es, die von beiden Systemen gemessenen Rollwinkel voneinander abzuziehen. Mathematisch entspricht das dem Festlegen der Cardanwinkel Ψ_0 und Θ_0 auf einen konstanten, durch den Einbau gegebenen Wert. Zur Unterscheidung wird der so bestimmte Winkel Φ_0 im Folgenden mit $\Delta\Phi$ bezeichnet.

Während der APE-POLCAT Kampagne in Rovaniemi, 1997, war das AHRS um 180° gedreht in SAFIRE-A eingebaut, also war $\Psi_{0,R} = 180^\circ$ und $\Theta_{0,R} = 0^\circ$. Daraus ergibt sich:

$$\Delta\Phi_R = \Phi' + \Phi\tag{3.6}$$

Bei der APE-GAIA Kampagne in Ushuaia, 1999, war das AHRS um 90° gedreht in MIPAS-STR eingebaut, also war $\Psi_{0,U} = 90^\circ$ und $\Theta_{0,U} = 0^\circ$. Daraus ergibt sich:

$$\Delta\Phi_U = \Phi' - \Theta\tag{3.7}$$

Genau wie bei den Cardanwinkeln wird auch über die Rollwinkeldifferenzen $\Delta\Phi$ nach der Berechnung über eine Minute gemittelt.

3.3.2 Der Flug am 7.1.1997 von Rovaniemi nach Spitzbergen und zurück

Plattformen, die permanent nach Norden ausgerichtet werden, haben erfahrungsgemäß bei ständiger Änderung der Flugrichtung eine schlechtere Genauigkeit der Lagewinkel als bei konstanter Flugrichtung. Die Schulerschwingung bildet sich bei konstanter Flugrichtung auf beiden Lagewinkeln unabhängig voneinander aus. Am 7.1.1997 flog die Geophysica von Rovaniemi aus zuerst geradlinig nach Nordwesten, und dann auf dem gleichen Weg wieder zurück. Dadurch eignet sich dieser Flug besonders gut, um systematische Probleme der Navigationssysteme zu finden.

Die Abb. 3.1 zeigt in den beiden oberen Diagrammen den Verlauf des Rollwinkels von AHRS und GNS. Genaues Betrachten zeigt, dass der Mittelwert des GNS-Rollwinkels nicht konstant ist. Er ändert sich bei der Änderung der Flugrichtung. Im unteren Diagramm ist der Unterschied zwischen den Rollwinkeln der beiden Systeme dargestellt. Auf der linken Achse ist der mit der exakten Methode bestimmte Drehwinkel Φ_0 aufgetragen. Die einfachere Differenzmethode liefert $\Delta\Phi_R$, der rechts aufgetragen ist. Die Kurven beider Verfahren laufen nahezu deckungsgleich, offensichtlich sind die für die Differenzmethode verwendeten Winkel für Ψ_0 und Θ_0 eine gute Näherung. Beim Ändern der Flugrichtung zeigt sich mit beiden Verfahren ein Sprung bei ungefähr 11:30 Uhr (UTC). Dieser Sprung muss von einem Fehler mindestens eines der beiden Navigationssysteme verursacht worden sein. Bildet man den Mittelwert über alle Werte vor und nach der Flugrichtungsänderung (Tabelle 3.3), fällt auf, dass der Sprung im Mittelwert der GNS-Ausgabe ($-0,193^\circ \rightarrow -0,480^\circ$) genauso groß ist, wie der Sprung im Cardanwinkel Φ_0 ($0,149^\circ \rightarrow 0,138^\circ$). Der Rollwinkel des AHRS springt quasi nicht ($0,342^\circ \rightarrow 0,344^\circ$).

Der Sprung in der Differenz der Rollwinkel der beiden Navigationssysteme kann zweierlei Ursachen haben:

- (1) Das Flugzeug ändert seinen Rollwinkel wirklich, z.B. weil es sich in den Wind legt. Dann misst das GNS richtig, die Ausgabe des AHRS ist fehlerhaft.
- (2) Das Flugzeug behält seine mittlere Lage bei, so wie es vom AHRS gemessen wird. Dann ist die Ausgabe des GNS fehlerhaft.

Stimmt (1), so muss bei der Umkehr im AHRS ein Offset auf dem Rollwinkel entstehen, der genauso groß ist, wie die reale Rollwinkeländerung, da er diese gerade kompensiert. Mit nur einem Flug liegt keine Statistik vor, und die Übereinstimmung zwischen dem Sprung in der Rollwinkeldifferenz $\Delta\Phi_R$ und dem Sprung in den Rollwinkeln Φ' des GNS kann natürlich Zufall sein. Trotzdem scheint Annahme (2) durch diese Überlegung bestätigt zu werden.

	Mittelwert vor Richtungsänderung	Mittelwert nach Richtungsänderung	Sprung im Mittelwert
Rollwinkel AHRS Φ	0,342°	0,344°	- 0,002°
Rollwinkel GNS Φ'	- 0,193°	- 0,480°	0,287°
Rollwinkeldifferenz $\Delta\Phi_R$ ¹	0,149°	- 0,135°	0,250°
Drehwinkel Φ_0 ²	0,149°	- 0,138	0,287°

Tabelle 3.3 Mittelwerte vor und nach Richtungsänderung, Flug am 7.1.1999

¹ Nach Gleichung (3.6)

² Nach Gleichung (3.4)

Eine weitere Fragestellung gilt der in Gleichung (3.3) beschriebenen Schulerschwingung. Da die beiden betrachteten Navigationssysteme vollkommen unabhängig sind, sind Phase und Amplitude der Schulerschwingung ebenfalls in beiden Systemen unabhängig. Sobald sich eine Schulerschwingung in mindestens einem der beiden Systeme ausbildet, sollte sie auch in den Rollwinkelunterschieden ersichtlich sein.

Im Verlauf der berechneten Cardanwinkel Φ_0 und der Differenzwinkel $\Delta\Phi_R$ (Abb. 3.1 unten) ist keine Schulerschwingung zu erkennen (zur Erinnerung: $T_S = 85$ min).

Der Verlauf der Kurven Φ_0 und $\Delta\Phi_R$ ist weder vor, noch nach dem Richtungswechsel um 11:30 Uhr (UTC) konstant. Die Aufhängung an Drahtseilfedern, die eine relative Bewegung des AHRS bezüglich des GNS ermöglicht, kann diesen Verlauf bewirken. Ferner brauchen die systematischen Fehler der beiden Navigationssysteme, die sich ebenfalls im Verlauf der Kurven widerspiegeln, nicht konstant zu sein.

Bisher wurde das langfristige Verhalten der Navigationssysteme während eines ganzen Fluges betrachtet. Im Folgenden sollen noch ein paar Vergleiche des kurzskaligen Verhaltens gezeigt werden.

Bei der obigen Betrachtung hat sich gezeigt, dass sich die Bestimmung der Drehwinkel nach Gleichung (3.4) kaum von einer einfachen Subtraktion (Gleichung (3.6)) unterscheidet. Nach der Bestimmung der Zeitzuordnung wurden die Rollwinkel der beiden Navigationssysteme in Abb. 3.2 auf die beiden Hochachsen verteilt. Die Achsen sind gegeneinander verschoben, die Skalierung ist jedoch identisch. Eine weitergehende Bearbeitung der Daten erscheint überflüssig.

Der in Abb. 3.2 dargestellte Ausschnitt zeigt eine relativ kleine und langsame Drehung des Flugzeugs um die Längsachse. Im ausgewählten Bereich sind die Kräfte auf die Federn, die die Lage des Instruments relativ zum Flugzeug ändern, vergleichsweise gering, da die Zentrifugalbeschleunigung proportional zum Quadrat der ersten Ableitung des Rollwinkels ist. Dennoch erkennt man, dass sich der von AHRS gemessene Rollwinkel nicht mit dem vom GNS gemessenen deckt. Der Winkelunterschied zwischen dem größten Winkel bei 40828 s bzw. 40845 s und dem kleinsten Winkel bei 40836 s beträgt beim AHRS $1,370^\circ$ bzw. $1,364^\circ$, und beim GNS $1,387^\circ$ bzw. $1,383^\circ$. Der daraus berechnete Unterschied zwischen AHRS und GNS beträgt $1,02'$ bzw. $1,14'$. Eine solche Diskrepanz kann sich aus einem gegenüber dem Koordinatensystem des GNS gedrehten Einbau des AHRS ergeben. Das Anpassen der Cardandrehung - unter Verwendung der Yaw- und Pitchmessung - liefert jedoch die mittleren Winkel $\Psi_0 = 180,023^\circ$, $\Phi_0 = -0,195^\circ$ und $\Theta_0 = 0,106^\circ$. Der gleichzeitig bestimmte Skalierungsfaktor für die Zeitachse beträgt 1,032. Die Cardanwinkel unterscheiden sich nur geringfügig von den nominellen Werten. Die Abweichungen sind nicht groß genug, um die unterschiedlichen Amplituden im Rollwinkel zu erklären. Der Unterschied in den Messungen der beiden Navigationssysteme scheint also ein Messfehler eines oder beider Systeme zu sein.

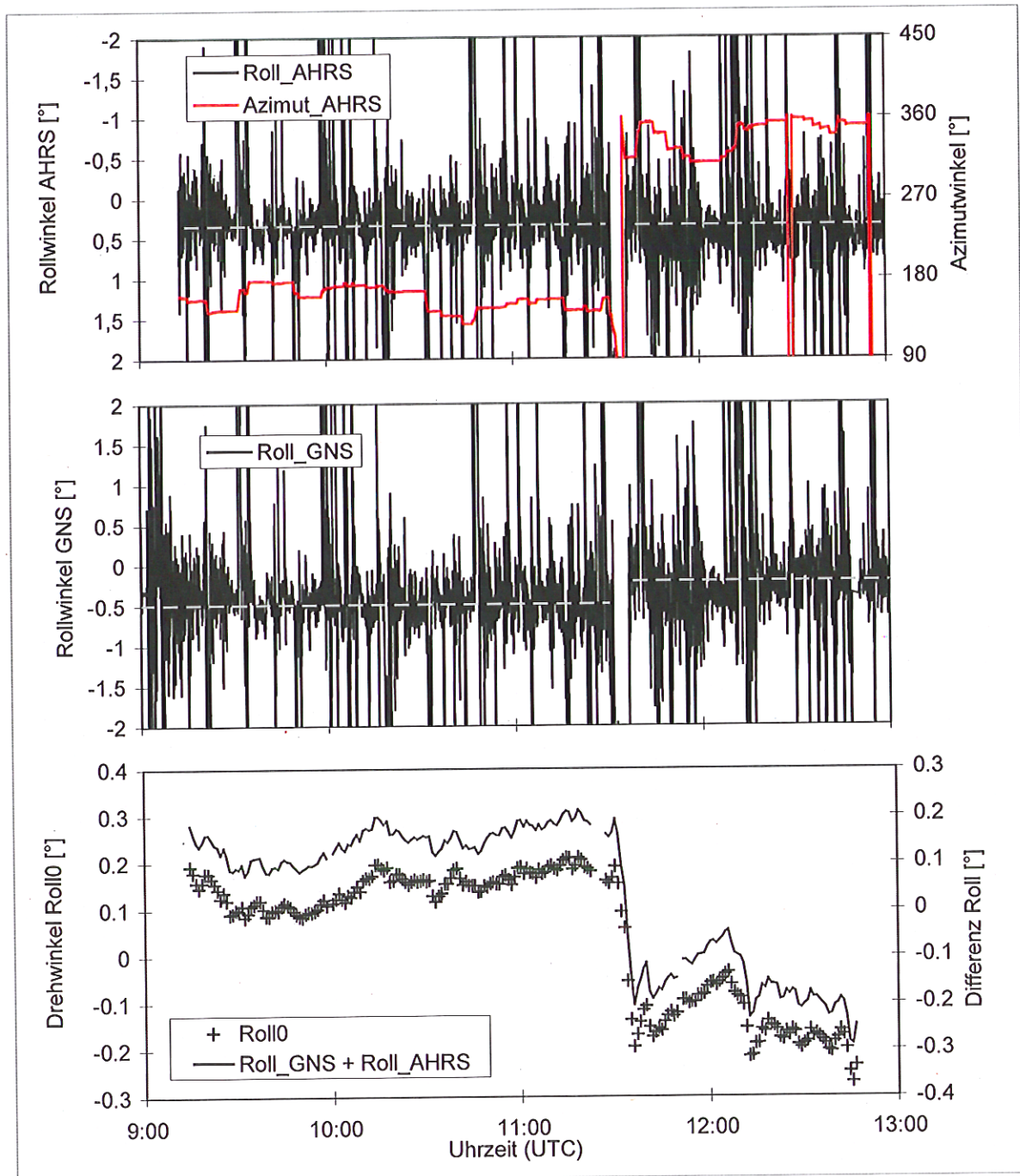


Abb. 3.1

Vergleich der Rollwinkel, gemessen von GNS und AHRS, am 7.1.1997 in Rovaniemi

Dargestellt ist in der oberen Abbildung der Rollwinkel, gemessen vom AHRS. Zusätzlich ist der Azimutwinkel aufgetragen, um die Änderung der Flugrichtung darzustellen. In der Abbildung darunter ist der vom GNS gemessene Rollwinkel dargestellt. In der untersten Abbildung ist der Rollwinkelunterschied dargestellt, bestimmt mit den beiden im Text beschriebenen Verfahren. Der Sprung bei etwa 11:30 Uhr (UTC) wird auch durch Vergleich der beiden oberen Abbildungen ersichtlich. Im Text wird näher darauf eingegangen.

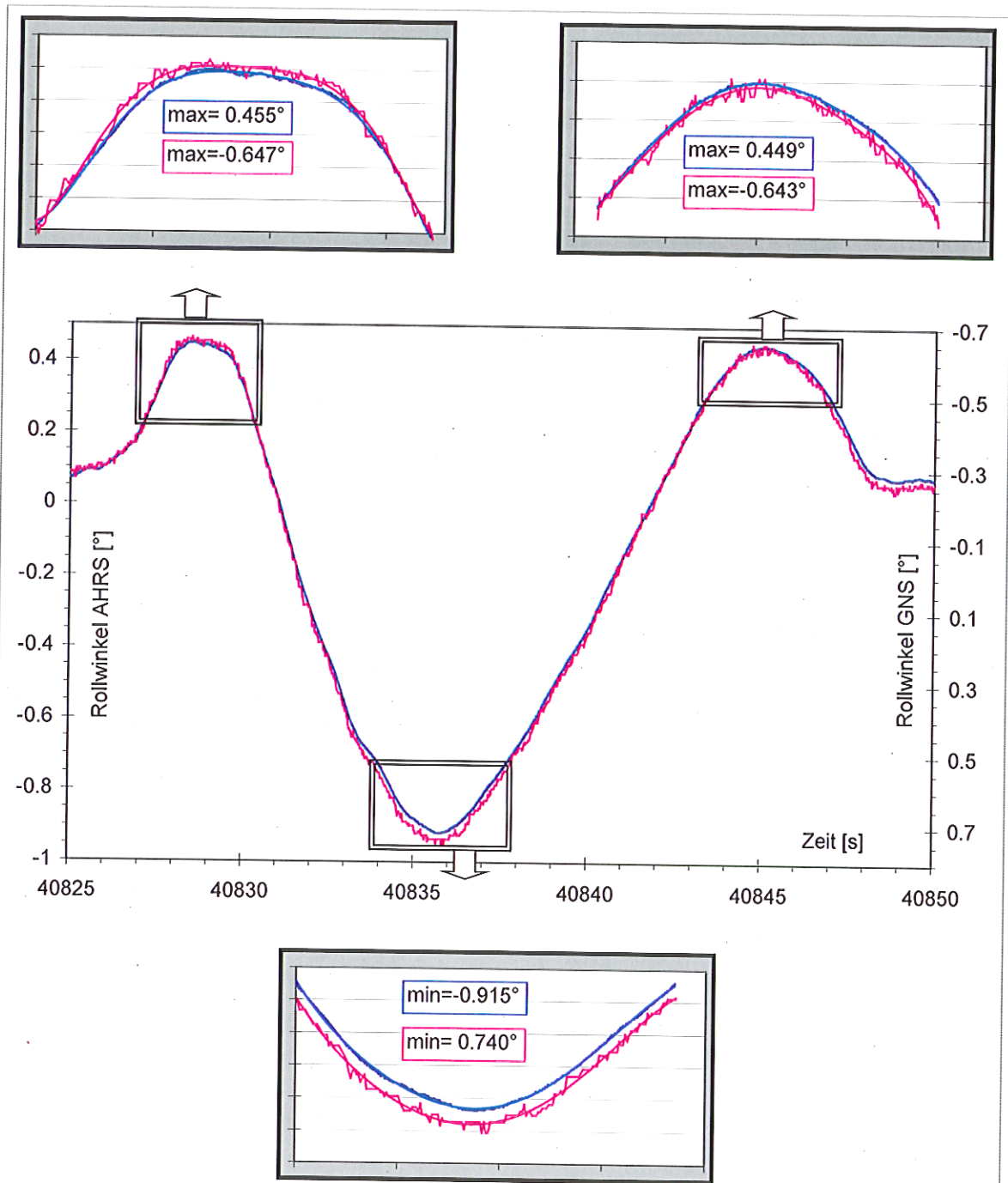


Abb. 3.2

Kurzskaliger Vergleich des Rollwinkels zwischen GNS und AHRS

Nicht nur bei Bildung von langzeitigen Mittelwerten unterscheiden sich die beiden Rollwinkelmessungen, auch in kürzeren Zeiträumen (hier 25 Sekunden) unterscheiden sich z.B. die Amplituden der Schwingungen. Außerdem ist hier deutlich das größere Rauschen des GNS zu erkennen. Im Text wird erläutert, dass die unterschiedlichen Amplituden nicht durch den Einbau zu erklären sind.

3.3.3 Der Flug am 23.9.1999 von Ushuaia aus nach Süden und zurück

Während der Kampagne 1999 in Ushuaia, Feuerland, Argentinien, war das AHRS Bestandteil des MIPAS-STR Instruments. Für die Diskussion bezüglich des Verhaltens der Navigationssysteme bei der Änderung der Flugrichtung ist der Flug am 23.9.1999 gut geeignet, da er dem Flug am 7.1.1997 recht ähnlich war. Von Ushuaia aus ging es nach Süden und nach einer 180°-Kehre auf dem gleichen Weg zurück nach Ushuaia (Abb. 2.3).

Wie für den Flug am 7.1.1997 wurden die Rollwinkelunterschiede mit den beiden Methoden bestimmt, für die Differenzmethode wird Gleichung (3.7) verwendet. Abb. 3.3 zeigt im oberen Diagramm den Verlauf des Rollwinkels des AHRS und im unteren Diagramm den Unterschied zum GNS. Die Mittelwerte sind in Tabelle 3.4 eingetragen. Im Gegensatz zum Flug in Rovaniemi ist bei diesem Flug in den Mittelwerten beider Systeme ein Sprung. Daher lassen sich hier nicht so leicht Argumente für den Fehler eines der beiden Navigationssysteme finden. Die Auswertung der am 23.9.1999 gemessenen Spektren hinsichtlich der bei der Messung eingestellten Sichtlinie (siehe Kapitel 4) bestätigt allerdings wiederum den Verdacht, dass der Fehler vom GNS verursacht wird.

	Mittelwert vor Richtungsänderung	Mittelwert nach Richtungsänderung	Sprung im Mittelwert
Nickwinkel AHRS Θ	0,230°	0,048°	0,182°
Rollwinkel GNS Φ'	0,548°	0,566°	- 0,018°
Rollwindeldifferenz $\Delta\Phi_R^1$	0,318°	0,518°	- 0,200°
Drehwinkel Φ_0^2	0,316°	0,526°	- 0,210°

Tabelle 3.4 Mittelwerte vor und nach Richtungsänderung, Flug am 23.9.1999

3.3.4 Der Flug am 2.10.1999 von Ushuaia zur Antarktis und zurück: ein Flug mit einer Schulerschwingung

Dieser Flug zeichnet sich dadurch aus, dass sich auf den Lagewinkeln des GNS eine Schulerschwingung entwickelte. Auf dem vom GNS gemessenen Rollwinkel ist eine ausgeprägte Schwingung zu erkennen. Der Vergleich mit dem vom AHRS gemessenen Nickwinkel deutet auf eine sich entwickelnde Schulerschwingung. In Abb. 3.4 ist der Teil des Fluges, der nach Süden ging, dargestellt. Durch die Bestimmung des Rollwinkelunterschieds werden die Flugzeugbewegungen eliminiert und es bleibt nur die Schulerschwingung übrig. Da die Flugrichtung im dargestellten Bereich konstant war, hat sich die Schwingung getrennt auf beiden Lagewinkeln ausgebildet. Die große Amplitude der Schwingung von einem Grad zeigt, wie wichtig es für ein Horizontsondierungsgerät ist, dass die Entstehung der Schulerschwingung verhindert wird.

¹ Nach Gleichung (3.7)

² Nach Gleichung (3.4)

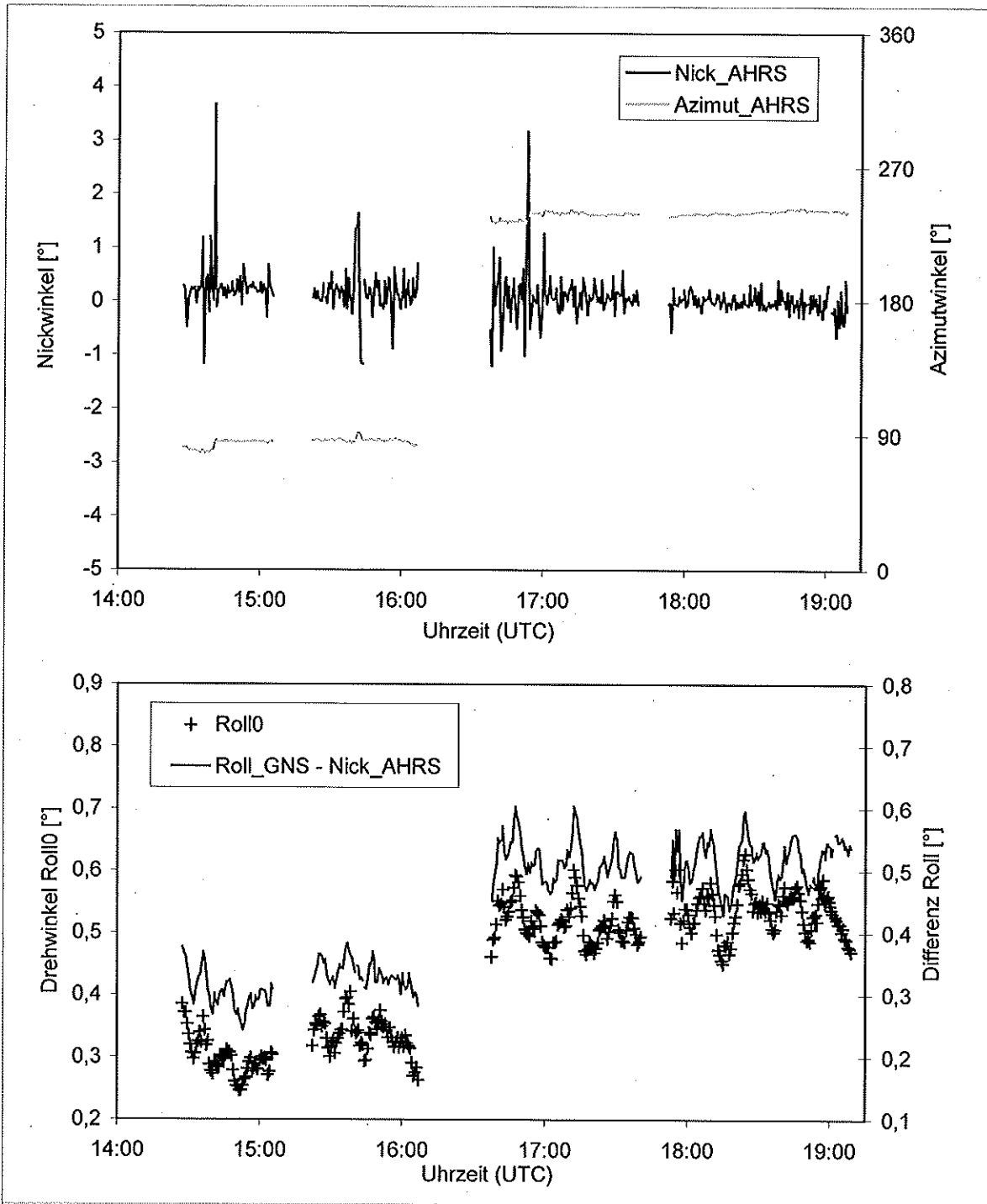


Abb. 3.3

Vergleich des Rollwinkels, gemessen von GNS und AHRS, am 23.9.1999 in Ushuaia

Dargestellt ist in der oberen Abbildung der Rollwinkel des Flugzeugs, gemessen vom AHRS (bedingt durch den Einbau, ist die Messgröße der Nickwinkel des AHRS). In der unteren Abbildung ist der Rollwinkelunterschied zum GNS dargestellt, bestimmt mit den beiden im Text beschriebenen Verfahren. Die exaktere bestimmt den Drehwinkel Φ_0 , der auf der linken Achse aufgetragen ist. Die einfachere Differenzmethode liefert $\Delta\Phi_U$, aufgetragen auf der rechten Achse. Das Ergebnis beider Verfahren ist ähnlich, die für die Differenzmethode verwendeten Winkel für Ψ_0 und Θ_0 sind offensichtlich eine gute Näherung. Wie schon am 7.1.1997 (Abb. 3.1) zeigt sich mit beiden Verfahren ein Sprung, am 23.9.1999 etwa um 16:30 Uhr (UTC).

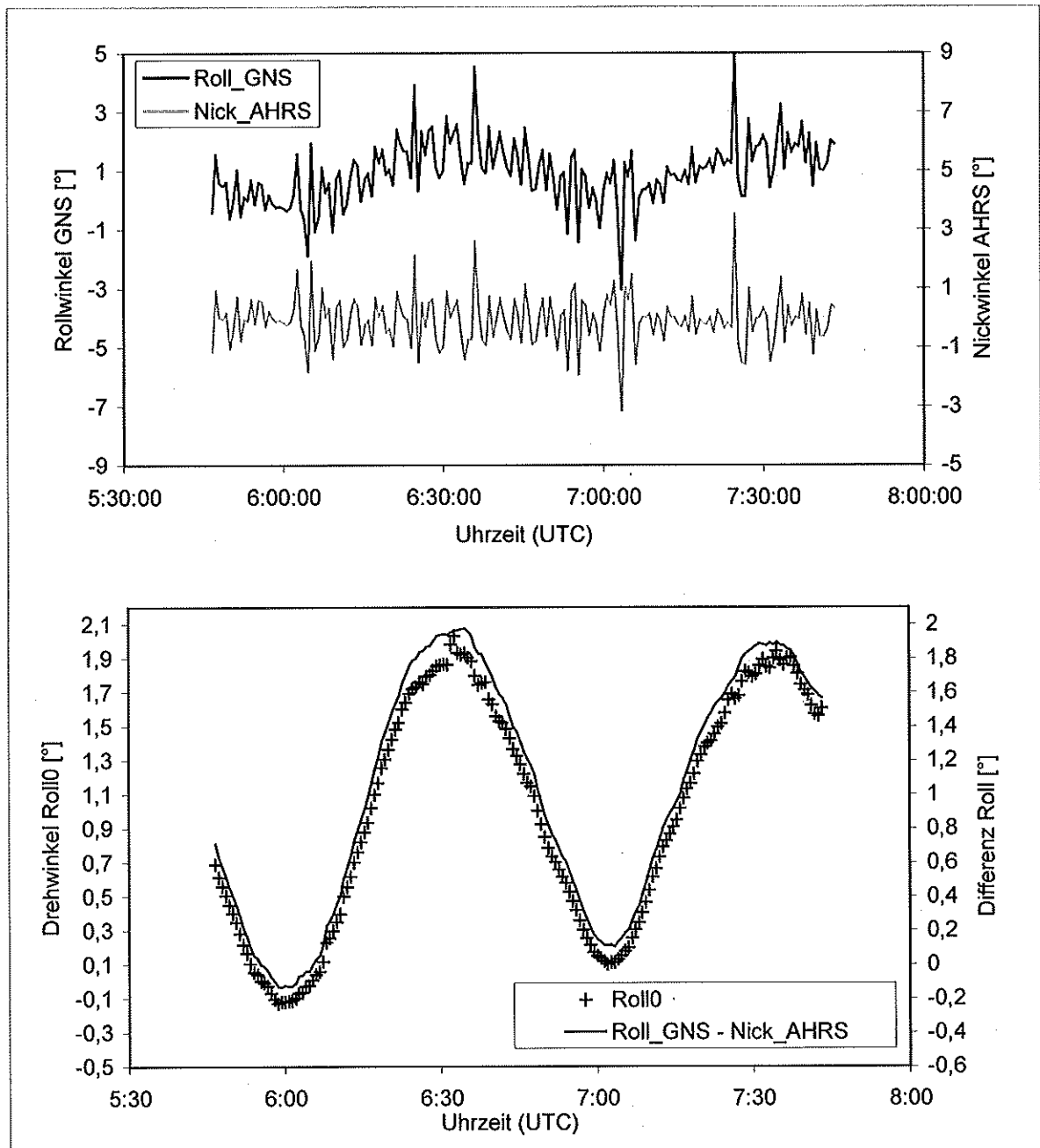


Abb. 3.4 Vergleich des Rollwinkels, gemessen von GNS und AHRS, am 2.10.1999 in Ushuaia

Im oberen Diagramm ist wieder der Rollwinkel des Flugzeugs dargestellt. Im Messwert des GNS ist die Schulerschwingung deutlich erkennbar. Bei der Bestimmung der Differenz (unteres Diagramm) fallen die wahren Flugzeuggewebungen weg und die Schwingung ist klar erkennbar. Die Periodenlänge der Schwingung von nur 65 min lässt sich ohne Kenntnis des inneren Aufbaus des GNS nicht erklären.

3.4 Frequenzspektrum des Flugzeug-Rollwinkels

3.4.1 Der Flug am 7.1.1997 von Rovaniemi nach Spitzbergen und zurück

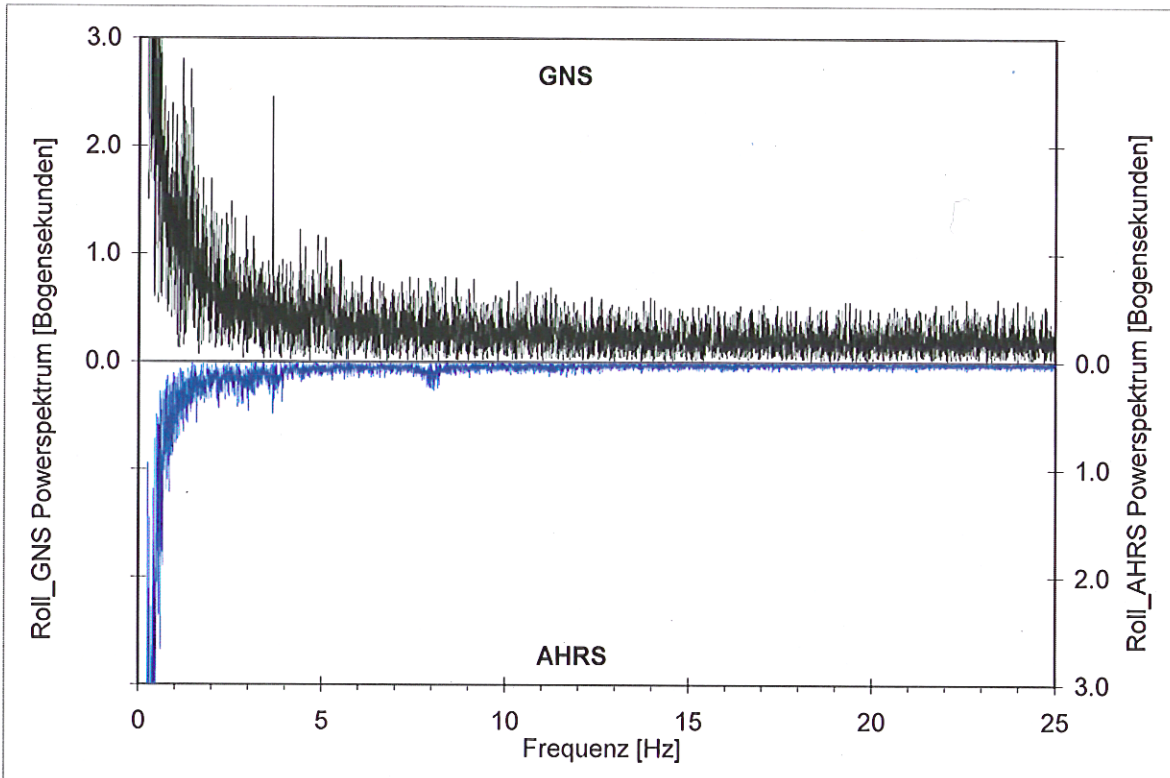


Abb. 3.5 Frequenzspektren der Rollwinkel, sowohl vom GNS als auch vom AHRS

Dargestellt ist das Magnitudenspektrum über eine relativ konstante Flugphase. Beim Vergleich fällt vor allem das größere Rauschen des Flugzeugnavigationssystems GNS auf. Dieses Rauschen verbirgt auch, ob die Signatur bei 8 Hz im Anregungsspektrum des Flugzeugs oder erst im Resonanzspektrum des SAFIRE-Gerätes existiert.

In Abb. 3.5 ist die Fouriertransformation der Rollwinkel, sowohl des GNS als auch des AHRS, vergleichend dargestellt. Aus dem Flug vom 7.1.1997 in Rovaniemi wurde ein Zeitabschnitt von 256 Sekunden gewählt, in dem die Geophysica geradeaus und auf konstanter Höhe flog, so dass sich im Frequenzspektrum keine ungewollten Artefakte¹ finden sollten. Man kann im Spektrum des AHRS-Winkels bei ca. 8 Hz eine deutliche Resonanzschwingung erkennen, die der Eigenfrequenz der Federdämpfer entspricht. Das Rauschen im Spektrum des GNS-Rollwinkels ist leider so groß, dass Resonanzschwingungen von der Amplitude, wie sie im AHRS Spektrum enthalten sind, darin untergehen.

¹ Bei einer Höhenänderung wird sowohl der Nickwinkel als auch die Turbinendrehzahl vorübergehend verändert. Da sich dadurch nicht nur das Resonanzspektrum ändern kann, sondern vor allem die Anregung geändert wird, sollen solche Bereiche möglichst nicht verwendet werden. Ähnliches gilt für eine Richtungsänderung, da diese mit großen Rollwinkeln verbunden ist.

3.4.2 Der Flug am 23.9.1999 von Ushuaia aus nach Süden und zurück

Der Flug am 23.9.1999 unterscheidet sich in mehreren Aspekten von dem Flug am 7.1.1997. Bei der APE-GAIA Kampagne, 1999, war das AHRS Bestandteil des MIPAS-STR Instruments. Bei der APE-POLCAT Kampagne, 1997, war es Bestandteil des SAFIRE Instruments. Im Gegensatz zum SAFIRE-Experiment, das sich in der Nase der Geophysica befindet, ist MIPAS-STR zwischen den Flügeln auf dem Rumpf (Abb. 2.1) montiert. In SAFIRE war das AHRS rückwärts, also die Längsachse um 180° zur Flugrichtung gedreht, eingebaut. In MIPAS-STR ist die Längsachse des AHRS um 90° zur Flugrichtung gedreht. Um das Frequenzspektrum eines Fluges in Ushuaia mit dem eines Fluges in Rovaniemi vergleichen zu können, wird deshalb der Nickwinkel des AHRS und nicht der Rollwinkel fouriertransformiert.

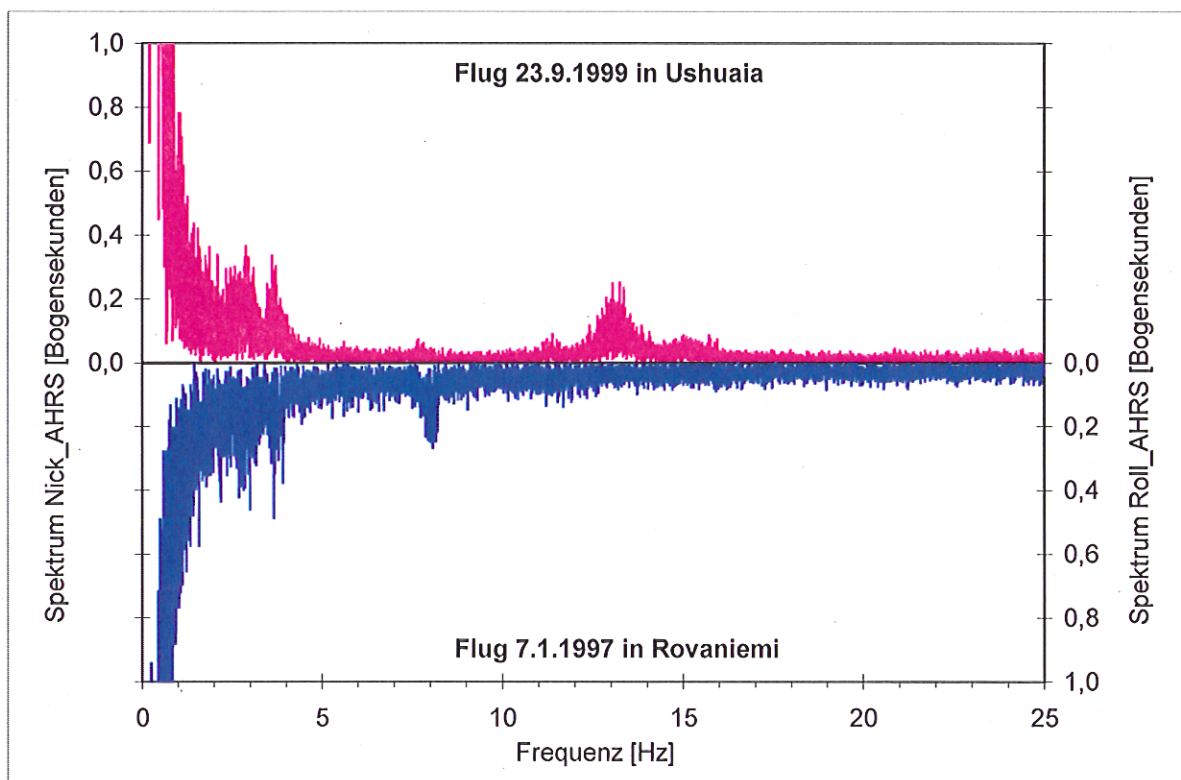


Abb. 3.6 Frequenzspektrum des vom AHRS gemessenen Rollwinkels der Geophysica

Der hier dargestellte Vergleich zeigt sowohl die bei der Kampagne in Rovaniemi als auch die in Ushuaia gemessenen Magnitudenspektren des Rollwinkels (zur Erinnerung: in Ushuaia misst der Nick des AHRS den Rollwinkel des Flugzeugs). Die Frequenzen unterhalb von 5 Hz scheinen von Bewegungen des Flugzeugs zu stammen, da sie in beiden Spektren ähnlich sind. Die Resonanz bei 13 Hz im oberen Spektrum entspricht der Eigenfrequenzen der Drahtseilfedern von MIPAS-STR, vermutlich gilt bei der Resonanz im unteren Spektrum entsprechendes für die Aufhängung von SAFIRE-A.

In Abb. 3.6 ist oben das Spektrum vom 23.9.1999 dargestellt, unten das schon beschriebene vom 7.1.1997. Deutlich zu sehen ist im oberen Spektrum die kleinere Amplitude der Resonanzschwingung in der Nähe von 8 Hz, und die Frequenzänderung derselben. Beide Effekte können dadurch erklärt werden, dass sich die Drahtseilfedern des MIPAS-STR Instruments von denen des SAFIRE Instruments unterscheiden. Die kleinere Amplitude kann zusätzlich daran liegen, dass der Abstand zu anregenden Eigenfrequenzen des Flugzeugs größer ist und dass die untersuchte Flugphase ruhiger war. Im Spektrum von Ushuaia tritt bei

13 Hz eine neue Resonanz auf. Diese entspricht in ihrer Frequenz der theoretischen Eigenfrequenz der Drahtseilfedern.

Beide Spektren haben eine wichtige Gemeinsamkeit: die Resonanz ist relativ breit. Das bedeutet, dass der Nickwinkel nicht durch eine Überlagerung von Sinusschwingungen mit diskreten Frequenzen approximiert werden kann. Hierauf wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

3.5 Kurze Zusammenfassung dieses Kapitels

Der Vergleich zwischen AHRS und GNS liefert im Wesentlichen zwei Erkenntnisse.

Die Differenz zwischen den Rollwinkelmessungen der beiden Systeme hängt von der Flugrichtung ab, d.h. bei einem der Systeme, vermutlich dem GNS, ist der systematische Fehler im Rollwinkel abhängig von der Flugrichtung.

Die Differenz bei konstanter Flugrichtung variiert um maximal 10 Bogenminuten. Teilweise kann diese Schwankung durch die Bewegung des Experiments in den Drahtseilfedern erklärt werden. Der größere Anteil entsteht aber vermutlich durch die systematischen Fehler in den Rollwinkeln der beiden Navigationssysteme. Der Vergleich der Rollwinkel liefert keine eindeutigen Hinweise, durch welches der beiden Systeme die Variation verursacht wird.

Die berechneten Winkeldifferenzen Φ_0 und $\Delta\Phi$ weisen am 7.1.1997 und 23.9.1999 keine Schulerschwingung auf. Am 2.10.1999 wurde eindeutig eine Schulerschwingung in den Lagewinkeln des GNS beobachtet. Die Entstehung einer Schulerschwingung in den Lagewinkeln des AHRS wurde durch die Verwendung eines GPS erfolgreich unterdrückt.

Kapitel 4

Das Sichtlinien-Stabilisierungs-System

MIPAS-STR detektiert die Strahlung, die von den atmosphärischen Spurengasen emittiert wird. Um Vertikalprofile der Mischungsverhältnisse ableiten zu können, wird die Methode der Horizontsondierung angewandt. Diese Methode erfordert eine einstellbare und relativ zur Erde konstante Sichtlinie (Line of Sight: LOS) während der Aufnahme eines Interferogramms. Die Richtung der Sichtlinie kann in einen vertikalen Anteil, die Elevation η , und einen horizontalen Anteil, den Azimut, zerlegt werden. Die atmosphärische Strahlung wird über einen drehbaren Umlenkspiegel, den Scanspiegel, in die Optik des MIPAS-STR eingekoppelt. Dort wird das Gesichtsfeld (Field of View: FOV) durch Blenden auf $0,44^\circ$ festgesetzt.

Ist die Richtung der Sichtlinie nicht konstant, so variiert die vermessene Luftmasse und somit die Intensität der gemessenen Strahlung. Dies reduziert einerseits den Informationsgehalt, andererseits können dadurch unerwünschte amplitudenmodulierte Geisterlinien entstehen [Delbouille 1997, Kimmig 2001]. Da die Atmosphäre in vertikaler Richtung eine stärkere Variabilität als in horizontaler aufweist, sind die Anforderungen an die Stabilität der Elevation erheblich höher als an die Stabilität des Azimut.

Die Vorgaben, nach denen der Pilot die Geophysica fliegt, sind über längere Zeiträume in Flughöhe und Flugrichtung konstant. Die dadurch gegebene Stabilität des Azimut ist ausreichend, so dass auf eine zusätzliche Stabilisierung des Azimut der Sichtlinie verzichtet werden kann.

Verfolgt man den Weg der Strahlung rückwärts vom Detektor in die Atmosphäre, so lassen sich die Einflüsse auf die Richtung der Sichtlinie bestimmen. Innerhalb des Optikmoduls, zwischen Detektor und Scanspiegel, ist der Weg der Strahlung entlang der optischen Achse fixiert. Die Lage der optischen Achse relativ zur Erde ändert sich bei Bewegung des Optikmoduls. Durch die Drehung des Scanspiegels wird der Winkel zwischen der optischen Achse und der Sichtlinie verändert. Die Richtung der Sichtlinie wird von der relativen Lage der optischen Achse im Optikmodul, der vom AHRs (s. Kapitel 3) gemessenen Lage des Optikmoduls relativ zur Erde und der Stellung des Scanspiegels bestimmt.

In diesem Kapitel wird im Wesentlichen auf die Steuerung und Regelung des Scanspiegels zur Einstellung und Stabilisierung der Elevation eingegangen. Die dazu notwendigen theoretischen Grundlagen werden in Abschnitt 4.1 entwickelt.

Zum Einsatz in MIPAS-STR wurde spezielle Hardware (Abschnitt 4.2) gebaut und eine eigene Software geschrieben. Wesentliche Details der Software werden in den Abschnitten 4.3 und 4.4, das Gesamtprogramm in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse des Fluges am 23.9.1999 präsentiert und die Qualität der Stabilisierung wird bewertet.

4.1 Die funktionale Abhängigkeit der Elevation von der Stellung des Scanspiegels

Ziel dieses Abschnitts ist es, einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Stellung des Scanspiegels und der Elevation der Sichtlinie zu entwickeln. Dabei stellt sich heraus, dass es drei Sorten von Parametern gibt:

- Feste Winkel, die den Einbau beschreiben - die Einbauwinkel - ,
 - die vom AHRS gemessenen Lagewinkel
 - und den Drehwinkel des Scanspiegels - den Scanwinkel -, der aktiv geändert werden kann.
- In den Unterabschnitten 4.1.1 und 4.1.2 wird die Auflösung der Elevationsfunktion, je nach Anwendungen nach unterschiedlichen Parametern, dargestellt.

Vor den Messflügen wird die Elevation der Sichtlinie bei verschiedenen Scanwinkeln und bei verschiedenen Lagen des Optikmoduls gemessen, so dass die den Einbau beschreibenden Parameter der Elevationsfunktion bestimmt werden können (s. Abschnitt 4.1.2).

Während eines Messfluges soll die Sichtlinie auf vorgegebene Elevationen stabilisiert werden. Die Elevationsfunktion wird dazu nach dem Scanwinkel aufgelöst. Durch Einstellen dieses Scanwinkels wird die vorgegebene Elevation der Sichtlinie gehalten (s. Abschnitt 4.1.1).

Nach einem Messflug kann aus dem gemessenen Scanwinkel und der gemessenen Lage die eingestellte Elevation noch genauer berechnet und damit die Stabilität der Sichtlinie während des Fluges verifiziert werden (s. Abschnitt 4.6.4).

In diesem Abschnitt wird die Abhängigkeit der Elevation vom Scanwinkel und den übrigen Parametern mathematisch hergeleitet. Um die Berechnung übersichtlich zu halten, sind alle Vektoren, die Richtungen repräsentieren, auf Länge 1 normiert.

Im Folgenden werden insgesamt drei Koordinatensysteme eingeführt. Für die weiteren Überlegungen ist die Position der Ursprünge irrelevant, da nur Richtungsvektoren zwischen den Koordinatensystemen transformiert werden.

Wie schon in Kapitel 2 bringt das zur Messung der Lage des Messensors verwendete AHRS sein gehäusefestes Koordinatensystem (in den Gleichungen durch Index A gekennzeichnet) mit. Um die Richtung der Sichtlinie bezüglich des Erdhorizonts angeben zu können, wird das Erdkoordinatensystem (Index E) gebraucht, das ebenfalls in Kapitel 2 (s. Abschnitt 3.1) eingeführt wurde. Das dritte Koordinatensystem wird durch den drehbaren Umlenkspiegel definiert. Seine Drehachse bildet die y-Achse des Scanspiegel-Koordinatensystem (Index M).

Die Drehung vom AHRS-Koordinatensystem ins Erd-Koordinatensystem wurde bereits im zweiten Kapitel hergeleitet, sie kann Gleichung (3.4) entnommen werden:

$$\xi_E = D(\Psi, \Theta, \Phi) \cdot \xi_A \quad (4.1)$$

mit

$$D(\Psi, \Theta, \Phi) = \begin{pmatrix} \cos \Theta \cdot \cos \Psi & -\sin \Psi \cdot \cos \Phi + \sin \Theta \cdot \cos \Psi \cdot \sin \Phi & \sin \Psi \cdot \sin \Phi + \sin \Theta \cdot \cos \Psi \cdot \cos \Phi \\ \cos \Theta \cdot \sin \Psi & \cos \Psi \cdot \cos \Phi + \sin \Theta \cdot \sin \Psi \cdot \sin \Phi & -\cos \Psi \cdot \sin \Phi + \sin \Theta \cdot \sin \Psi \cdot \cos \Phi \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \cdot \sin \Phi & \cos \Theta \cdot \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Die Drehachse \bar{X} des Scanspiegels liegt ungefähr parallel zur y-Achse des AHRS-Koordinatensystems. Die Drehwinkel zwischen den Koordinatensystemen A und M seien die Einbauwinkel Ψ_0 , Θ_0 und Φ_0 . Der Winkel Θ_0 wird Null gesetzt, da dieser die Drehung der Achse um sich selbst beschreibt. Damit liegt die x-Achse des Scanspiegel-Koordinatensystems in der x-y-Ebene des AHRS-Koordinatensystems. Die Drehung vom

Scanspiegel-Koordinatensystem ins AHRS-Koordinatensystem wird durch die Drehmatrix M beschrieben:

$$\xi_A = M \cdot \xi_M \quad (4.3)$$

mit

$$M = \begin{pmatrix} \cos \Psi_0 & -\sin \Psi_0 \cdot \cos \Phi_0 & \sin \Psi_0 \cdot \sin \Phi_0 \\ \sin \Psi_0 & \cos \Psi_0 \cdot \cos \Phi_0 & -\cos \Psi_0 \cdot \sin \Phi_0 \\ 0 & \sin \Phi_0 & \cos \Phi_0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Die optische Achse \vec{R} , entlang der die einfallende Strahlung nach der Reflexion am Scanspiegel das Teleskop durchläuft, ist ungefähr parallel zur y-Achse des Scanspiegel-Koordinatensystems. Im Scanspiegel-Koordinatensystem wird die Lage vollständig durch die Einbauwinkel β und γ beschrieben:

$$\vec{R}_M = \begin{pmatrix} -\cos \beta \cdot \sin \gamma \\ \cos \beta \cdot \cos \gamma \\ \sin \beta \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Die Scanspiegeloberfläche wird durch ihre Normale \vec{N} repräsentiert. Der Winkel zwischen Spiegel-Normalen und Spiegeldrehachse ist konstant und durch die Montage bestimmt. Er beträgt ungefähr 45° . Dieser Einbauwinkel sei α , mit $\vec{N} \cdot \vec{X} = \sin \alpha$. Die Drehung des Spiegels wird durch den Drehwinkel ζ beschrieben. Der Nullpunkt $\zeta = 0^\circ$ ist so definiert, dass unter Idealbedingungen ($\alpha = 45^\circ$, $\beta = \gamma = 0^\circ$) entlang der negativen x-Achse des Scanspiegel-Koordinatensystems aus dem Gerät herausgesehen wird. Die Spiegel-Normale liegt also für $\zeta = 0^\circ$ in der x-y-Ebene des Scanspiegel-Koordinatensystems.

Zerlegt man die Spiegel-Normale \vec{N}_M in die zur Drehachse senkrechte Komponente $\vec{N}_{M,\perp}$ und die parallele Komponente $\vec{N}_{M,\parallel}$, ändert sich bei der Drehung nur die senkrechte Komponente. Die Spitze des Vektors bewegt sich dabei auf einer Kreisbahn.

$$\vec{N}_M(\zeta) = \vec{N}_{M,\parallel} + \vec{N}_{M,\perp}(\zeta) \quad (4.6)$$

$$\vec{N}_{M,\perp}(\zeta) \cdot \vec{X}_M = 0 \quad (4.7)$$

$$\vec{N}_{M,\parallel} \cdot \vec{X}_M = (\vec{N}_M(\zeta) - \vec{N}_{M,\perp}(\zeta)) \cdot \vec{X}_M = \vec{N}_M(\zeta) \cdot \vec{X}_M = \sin \alpha \quad (4.8)$$

Mit

$$\vec{X}_M = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ergibt sich aus (4.8):

$$\vec{N}_{M,\parallel} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Die Spiegelnormale liegt für $\zeta = 0^\circ$ in der x-y-Ebene des Scanspiegel-Koordinatensystems. Deshalb gilt für die senkrechte Komponente:

$$\vec{N}_{M,\perp}(0) \propto \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Für ansteigende ζ soll die Drehrichtung des Vektors $\vec{N}_{M,\perp}$ um die y-Achse negativ¹ sein. Damit ergibt sich:

$$\vec{N}_{M,\perp}(\zeta) \propto \begin{pmatrix} -\cos\zeta \\ 0 \\ \sin\zeta \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Einsetzen von (4.10) und (4.12) in (4.6) und Normieren ergibt :

$$\vec{N}_M(\zeta) = \begin{pmatrix} -\cos\alpha \cdot \cos\zeta \\ \sin\alpha \\ \cos\alpha \cdot \sin\zeta \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Zuerst wird die Reflexion der Sichtlinie am Scanspiegel im Scanspiegel-Koordinatensystem berechnet. Anschließend wird die Sichtlinie erst ins AHRS-Koordinatensystem und dann ins Erd-Koordinatensystem transformiert. Im Erd-Koordinatensystem kann daraufhin die Elevation η bestimmt werden.

Aus dem einfallenden Strahl \vec{S} wird nach Reflexion am Spiegel der reflektierte Strahl \vec{R} , der das Teleskop entlang der optischen Achse durchläuft. Aus

$$\vec{R}_M = \vec{R}_{M,\perp} + \vec{R}_{M,\parallel} \quad (4.14)$$

folgt mit Hilfe des Reflexionsgesetzes:

$$\vec{S}_M = \vec{R}_{M,\perp} - \vec{R}_{M,\parallel} \quad (4.15)$$

dabei ist $\vec{R}_{M,\perp}$ die zur Spiegelnormalen senkrechte Komponente von \vec{R}_M , und $\vec{R}_{M,\parallel}$ die parallele Komponente.

Für die parallele Komponente gilt:

$$\vec{R}_{M,\parallel} = (\vec{R}_M \cdot \vec{N}_M) \cdot \vec{N}_M \quad (4.16)$$

Die senkrechte ergibt sich durch Umformen von (4.14) und Einsetzen von (4.16):

$$\vec{R}_{M,\perp} = \vec{R}_M - (\vec{R}_M \cdot \vec{N}_M) \cdot \vec{N}_M \quad (4.17)$$

Einsetzen in (4.15) ergibt:

$$\vec{S}_M = \vec{R}_M - 2(\vec{R}_M \cdot \vec{N}_M) \cdot \vec{N}_M \quad (4.18)$$

¹ dadurch ergeben steigende Scanwinkel steigende Elevationswinkel

Einsetzen von (4.5) und (4.13) in (4.18) liefert den Vektor der Sichtlinie im Scanspiegel-Koordinatensystem:

$$\vec{S}_M = \begin{pmatrix} -\cos\beta \cdot \sin\gamma \\ \cos\beta \cdot \cos\gamma \\ \sin\beta \end{pmatrix} - 2 \left(\begin{pmatrix} -\cos\beta \cdot \sin\gamma \\ \cos\beta \cdot \cos\gamma \\ \sin\beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\cos\alpha \cdot \cos\zeta \\ \sin\alpha \\ \cos\alpha \cdot \sin\zeta \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} -\cos\alpha \cdot \cos\sigma \\ \sin\alpha \\ \cos\alpha \cdot \sin\sigma \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

$$\vec{S}_M = \begin{pmatrix} 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\zeta + 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\gamma \cdot \cos^2\zeta + 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\zeta \cdot \cos\zeta - \cos\beta \cdot \sin\gamma \\ -2 \cdot \sin^2\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma - 2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\gamma \cdot \cos\zeta - 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\zeta + \cos\beta \cdot \cos\gamma \\ -2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \cdot \sin\zeta - 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\zeta \cdot \cos\zeta - 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin^2\zeta + \sin\beta \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Mit den Vorfaktoren, die ζ nicht enthalten:

$$\begin{aligned} a &= 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \\ b &= 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\gamma \\ c &= 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\beta \\ d &= \cos\beta \cdot \sin\gamma \\ e &= 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\gamma \\ f &= 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ g &= \cos\beta \cdot \cos\gamma - 2 \cdot \sin^2\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \\ h &= \sin\beta \end{aligned}$$

kann Gleichung (4.20) vereinfacht dargestellt werden:

$$\vec{S}_M = \begin{pmatrix} a \cdot \cos\zeta + b \cdot \cos^2\zeta + c \cdot \sin\zeta \cdot \cos\zeta - d \\ -e \cdot \cos\zeta - f \cdot \sin\zeta + g \\ -a \cdot \sin\zeta - b \cdot \sin\zeta \cdot \cos\zeta - c \cdot \sin^2\zeta + h \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

S_E ist der Vektor der Sichtlinie im erdfesten Koordinatensystem. Da der Vektor auf 1 normiert ist, ist die z-Komponente $S_{E,z}$ gleich $\sin\eta$.

Aus den Zusammenhängen (4.1) und (4.3) ergibt sich für die Drehung vom Scanspiegel-Koordinatensystem ins Erd-Koordinatensystem:

$$\vec{S}_E = D(\Psi, \Theta, \Phi) \cdot M \cdot \vec{S}_M \quad (4.22)$$

mit den Matrizen (4.2) und (4.4).

Zur Ableitung der Elevation wird nur die z-Komponente benötigt:

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ S_{E,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ A & B & C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{M,x} \\ S_{M,y} \\ S_{M,z} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

dabei werden die Matrixelemente aus (4.2) und (4.4) berechnet:

$$\begin{aligned}
 A &= -\sin \Theta \cdot \cos \Psi_0 + \sin \Phi \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Psi_0 \\
 B &= \sin \Theta \cdot \sin \Psi_0 \cdot \cos \Phi_0 + \sin \Phi \cdot \cos \Theta \cdot \cos \Psi_0 \cdot \cos \Phi_0 + \cos \Phi \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Phi_0 \\
 C &= -\sin \Theta \cdot \sin \Psi_0 \cdot \sin \Phi_0 - \sin \Phi \cdot \cos \Theta \cdot \cos \Psi_0 \cdot \sin \Phi_0 + \cos \Phi \cdot \cos \Theta \cdot \cos \Phi_0
 \end{aligned}$$

Einsetzen von (4.21) ergibt:

$$\sin \eta = \Gamma a + \Gamma b \cdot \sin \zeta + \Gamma c \cdot \cos \zeta + \Gamma d \cdot \sin \zeta \cdot \cos \zeta + \Gamma e \cdot \sin^2 \zeta \tag{4.24}$$

mit den Vorfaktoren:

$$\begin{aligned}
 \Gamma a &= A \cdot (b-d) + B \cdot g + C \cdot h \\
 \Gamma b &= -B \cdot f - C \cdot a \\
 \Gamma c &= A \cdot a - B \cdot e \\
 \Gamma d &= A \cdot c - C \cdot b \\
 \Gamma e &= -A \cdot b - C \cdot c
 \end{aligned}$$

Diese Gleichung ist analytisch nicht nach ζ auflösbar.

4.1.1 Die Auflösung der Elevation nach dem Scanwinkel - zur Stabilisierung der Elevation während eines Fluges

Die Stabilisierung der Elevation basiert auf der Lagewinkel-Messung des AHRS und den nach Gleichung (4.24) berechneten Scanwinkeln. Um das Alter der AHRS-Daten und die Rechenzeit zu berücksichtigen, ist eine Extrapolation der Scanwinkel erforderlich.

Die numerische Auflösung der Gleichung (4.24) nach dem Scanwinkel muss mehreren konträren Ansprüchen genügen. Einerseits soll der Fehler bei der Ermittlung des Scanwinkels nur wenige Bogensekunden betragen, um gegenüber anderen Fehlerquellen vernachlässigbar zu sein. Andererseits soll die Rechenzeit klein sein, damit der Extrapolationsfehler klein ist und die Echtzeitanforderungen erfüllt werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Algorithmus nutzt den nahezu linearen Verlauf der Funktion aus, und nähert sich einer guten Lösung in zwei linearen Schritten.

In Abb. 4.1 ist die Abhängigkeit der Elevation η vom Scanwinkels ζ für verschiedene realistische Parameter $\Gamma_{a,b,c,d,e}$ (s. Tabelle 4.2) aufgetragen.

Einbauwinkel					Lagewinkel	
A	β	γ	Φ_0	Ψ_0	Φ	Θ
$45^\circ \pm 2,5^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 3,5^\circ$	$\pm 3,5^\circ$

Tabelle 4.1 realistische Bereiche für Einbau- und Lagewinkel

Parameter				
Γ_a	Γ_b	Γ_c	Γ_d	Γ_e
$\pm 0,05^\circ$	-1,00 - -0,98	$\pm 0,11^\circ$	$\pm 0,05^\circ$	$\pm 0,05^\circ$

Tabelle 4.2 sich aus Tabelle 4.1 ergebende realistische Bereiche für die Parameter der Elevationsfunktion

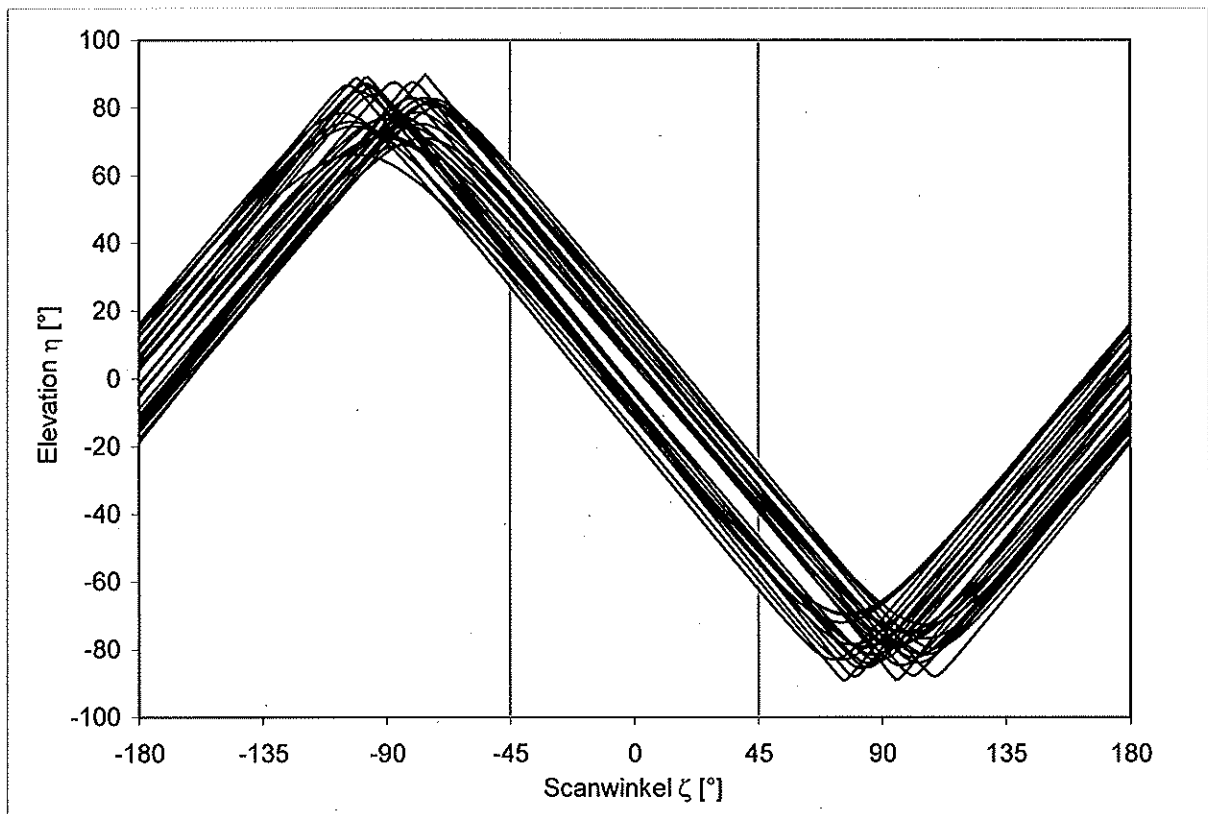


Abb. 4.1

Abhängigkeit der Elevation η vom Scanwinkel ζ

Entsprechend Gleichung (4.24) wird in dieser Abbildung die Abhängigkeit der Elevation vom Scanwinkel dargestellt. Die Parameter $\Gamma_{a,b,c,d,e}$ werden über den möglichen Bereich variiert, dennoch bleibt die Funktion für ζ im Bereich zwischen -45° und 45° annähernd linear.

Die gewünschte Elevation η_0 liegt zwischen -5° und 10° . Die Funktion $\eta(\zeta)$ ist in der Nähe der Null annähernd linear (in Abb. 4.1 ist der Bereich $-45^\circ < \zeta < 45^\circ$ markiert). Deshalb kann der gesuchte Wert gut mit Newtonschen Iterationsschritten gefunden werden. Als Startwert wird $\zeta = 0^\circ$ verwendet. Durch die Simulation wurde ermittelt, dass die resultierende Elevation nach dem ersten Schritt noch bis zu 10 Bogenminuten von der gewünschten Elevation entfernt ist. Der anschließende zweite Schritt reduziert den verbleibenden Fehler auf deutlich weniger als eine Bogensekunde.

4.1.2 Die Auflösung der Elevation nach den Einbauwinkeln - zur Kalibrierung vor einem Flug

Während der Messflüge soll zu jeder Lage des Gerätes und zu jeder gewünschten Elevation der passende Drehwinkel ζ des Scanspiegels bestimmt werden. Dies setzt voraus, dass die noch unbekanntem Einbauwinkel ($\alpha, \beta, \gamma, \Psi_0, \Phi_0, s_0$) vorher ermittelt werden. Dazu wird die Elevation der Sichtlinie mit Hilfe eines Theodoliten bei verschiedenen Spiegelstellungen ζ und verschiedenen Lagewinkeln Φ, Θ gemessen. Mit dem Theodoliten beobachtet man die Gesichtsfeldblenden FS_1 und FS_2 (s. Abb. 2.9), die die optische Achse des Teleskops definieren. Bei der Messung mit dem Theodoliten müssen also die Mitten der Gesichtsfeldblenden gleichzeitig im Fadenkreuz sein.

Aus den Messwert-Tupeln $(\eta_{\text{gemessen}}, \Theta, \Phi, \zeta)[i]$ wird die Summe der Fehlerquadrate gebildet.

$$f(\alpha, \beta, \gamma, \Psi_0, \Phi_0, s_0) = \sum_i [\eta[i]_{\text{gemessen}} - \eta(\alpha, \beta, \gamma, \Psi_0, \Phi_0, s_0, \Theta[i], \Phi[i], \zeta[i])]^2 \quad (4.25)$$

Daraus werden die gesuchten Einbauwinkel durch Minimierung bestimmt.

Zur Minimierung der Funktion f in (4.25) wird das Verfahren nach Broyden, Fletcher, Goldfarb und Shanno (BFGS) verwendet [Press 1988].

Das Minimierungsverfahren wurde mit Hilfe von Simulationen getestet. Dazu wird ein Satz Einbauwinkel zufällig gewählt. Zu mehreren ebenfalls zufällig bestimmten Tupeln aus Scan-, Roll- und Nickwinkel wurde jeweils die Elevation berechnet. Mit dem Minimierungsalgorithmus wurden aus diesen simulierten Messwerten die Einbauwinkel bestimmt. Die Elevation, die anschließend unter Zuhilfenahme der neu bestimmten Einbauwinkel berechnet wurde, war genauer als eine Bogensekunde.

Nachdem das Verfahren ohne Messfehler gut war, wurden zufällige, gleichverteilte Messfehler in der Simulation berücksichtigt. Als maximale Fehler wurden $1'$ in den Lagewinkeln und $10''$ beim Ablesen des Theodoliten angenommen. Bei 27 Messungen betrug der Fehler in der neu berechneten Elevation nach Durchführung der Minimierung $\pm 70''$ (pp) bzw. $36''$ (1σ). Werden wie bei der späteren Durchführung der Kalibration nur 12 Messungen verwendet, so steigt der über alle 27 Messungen betrachtete Fehler auf $\pm 90''$ (pp) bzw. $40''$ (1σ). Interessanterweise trägt der Ablesefehler des Theodoliten in der Simulation fast nicht zum Fehler der neu berechneten Elevation bei.

4.2 Der Aufbau der Elektronik und des Regelkreises

Die Richtung, aus der die Strahlung auf den Detektor fällt, muss durch Drehen des Scanspiegels zwischen den beiden Schwarzkörpern und der Atmosphäre verändert werden können. Der mechanische Aufbau des Messensors erfordert eine Drehbarkeit des Scanspiegels um ungefähr 180° , da sich der warme Schwarzkörper in der Deckelplatte des Sensors, direkt über dem Scanspiegel, und der kalte Schwarzkörper am Boden des Sensors, direkt unterhalb des Scanspiegels, befindet (s. Abb. 2.8). Der Spiegel soll sowohl im ungekühlten als auch im auf -70°C gekühlten Gerät eingesetzt werden, deshalb wurden alle Komponenten so ausgewählt, dass sie in einem möglichst weiten Temperaturbereich betrieben werden können. Der Encoder RCN 619 (Firma Dr. Johannes Heidenhain GmbH), der den Istwert des Spiegeldrehwinkels misst, ist bis auf $\geq -40^\circ\text{C}$ spezifiziert und wird deshalb auf -35°C geheizt. Als Motoren kamen zwei bürstenlose, zweipolige Gleichstrommotoren zur Anwendung (LAT-1902 der Firma Inland Motor). Dieser Motortyp wurde schon unter ähnlichen Umgebungsbedingungen im MIPAS Ballonexperiment erfolgreich verwendet, allerdings bei einem Drehbereich von 45° [Keim 1995, Maucher 1999]. Deshalb wurde der durch den begrenzten Winkelbereich entstehende Nachteil in Kauf genommen und durch den Einsatz von zwei gegeneinander verdreht montierten Motoren kompensiert.

Ein zweipoliger Gleichstrommotor hat eine kosinusförmige Winkel-Abhängigkeit des Quotienten von Drehmoment und Stromstärke (Abb. 4.2). Durch mechanische Kniffe kann zwar der Verlauf im Detail geändert werden (Abplattung des Maximums zum Plateau), aber weder die Existenz der Nullstellen, noch der Vorzeichenwechsel kann aufgehoben werden. Die Plateaubreite, etwa von -35° bis 35° , ist für die Winkelvariation während der Atmosphärenmessung ausreichend, jedoch können die beiden Schwarzkörper nicht mit demselben Motor angefahren werden. Für die Schwarzkörpermessungen wurde deshalb ein

zweiter Motor eingebaut, der zum ersten um 90° verdreht ist. Da sich das Vorzeichen des Drehmoments mit dem Vorzeichen der Versorgungsspannung ändert, kann der Motor in zwei Winkelbereichen (um 0° und um 180°) verwendet werden. Dazu muss die Polarität der Versorgungsspannung durch die Ansteuerelektronik vertauscht werden.

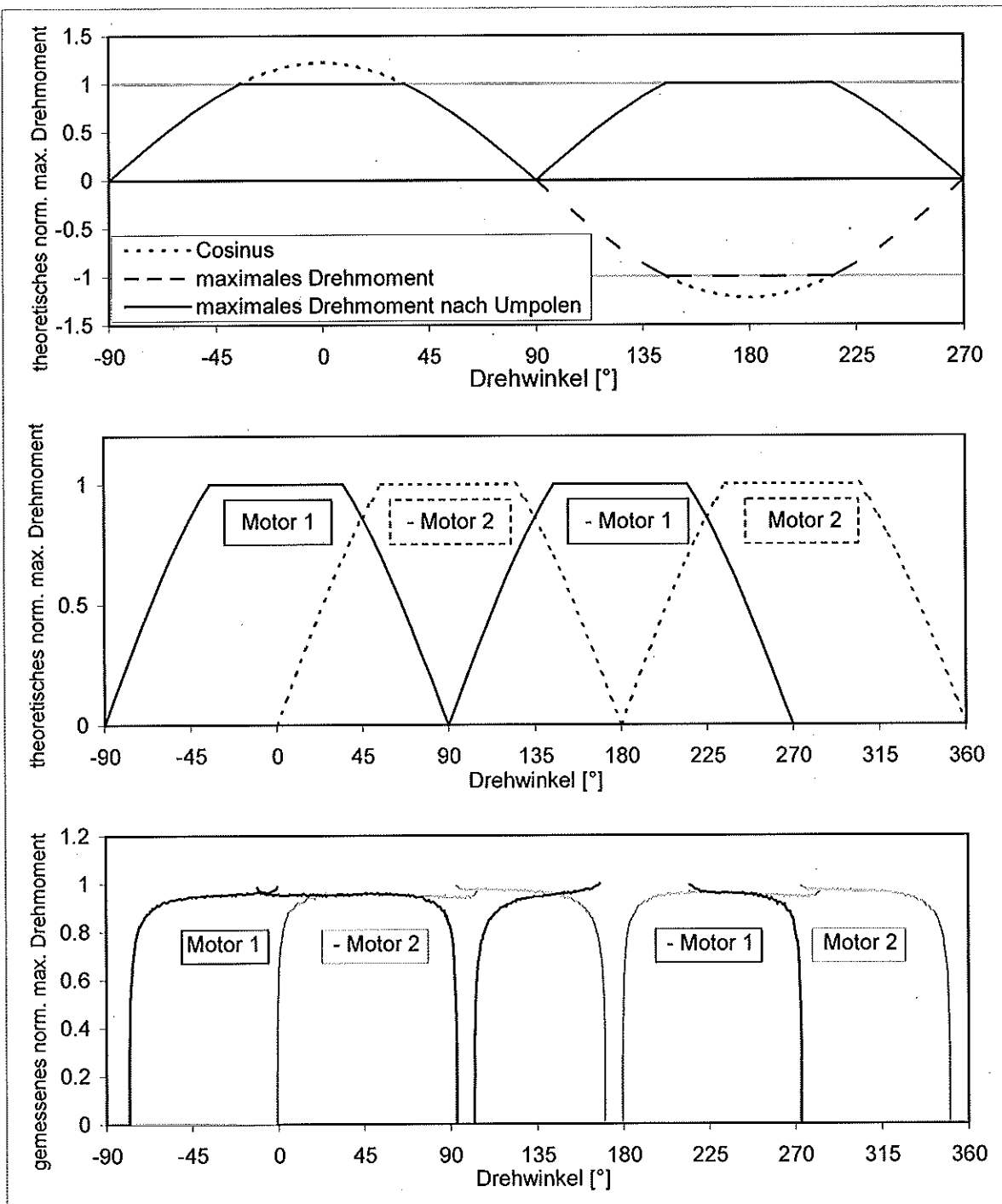
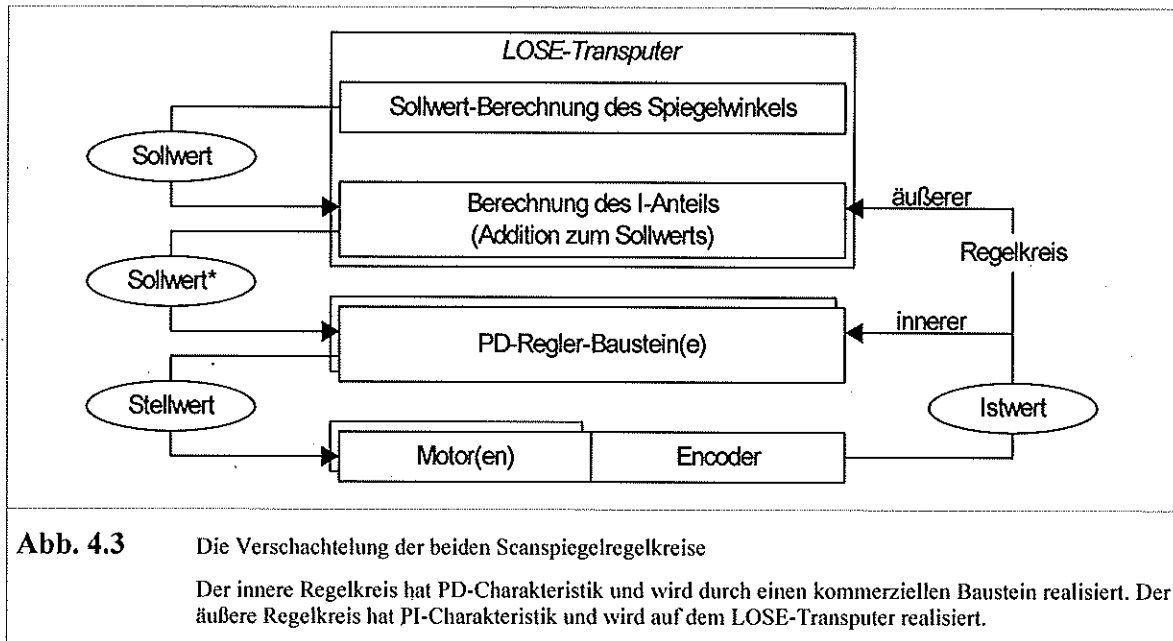


Abb. 4.2

Winkelabhängigkeit des Drehmoments der Motoren bei maximaler Stromstärke

- a) die theoretische Kurve eines einzelnen Motors
- b) die theoretische Kurven von zwei Motoren mit Polaritätswechsel der Eingangsspannung
- c) die gemessenen Kurven der beiden Motoren in der Scanspiegeleinheit



Bei der Entwicklung des MIPAS Ballongerätes hatte sich herausgestellt, dass die Scanspiegelregelung über einen Integralanteil verfügen muss, da sonst die Unwucht des Scanspiegels eine bleibende Regelabweichung verursacht. Bei abtastenden digitalen Reglern wird ein integrierender Regler umso stabiler, je kleiner die Abtastfrequenz ist. Mit einer Verkleinerung der Abtastfrequenz wird aber die Einschwingzeit verlängert und die Einstellgenauigkeit reduziert. Deshalb sind käufliche Reglerbausteine nur mit Proportional- und Differenzierreglern versehen und arbeiten mit einer möglichst großen Abtastfrequenz. Um einen Regler mit kleiner Einschwingzeit und Regelabweichung sowie großer Einstellgenauigkeit zu realisieren, wurden zwei Regelkreise verschachtelt. Der innere Regelkreis besteht aus einem PD-artigen Regler-Chip (Hct1 1100 von Hewlett Packard), einer verstärkenden H-Brücke, dem Motor und dem Encoder. Der äußere Kreis ist ein in der Software realisierter PI-Regler (mit $P = 1$).

Die Ansteuerelektronik der Scanspiegelregelung verbindet den LOSE-Transputer (s. Abschnitt 2.3), der den Sollwert berechnet, mit den Motoren, die den Spiegel drehen. Bei der Realisierung wurden die oben angeführten Aspekte berücksichtigt. Der innere Regelkreis wurde für jeden Motor getrennt aufgebaut. Das auf dem Transputer laufende Programm realisiert nicht nur den äußeren Regelkreis, d.h. die Addition des I-Anteils zum berechneten Sollwert, sondern schaltet auch, je nach aktuellem Winkel, zwischen den beiden Motoren bzw. dazugehörigen inneren Regelkreisen um. Elektronisch ist die Umschaltung so realisiert, dass zwar beide Reglerbausteine den Sollwert bekommen, aber ein FPGA (Field Programmable Gate Array) den Stellwert im nicht verwendeten Regelkreis auf Null setzt. Durch den FPGA wird bei Bedarf auch die Polarität der Spannung invertiert. Der FPGA stellt außerdem, wie in Abb. 4.4 zu sehen ist, die Kommunikationsverbindung zwischen den einzelnen Komponenten dar, die ihr eigenes Ein- und Ausgabeformat haben.

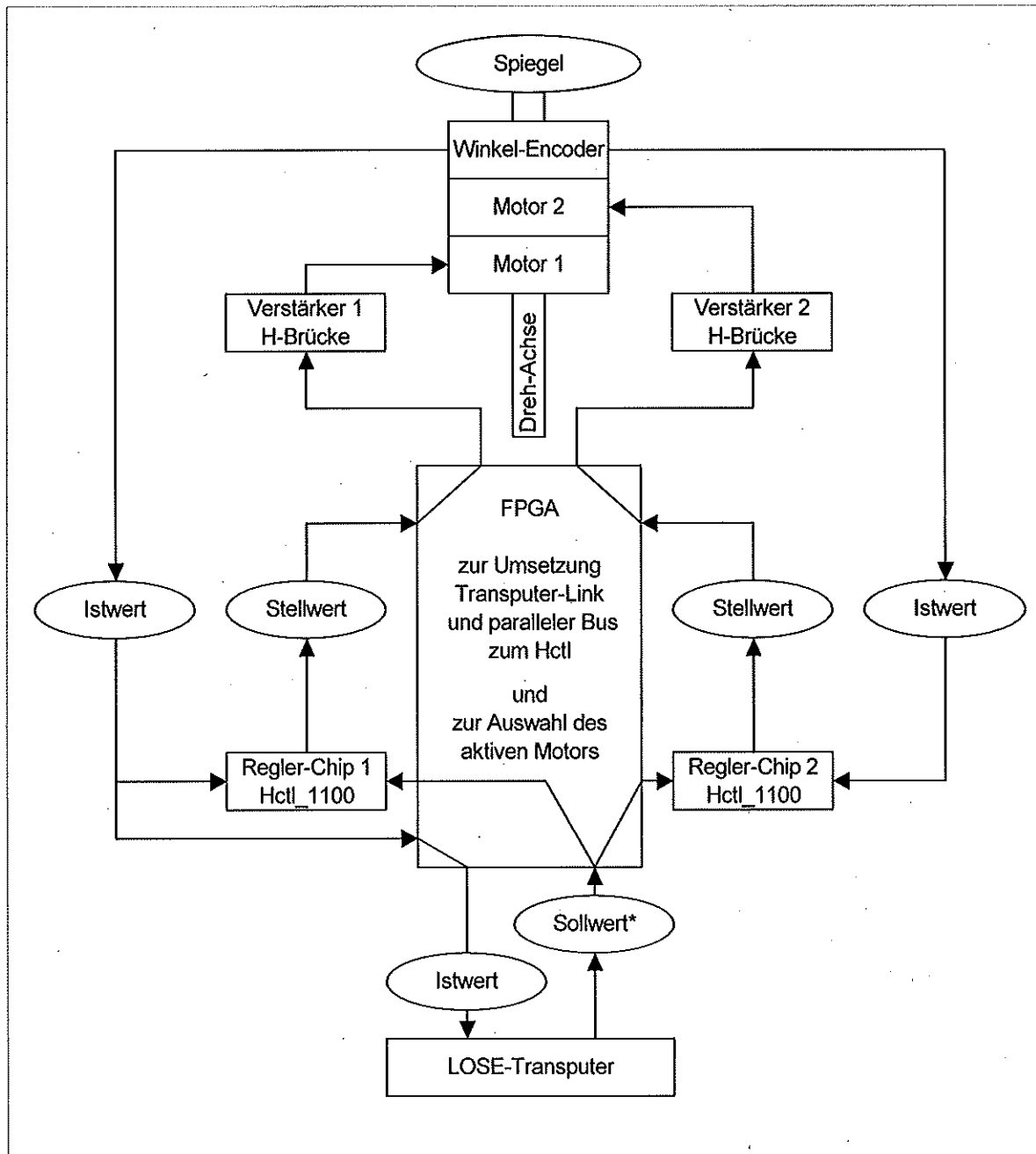


Abb. 4.4

Die Elektronik des inneren PD-Regelkreises

In der Diagramm-Mitte befindet sich ein FPGA, seine Hauptaufgaben sind die Umsetzung der unterschiedlichen Schnittstellen und die Umschaltung zwischen den beiden Motoren.

4.3 Die Datenverarbeitung im Flug: Die zeitliche Extrapolation des Scanwinkels und die Kom- pensation von Sprüngen in den ausgegebenen Lagewinkeln

In Abschnitt 4.1 wurde der statische Zusammenhang zwischen den Lagewinkeln, dem Scanwinkel und der daraus resultierenden Elevation hergeleitet.

In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang durch die Anpassung für das bewegte Gerät vervollständigt. Außerdem wird auf die Charakteristik der gemessenen Lagewinkel eingegangen.

Sprünge in den ausgegebenen Lagewinkeln:

Die Datenverarbeitung des AHRS enthält ein Kalman-Filter, dessen Parameter alle 20 s angepasst werden. Unter sehr ungünstigen Bedingungen, z.B. wenn während des Fluges neu initialisiert wird, kann bei der Parameteranpassung des Kalman-Filters ein Sprung in den ausgegebenen Lagewinkeln entstehen (Abb. 4.5), dessen Größe von der Änderung in den Parametern abhängt. Würde die Elevation der Sichtlinie während eines Interferogramms verändert, so käme die gemessene Strahlung aus zwei unterschiedlichen Bereichen der Atmosphäre. Die sinnvolle Auswertung des Interferogramms würde dadurch unnötig erschwert. Da die Anpassung der Parameter des Kalman-Filters nicht mit der Datenaufnahme eines Interferogramms korreliert werden kann, muss durch die LOSE-Software dafür gesorgt werden, dass die Elevation innerhalb eines Interferogramms keinen großen Sprung macht. In der Flugsoftware ist das realisiert, indem die aktuell berechnete Sollwertvorgabe mit dem für den gleichen Zeitpunkt aus vorherigen Sollwertvorgaben extrapolierten Wert verglichen wird. Ist der Unterschied größer als eine Bogenminute, so wird der extrapolierte Wert verwendet und die Differenz wird als ein Sprung der Lagewinkel interpretiert. Innerhalb eines Interferogramms werden diese Sprünge in der Variablen 'Sprungwert' akkumuliert. Der Sprungwert wird von allen nachfolgenden Sollwertvorgaben abgezogen, dadurch wird ein Sprung der resultierenden Elevation verhindert. Bei Winkelunterschieden, die so klein wie der hier betrachtete sind, ist es gleichwertig, anstatt die Korrektur in der Lagewinkeln durchzuführen, den Sollwert anzupassen. Der Software wird das Ende eines Interferogramms durch das TriggerTC (siehe TRACK in Abschnitt 4.4) mitgeteilt, woraufhin der Sprungwert auf Null zurückgesetzt wird.

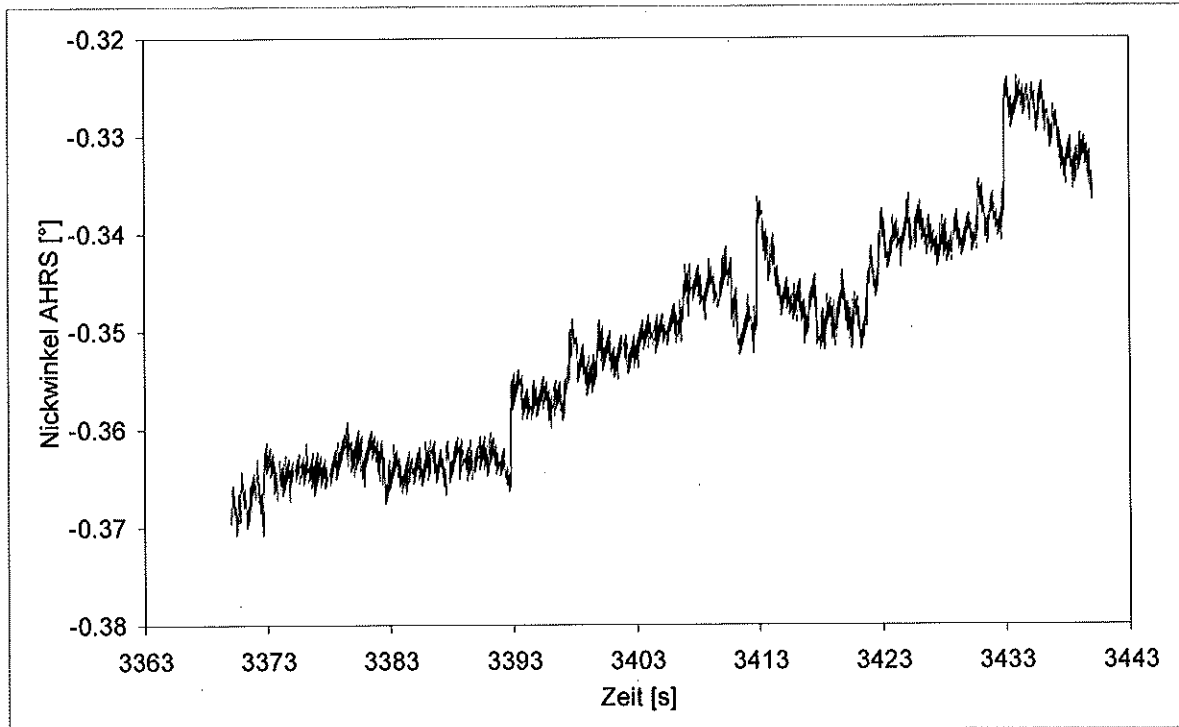


Abb. 4.5 Sprünge im Nickwinkel des AHRS, aufgezeichnet am 23.9.1999

Die Abbildung zeigt Sprünge im Nickwinkel des AHRS. Die Sprünge entstehen durch die periodisch alle 20 Sekunden stattfindende Anpassung der Parameter des Kalman-Filters. Die dargestellten Werte wurden während der Initialisierungsphase aufgezeichnet, deshalb sind die Sprünge noch groß, und heben sich von sonstigen Variationen ab. Im Messflug sind die Sprünge auf kleiner eine Bogenminute spezifiziert. Während des Fluges am 23.9.1999 waren weder im Nick- noch im Rollwinkel Sprünge größer als eine halbe Bogenminute.

Datenalter:

Im AHRS werden die Lagewinkel vor der Ausgabe nicht auf den Zeitpunkt der Ausgabe extrapoliert. Das Datenalter beträgt 5,5 ms, 1,6 ms Verarbeitungszeit plus 3,9 ms durch die Integrationszeit von 7,8 ms. Zur Berechnung des Scanwinkels werden weitere 2 ms benötigt. Demnach ist eine aus der AHRS-Ausgabe berechnete Scanwinkelvorgabe in dem Moment, zu dem sie an den Regelkreis als Sollwert ausgegeben wird, 7,5 ms „zu spät“. Dieser Sollwert wird bis zur nächsten Vorgabe, 7,8 ms später, beibehalten. Damit erhöht sich das mittlere Alter um 3,9 ms. Das mittlere Datenalter des aus den vom AHRS ausgegebenen Lagewinkeln berechneten Sollwerts für den Scanspiegelregelkreis beträgt also 11,4 ms.

Betrachtet man einen sinusförmigen Verlauf des Scanwinkels mit $s = A \cdot \sin(\omega t)$,
so erzeugt ein Zeitversatz um T den Fehler Δ :

$$\begin{aligned} \Delta &= A \cdot \sin(\omega t) - A \cdot \sin(\omega(t + T)) \\ \Delta_{\max} &= 2A \cdot \sin(0,5 \cdot \omega T) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Im Flug ist die dominierende Rollwinkeländerung etwa bei einer Frequenz von 0,1 Hz. Die Amplitude kann, je nach Flugsituation, bis zu 5° betragen. Der maximale, realistische Fehler beträgt dann 2,1 Bogenminuten.

Für eine genaue Sichtlinienstabilisierung ist es deshalb unverzichtbar, den Sollwert des Scanspiegelregelkreises auf den exakten Zeitpunkt zu extrapolieren. Durch die Extrapolation

kann außerdem die Verzögerungszeit des Regelkreises (experimentell bestimmt zu 7,1 ms) kompensiert werden.

Extrapolation:

Zur Extrapolation wird eine analytische Funktion an die Messwerte angepasst und zum gewünschten Zeitpunkt ausgewertet. Als mögliche Funktionen bieten sich wegen ihrer einfachen Handhabung Polynome an und Sinusschwingungen, da die zu approximierenden Messwerte einer näherungsweise harmonischen Schwingung entstammen. Die Approximation eines Polynoms mit vorgegebenem Grad ist numerisch stabil, immer lösbar und dauert immer gleich lang. Die Realisation ist in [Keim 1995] eingehend beschrieben.

Die Approximation eines Sinus an gegebene Messwerte ist mathematisch nicht trivial, da gleichzeitig die Frequenz, die Phase und die Amplitude bestimmt werden müssen. Es gibt keine geschlossene Lösung, um die beste Funktion abzuleiten. Alle Ansätze zur Lösung des Problems sind iterativ. Eine Methode, die nicht die beste, aber eine relativ gute Lösung liefert, ist die Fourieranalyse. Ihre Genauigkeit ist von der Zahl der Messpunkte und ihrer Abtastrate abhängig. Wird die Anzahl n der verwendeten Messpunkte erhöht, so verbessert sich zwar die Genauigkeit, jedoch vergrößert sich die benötigte Rechenzeit in viel stärkerem Maße (die Rechenzeit für eine FFT ist proportional zu $n \cdot \log(n)$).

Ein Ausweg besteht, wenn die Frequenz bekannt bzw. vorgegeben ist. Dann kann gleichzeitig die Amplitude eines Sinus und eines Kosinus dieser Frequenz an die Messpunkte angepasst werden. Damit diese Approximationen zu guten Ergebnissen gelangen, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens darf sich die dominierende Frequenz während des betrachteten Zeitraumes nicht ändern und zweitens muss die Schwingung schmalbandig sein.

In der Flugsoftware wird eine Funktion, bestehend aus einem Polynom zweiten Grades und einer Sinusfunktion, verwendet. Der Beitrag des Sinus kann abgeschaltet werden. Es wurde vorgesehen, dass in Flugphasen, in denen keine Atmosphärenmessung stattfindet, also keine Rechenzeit für die erdfeste Sichtlinienstabilisierung benötigt wird, eine FFT über viele Messpunkte gerechnet wird, und so die dominierende Frequenz für die folgenden Approximationen vorgeben wird.

Die Fourieranalyse des während der Flüge in Rovaniemi aufgezeichneten Nickwinkels - aus Gleichung (4.24) folgt, dass die Betrachtung des Nickwinkels ausreicht - zeigt eine sehr breite Resonanz (siehe Abb. 3.6). Mit der Überlagerung von Sinusschwingungen einer bzw. weniger diskreter Frequenzen lässt sich also keine gute Approximation des Nickwinkels erzeugen. Auch die spätere Kampagne in Ushuaia zeigt eine sehr breite Resonanz, wodurch die dort getroffene Entscheidung, die vorbereitete Approximation mit Sinusschwingungen nicht zu verwenden, bestätigt wurde.

In der Kampagne in Ushuaia wurde zur Extrapolation der Scanwinkelvorgabe die Approximation eines Polynoms 2. Ordnung an 22 Stützpunkte verwendet.

4.4 Die Synchronisation von Elevationswinkeländerung und Interferogrammaufnahme

Da eine Änderung des Elevationswinkels während der Aufnahme eines Interferogramms das Interferogramm unnötig verschlechtert, muss die Elevation in der Messpause zwischen zwei Interferogrammen verändert werden. Die Aufnahme eines Interferogramms dauert ca. neun Sekunden. Die Messpause zwischen zwei Interferogrammen beträgt ca. eine Sekunde.

Die Interferometerelektronik (IFME) und die Sichtlinien-Stabilisierungs-Elektronik (LOSE) sind unabhängige Untereinheiten der MIPAS-Elektronik (siehe Abschnitt 2.3). Die Synchronisierung muss deshalb durch eine übergeordnete Einheit erfolgen. Der Daten- und Kommandostrom zwischen dem Steuer-PC und LOSE bzw. IFME läuft über die zentrale CoreEinheit (CORE). Deshalb wurde der synchronisierende Prozess hier platziert. Der

Synchronisationsprozess (TRACK) gibt nur den Zeitpunkt vor, zu dem der nächste Winkel angefahren werden soll. Die Abfolge der Elevationswinkel ist in der LOSE-Software implementiert.

Arbeitet die LOSE-Software im getriggerten Limbmodus, so wird der Elevationswinkel nach einem Kommando (TriggerTC) des TRACK gewechselt. Die IFME schickt die Interferogramme gestückelt, jeweils sobald 500 Punkte gemessen wurden. Diese Pakete werden innerhalb des Interferogramms durchnummeriert. Die Nummer des Pakets gibt also seine Position im Interferogramm an. Insgesamt werden 43 Pakete pro Interferogramm erzeugt, der Abstand beträgt 220 ms. Der TRACK muss den ihn durchlaufenden Datenstrom von der IFME analysieren und das TriggerTC für die LOSE erzeugen, sobald er ein Paket mit der vorher festgelegten Nummer erhält. Da eine zeitliche Auflösung von 220 ms nicht ausreicht, kann zur Feinabstimmung in der LOSE-Software eine Wartezeit von bis zu vier Sekunden eingestellt werden.

Der Abstand zwischen zwei Atmosphärenwinkeln beträgt nur wenige Grad, die Einstelldauer ist durch die Einschwingzeit dominiert. Die Einschwingzeit beträgt in der Regel ca. 250 ms, in Ausnahmen aber auch eine Sekunde und länger (s. Abschnitt 4.6.4, Abb. 4.16). Beim Wechsel zwischen Schwarzkörpermessung und Atmosphärenmessung ist die Zeit, die zusätzlich benötigt wird, um den Winkelbereich von ca. 90° zu überwinden, nicht mehr vernachlässigbar. Sie beträgt ca. 500 ms.

Schwarzkörperspektren können mit geringerer spektraler Auflösung (es wird ein reduzierter Bereich aus der Mitte des Interferogramms verwendet) aufgenommen werden. Die für die Spektren nicht benutzten Zeiten am Anfang und Ende der Schwarzkörperinterferogramme können für die längere Einstellzeit der Sichtlinienstabilisierung verwendet werden. Dadurch wird die Messzeit optimal ausgenutzt. Beim Wechsel von einem Schwarzkörper zu einem Atmosphärenwinkel wird deshalb der Elevationswechsel schon eine Sekunde früher, also noch während der Datenaufnahme des Schwarzkörperinterferogramms begonnen. Beim Wechsel zu einem Schwarzkörper kann die Sichtlinienstabilisierung noch einschwingen, während das Interferogramm schon aufgenommen wird.

Der TRACK erzeugt das TriggerTC etwa eine Sekunde vor Ende des Interferogramms, genauer durch das 36. Paket jedes Interferogramms. Die Wartezeit in der LOSE-Software ist auf 1,07 Sekunden eingestellt, bei einem Schwarzkörper auf 0,07 Sekunden.

Nachteil dieses getriggerten Modus ist, dass der Kanal (bei MIPAS-STR werden vier Kanäle mit unterschiedlichen Wellenzahlen betrieben), auf den synchronisiert wird, permanent laufen muss. Ein Ausfall dieses Kanals führt dazu, dass die noch laufenden Kanäle Interferogramme mit permanent gleichem Elevationswinkel aufnehmen. Deshalb wurde ein ungetriggert Limbmodus eingeführt und im TRACK eine Zeitüberwachung des verwendeten Kanals implementiert. Sobald die IFME länger als fünf Sekunden keine Datenpakete des ausgewählten Kanals mehr schickt, sendet der TRACK das Kommando zum Umschalten an die LOSE. Im ungetriggerten Limbmodus wechselt die LOSE alle 60 Sekunden - das entspricht ungefähr sechs Interferogrammen - zum nächsten Winkel. Da dieser Modus keinen Bezug zur Interferogrammaufnahme hat, können bis zu zwei Interferogramme pro Winkel unbrauchbar werden. Der ungetriggerte Modus ist eine Art Notfallmodus, deshalb wird diese Einschränkung toleriert.

Abb. 4.6 zeigt die Laufzeit, die zwischen Entstehen der Triggerbedingung (Generierungszeit des Paketes der Nummer 36) auf der IFME und der Entgegennahme des Synchronisationskommandos durch die LOSE liegt. Dieser Annahmezeitpunkt wurde aus dem Zeitpunkt der Elevationsänderung und der vorgegebenen Wartezeit zurückgerechnet. Die Variabilität von ca. 6 ms ist im Vergleich zur Einschwingzeit tolerabel. Der minimale Wert

der Laufzeit von ca. 10 ms entspricht der Einstellgenauigkeit der Uhren von IFME und LOSE. Beim Einstellen der Wartezeit braucht die Laufzeit deshalb nicht berücksichtigt zu werden.

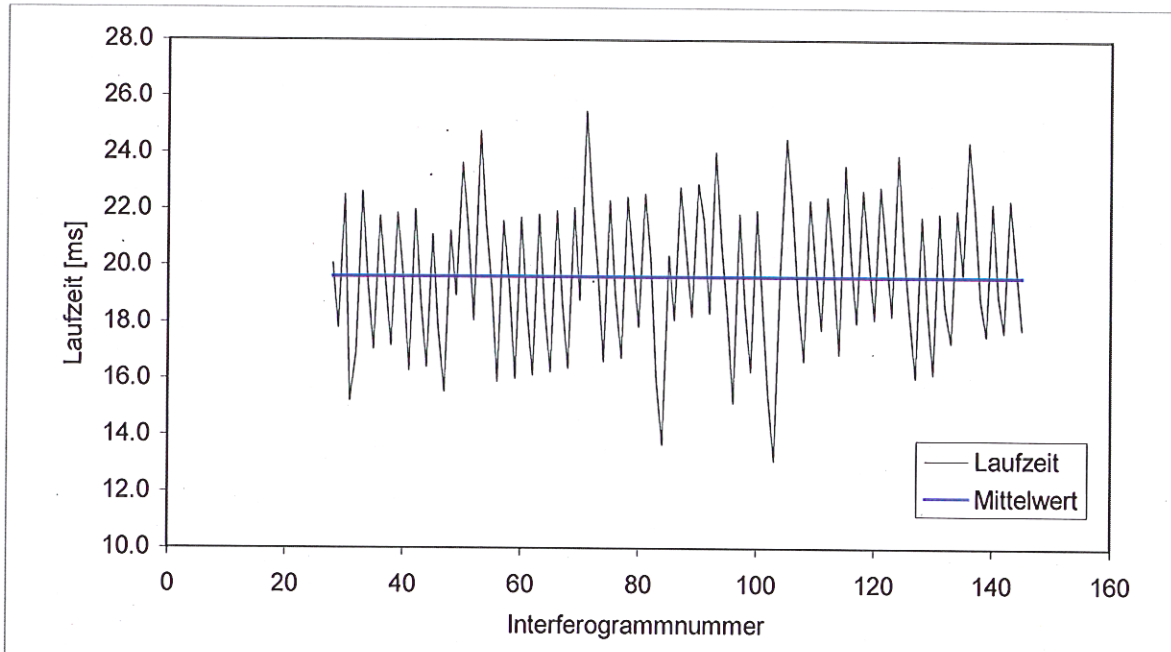


Abb. 4.6 Laufzeit des Triggerkommandos

Bei der Synchronisation von Interferogrammaufnahme und Elevationswechsel muss auch die Laufzeit des Kommandos untersucht werden. Dazu wurde die Generierungszeit beider beteiligten Datenblöcke verglichen. In der Abbildung ist die Differenz der Zeit des IFME-Blocks, der den Trigger auslöst, und der Zeit des LOSE-Blocks, der den Trigger bestätigt, dargestellt.

4.5 Beschreibung des Programms der Sichtlinienstabilisierung

Während des Fluges läuft auf den Transputern des Subsystems LOSE das in Abb. 4.7 dargestellte Programm. Die Hauptbestandteile sind

- ▶ die Bedienung des AHRS, insbesondere das Entgegennehmen der Lagewinkel,
- ▶ die Berechnung des optimalen Scanspiegelwinkels inklusive der Extrapolation,
- ▶ die Steuerung des Scanspiegels und die Einstellung der Scanspiegelregelung,
- ▶ die Generierung von Datenpaketen der für die spätere Auswertung und Kontrolle wichtigen Housekeeping-Daten und
- ▶ die Entgegennahme und Verarbeitung von Kommandos.

Das Transputer-Programm der LOSE weiß nichts über den Ablauf eines Fluges, alle Änderungen müssen als Kommando geschickt werden. Das Gegenstück zu dem Transputer-Programm ist das LOSE-Kontroll-Programm auf dem PC, das anhand der Änderungen von Werten wie der Flughöhe die einzelnen Flugphasen unterscheidet, und an die LOSE die entsprechend notwendigen Kommandos schickt.

Im Folgenden wird die Struktur des Programms beschrieben:

Das AHRS liefert mit ca. 128 Hz das Datenpaket mit den Lagewinkeln. Der Eingang der Daten startet die Berechnung des Scanwinkels. Aus den Lagewinkeln, den vorher einmal per Kommando eingegebenen Einbauwinkeln und der gewünschten Elevation wird der dazugehörige Scanwinkel berechnet (siehe Abschnitt 4.1.1). Dieser Scanwinkel gehört zu einem Zeitpunkt in der Vergangenheit (siehe Abschnitt 4.3), deshalb wird er durch Approximation der vorhergehenden Werte auf den Vorgabe-Zeitpunkt extrapoliert. Der so

bestimmte Winkel ist der Sollwert für die Scanspiegelregelung (siehe Abschnitt 4.2). Die Scanspiegelregelung besteht aus einem als Software realisierten I-Anteil, der mit einem PD-artigen Regelbaustein kombiniert ist. Bevor der Sollwert an den Regelbaustein ausgegeben wird, wird der aktuelle Istwert eingelesen. Dieser wird sowohl für die Integration der Regelabweichung – I-Anteil der Regelung – als auch für die Auswertung nach dem Flug gebraucht. Nachdem alle zeitkritischen Aufgaben erledigt sind, werden alle für die spätere Auswertung interessanten Werte als Datenpaket an den PC geschickt. Anschließend wird auf die nächsten Lagewinkel vom AHRS gewartet, und der Steuerungszyklus beginnt von vorne. Der Kommando-Prozess, der auf Kommandos von PC und TRACK wartet, ist parallel zum Regelprozess realisiert und greift nur über globale Variablen in die Regelung ein. Das Synchronisationskommando vom TRACK bewirkt, dass nach einer per Kommando vorgegebenen Wartezeit die globale Variable „gewünschte Elevation“ auf den nächsten Wert in der Limbsequenz geändert wird. Der Regelprozess fragt diese Variable einmal pro Durchlauf ab und berechnet damit die Scanwinkelvorgabe.

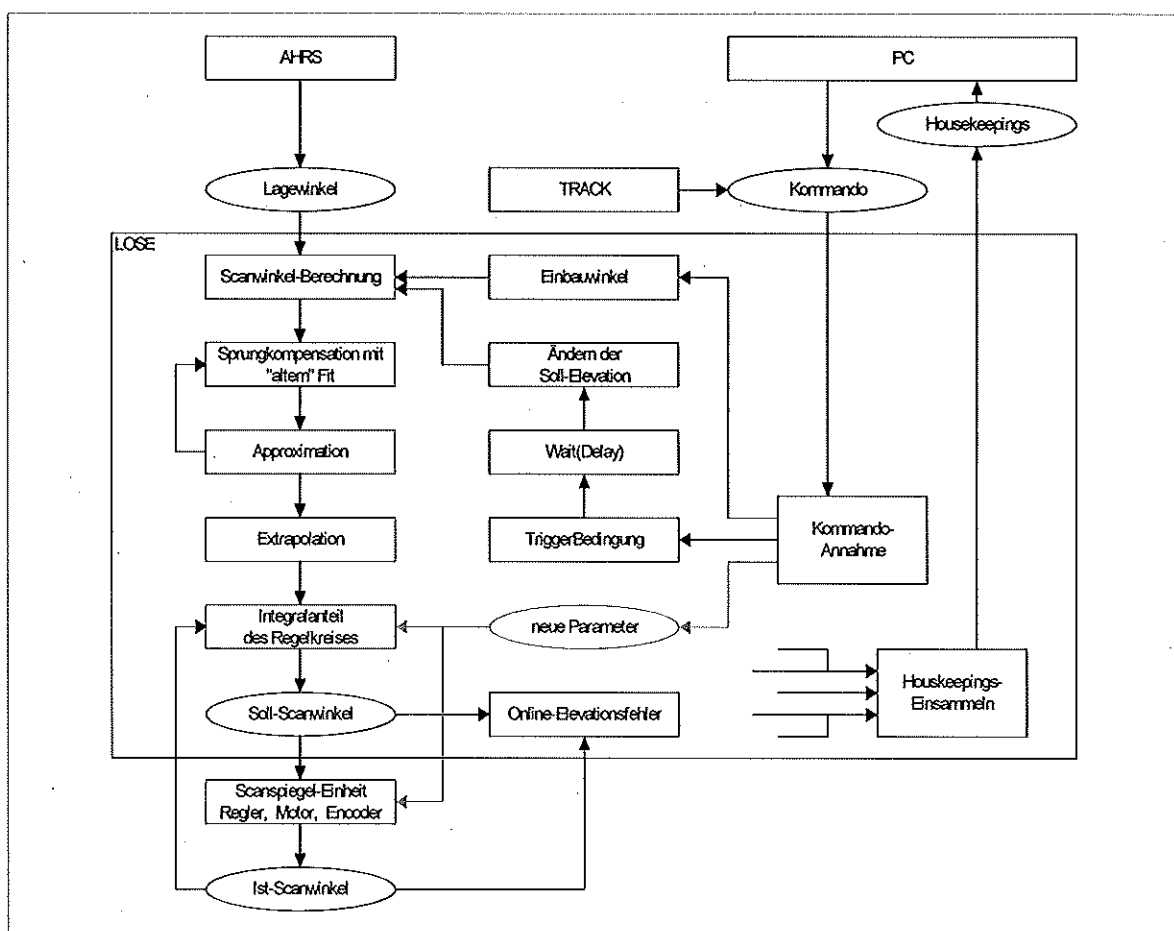


Abb. 4.7 LOSE-Algorithmus: der strukturelle Aufbau

Aus den vom AHRS gemessenen Lagewinkeln und dem per Kommando bestimmten Soll-Elevationswinkel wird der optimale Scanwinkel berechnet und als Sollvorgabe an den Regelkreis übergeben. Für die Auswertung nach dem Flug werden die wichtigsten Größen (sogenannte Housekeepings) im PC gespeichert.

4.6 Der Flug am 23.9.1999: Ergebnisse der Sichtlinienstabilisierung

4.6.1 Kalibrierung der Einbauwinkel

Abb. 4.8 zeigt das Ergebnis der Kalibrierungsmessung vor dem Flug am 23.9.1999. Es wurden neun Sätze mit unterschiedlichen Lagewinkeln mit jeweils drei verschiedenen Scanwinkeln gemessen. Die Scanwinkel wurden so gewählt, dass ein möglichst großer Winkelbereich überdeckt wurde. Aus den vier Sätzen (= zwölf Messungen), bei denen beide Lagewinkel maximal waren, wurden die Einbauwinkel bestimmt. Die übrigen fünf Sätze dienen als Kontrollmessung. Zur Kontrolle des Minimierungsalgorithmus wurde mit den ermittelten Einbauwinkeln für jedes gemessene Tupel aus Lage und Scanwinkel die Elevation berechnet, hiervon wurde die gemessene abgezogen. Dies ist in Abb. 4.8 dargestellt. Im fünften Satz waren beide Lagewinkel ungefähr Null. Man erkennt, dass der neunte Satz auffällig große Elevationsfehler aufweist. Genauere Betrachtung der Messwerte ergab, dass beim Ablesen der Lagewinkel ein Fehler passiert sein muss, da sich der Wert des Nickwinkels während der Messung änderte, obwohl das Instrument ruhig stand. Die übrigen Messungen entsprechen weitestgehend den Erwartungen. Der mittlere quadratische Elevationsfehler beträgt (über alle acht Messsätze berechnet) 40".

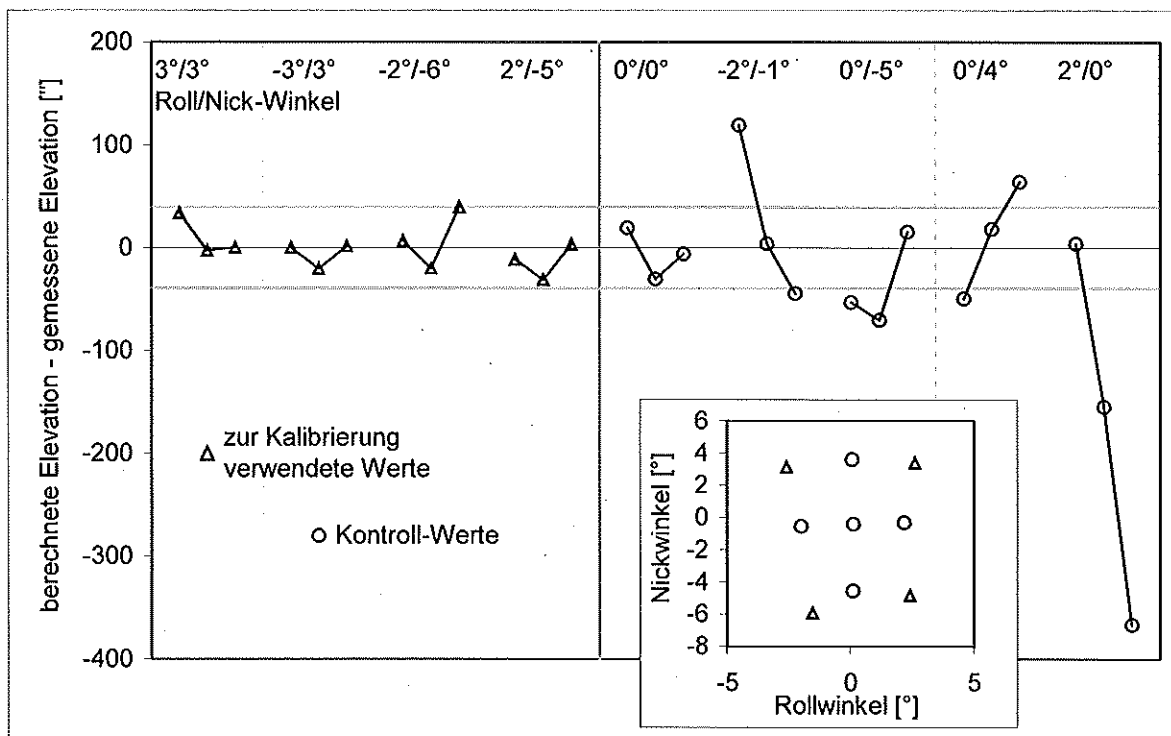


Abb. 4.8 Kalibrierung der Einbauwinkel

Zur Bestimmung der Einbauwinkel wurde das MIPAS in neun verschiedene Lagen gebracht (siehe kleines Diagramm). Dabei wurde die Elevation bei drei jeweils verschiedenen Scanwinkeln mit Hilfe des Theodoliten vermessen. Aus den vier linken Sätzen wurden die Einbauwinkel bestimmt. Die übrigen fünf Sätze dienen der Kontrolle. Die große Abweichung im neunten Satz ist wahrscheinlich auf einen Fehler bei der Lagewinkelmessung zurückzuführen (siehe Text).

4.6.2 Bewertung der IFME-LOSE Synchronisation

Die Auswertung des Fluges am 23.9.1999 von Ushuaia aus zeigte, dass die Dauer einer Interferogrammaufnahme unter Flugbedingungen nicht konstant ist (Abb. 4.9), sondern immer länger als nominell vorgegeben. Der Nominalwert ist in den ersten 300 Interferogrammen (IFG) zu sehen, da diese noch auf dem Rollfeld aufgenommen wurden. Die extrem langen Aufnahmezeiten bei ca. Interferogrammnummer 350 entstanden während des Starts. Die Atmosphärenmessungen beginnen erst bei einer Flughöhe von etwa 16 km (~ IFG Nr. 500), deshalb stören diese Extremwerte nicht.

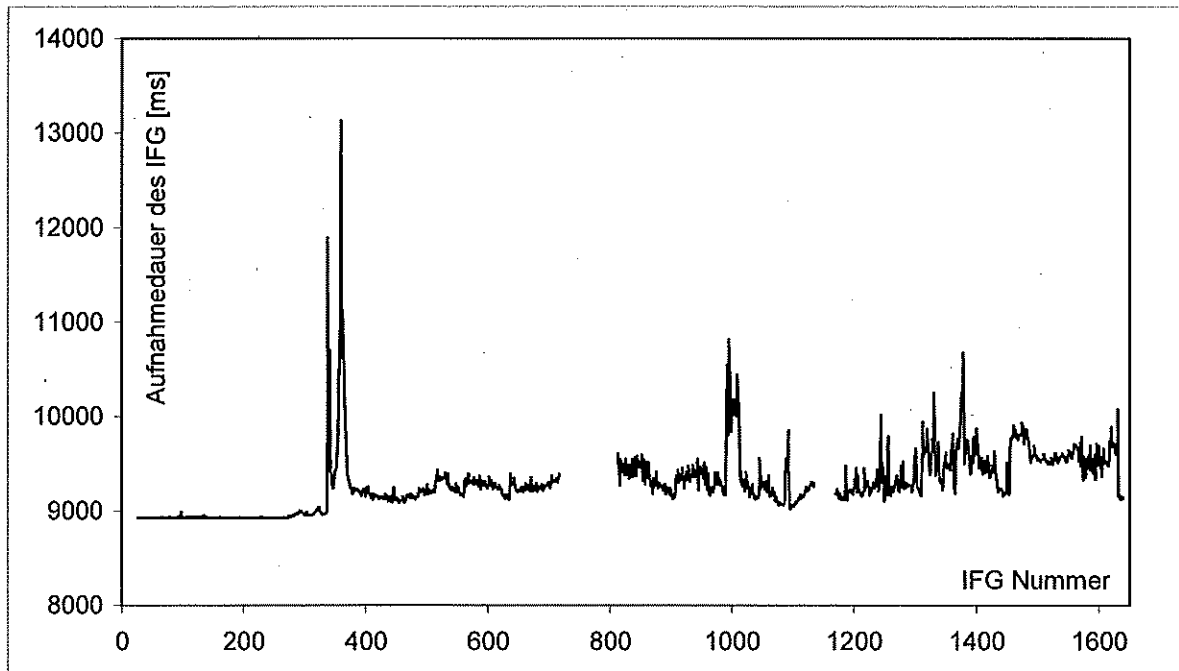


Abb. 4.9

Die Dauer der Datenaufnahme der einzelnen Interferogramme

Die Datenaufnahmezeit ist nicht für alle Interferogramme gleich. Erkennbar ist eine Abhängigkeit von der Flugphase (z.B. Start, Auf- und Abstieg). Da die IFME-LOSE-Synchronisierung von einer konstanten Dauer ausgeht, passiert es bei extrem langen Aufnahmezeiten, dass der Elevationswinkel schon vor dem Ende der Datenaufnahme geändert wird.

In der Messphase des Fluges ergab sich jedoch durch die zu langen Aufnahmezeiten ein Problem bei der Synchronisation mit der Elevationsänderung. In Abb. 4.10 ist die Zeit zwischen Ende der Datenaufnahme und dem Start der Elevationsänderung aufgetragen. Da der Trigger ausgelöst wird, nachdem 90 % des Interferogramms aufgenommen sind (entspricht nominell acht Sekunden), verlängert sich die Zeit zwischen Triggerauslösung und Ende der Datenaufnahme proportional mit der Länge des Interferogramms. Im Gegensatz dazu ist die Wartezeit der LOSE nach dem Empfang des TriggerTC bis zum Start der Elevationsänderung konstant. In der eingestellten Wartezeit war zwar ein Puffer von 50 ms enthalten, um unerwartete Probleme abzufangen, aber für das hier neu aufgetretene Problem war er in vielen Fällen zu klein. Bei der Auswertung der Interferogramme kann diesem Problem begegnet werden, indem von den Interferogrammen der Bereich abgeschnitten wird, in dem der Elevationswinkel schon geändert wird. Dadurch verringert sich jedoch der effektive Pendelhub und damit die spektrale Auflösung. (in Anhang H sind die betroffenen IFG aufgeführt).

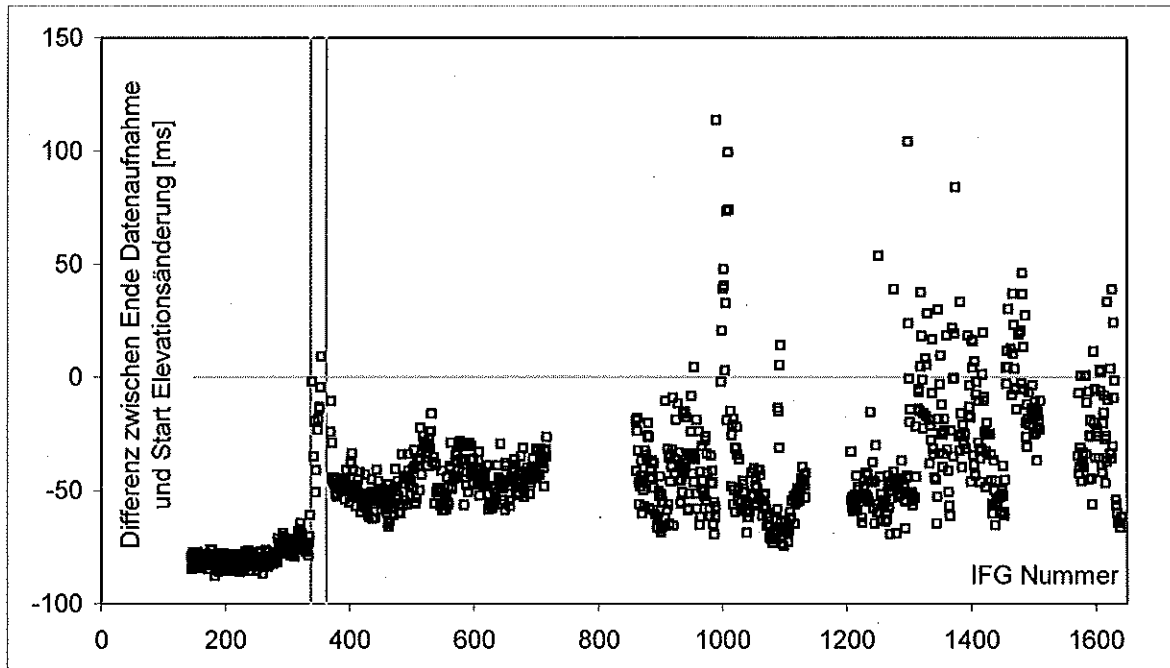


Abb. 4.10 Differenz zwischen Ende der Datenaufnahme eines Interferogramms und Beginn der Elevationsänderung
 Ist die Differenz positiv, so wurde die Elevation noch während der Datenaufnahme geändert. Diese Interferogramme müssen gesondert behandelt werden. Z.B. können sie abgeschnitten werden, was einem reduzierten Pendelhub entspricht.
 Interferogramme der Schwarzkörpermessung sind von dem Problem nicht betroffen, da diese IFG sowieso zur Auswertung abgeschnitten werden. Sie wurden deshalb nicht aufgetragen.

4.6.3 Interferogramme, bei denen der Rand der Schieberöffnung innerhalb des FOV war

Sowohl in der Flugzeughülle als auch in der Kaltstrukturwanne sind Schieber eingebaut. Sie werden erst oberhalb der Tropopause geöffnet, damit keine Feuchtigkeit in das gekühlte Optikmodul gelangen kann. Die Größe der Öffnungen wurde so ausgelegt, dass sowohl bei der "deep-space"-Messung ($\eta_{DS} = +10^\circ$), als auch bis zur Erdoberfläche ($\eta_{Erde} = -4^\circ$) die Atmosphäre beobachtet werden kann. Berücksichtigt wurden dabei die Größe des FOV ($\pm 0,4^\circ$), Einbautoleranzen ($\pm 2^\circ$) und insbesondere die Rollbewegungen des Flugzeugs ($\pm 3^\circ$)¹. Die berücksichtigten Rollbewegungen entsprechen der spezifizierten Variation [MDB 1996] für den Messflug auf konstanter Höhe.

Die Drehwinkel des Scanspiegels, bei denen das Gesichtsfeld die Ränder der Schieberöffnung gerade berührt, wurden vor dem Flug vom 23.9.1999 grob vermessen. Dabei wurde die Sichtlinie mit Hilfe eines Zeigelasers simuliert und die Drehwinkel wurden mit dem Winkelencoder² gemessen (Abb. 4.4). Die kleinst- und größtmöglichen Encoderwerte betragen $0,0^\circ$ und $24,5^\circ$.

Nach dem Flug können die Winkel mit Hilfe des Gleichlichtanteils des Detektorsignals (DC) genauer bestimmt werden. Der Gleichlichtanteil ändert sich mit der mittleren

¹ Im Scanwinkel-Koordinatensystem (s. Abschnitt 4.1) kann die Größe der Öffnung berechnet werden:

$$\zeta \in [\eta_{Erde} - 3^\circ - 0,4^\circ - 2^\circ, \eta_{DS} + 3^\circ + 0,4^\circ + 2^\circ] = [-9,4^\circ, 15,4^\circ]$$

² Der Ursprung des Scanwinkels ζ ist gegenüber der Nullmarke des Encoders um ca 10° versetzt.

Strahlungstemperatur des Gesichtsfelds. Rückt der Rand des Schieberloches ins Gesichtsfeld, so steigt die mittlere Temperatur und mit dieser der Gleichlichtanteil. Zur Bestimmung der beiden Schranken wurden einzelne Interferogramme betrachtet, bei denen der Scanwinkel die grob ermittelten Schranken überschritt (Abb. 4.11 und Abb. 4.12). Aus der Auftragung der DC-Werte über der Messzeit wurde der Zeitpunkt entnommen, bei dem der Anstieg des Gleichlichtanteils beginnt. Der Encoderwert zu diesem Zeitpunkt ist die gesuchte Schranke von $0,67^\circ$ bzw. $25,45^\circ$.

Um IFG zu kennzeichnen, bei denen die Encoderwerte die Schranken überschritten, wurde zu jedem gemessenen IFG der kleinste und der größte eingenommene Encoderwert in Abb. 4.13 aufgetragen. Die eingetragenen Markierungen entsprechen den beiden Schranken. IFG, bei denen außer der Emission der Atmosphäre auch ein Graukörperbeitrag der Schieberwand gemessen wurde, sind so leicht auszusortieren (s. Anhang H).

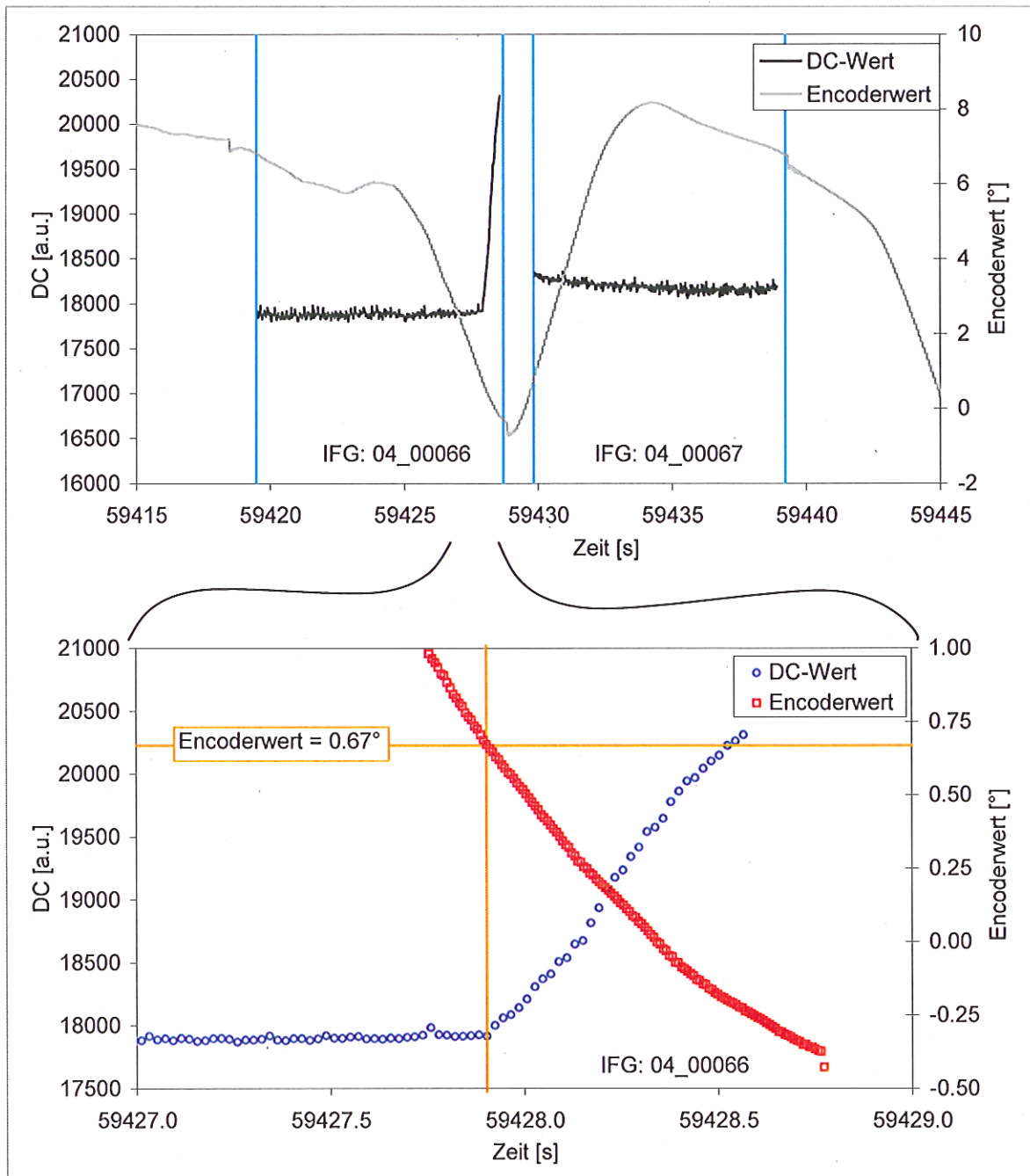


Abb. 4.11 Vermessung der unteren Begrenzung der Schieberöffnung

Bei großen Rollwinkeln wird auch der Scanspiegel mit großen Amplituden gedreht. Die Schieberöffnung, durch die die Atmosphäre gemessen wird, ist so groß, dass unter normalen Flugbedingungen der Rand der Öffnung nicht innerhalb des FOV liegt. Es muss deshalb der Encoderwert bestimmt werden, ab dem das Interferogramm gekennzeichnet werden muss, weil der Rand der Schieberöffnung in das FOV hineinragt. Da der Schieber einen Graukörper darstellt, der wärmer als die Atmosphäre ist, zeigt ein solches Interferogramm einen ansteigenden Gleichlichtanteil (DC).

Das obere Diagramm zeigt den Wert des Gleichlichtanteils und den Encoderwert während zwei aufeinanderfolgenden IFG. Im unteren Diagramm wurde der interessante Bereich vergrößert dargestellt. Man beachte hierbei, dass die Encoderskala in der Vergrößerung verschoben wurde.

Die untere Begrenzung der Schieberöffnung entspricht einem Encoderwert von $0,67^\circ$

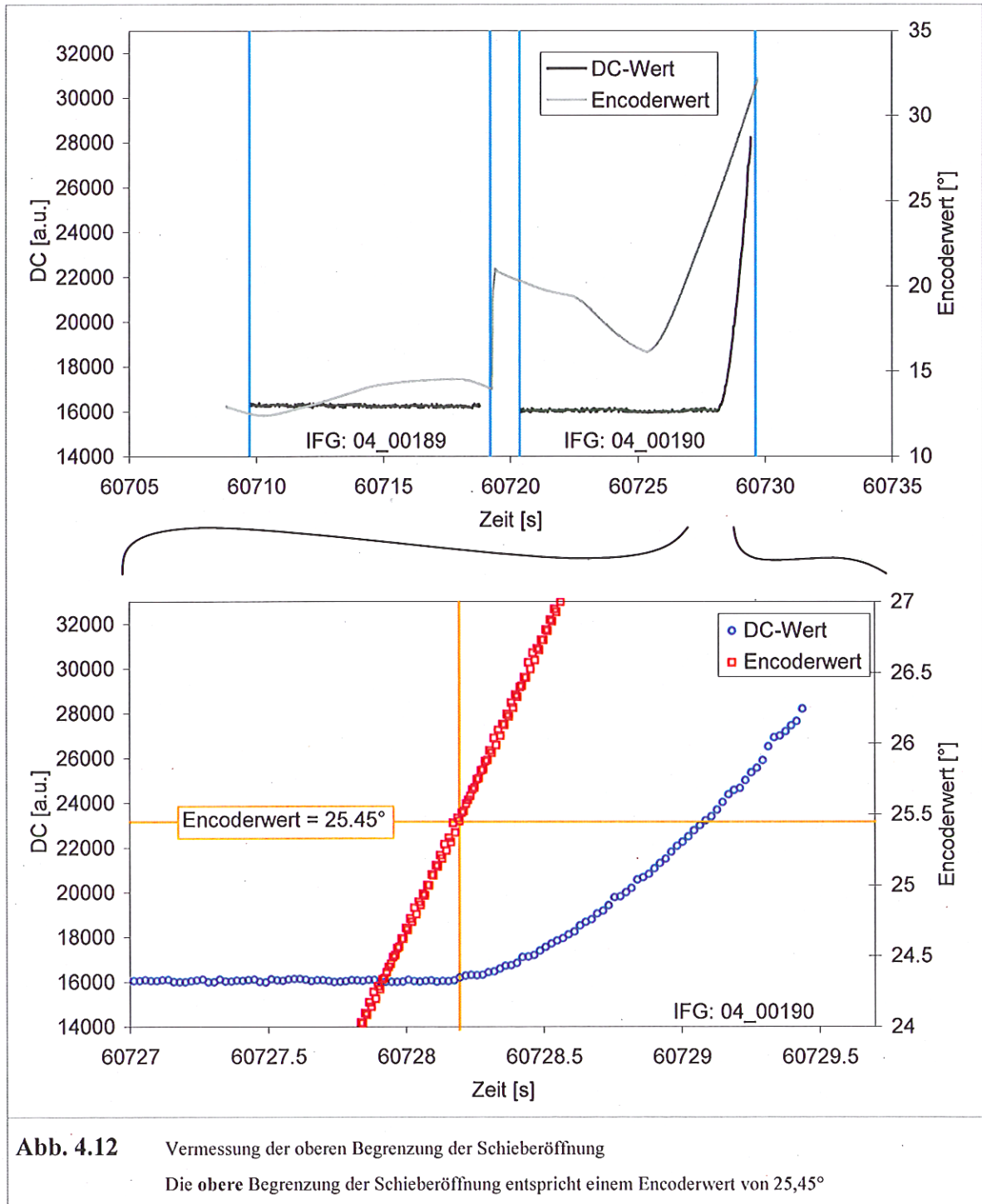


Abb. 4.12

Vermessung der oberen Begrenzung der Schieberöffnung

Die obere Begrenzung der Schieberöffnung entspricht einem Encoderwert von 25,45°

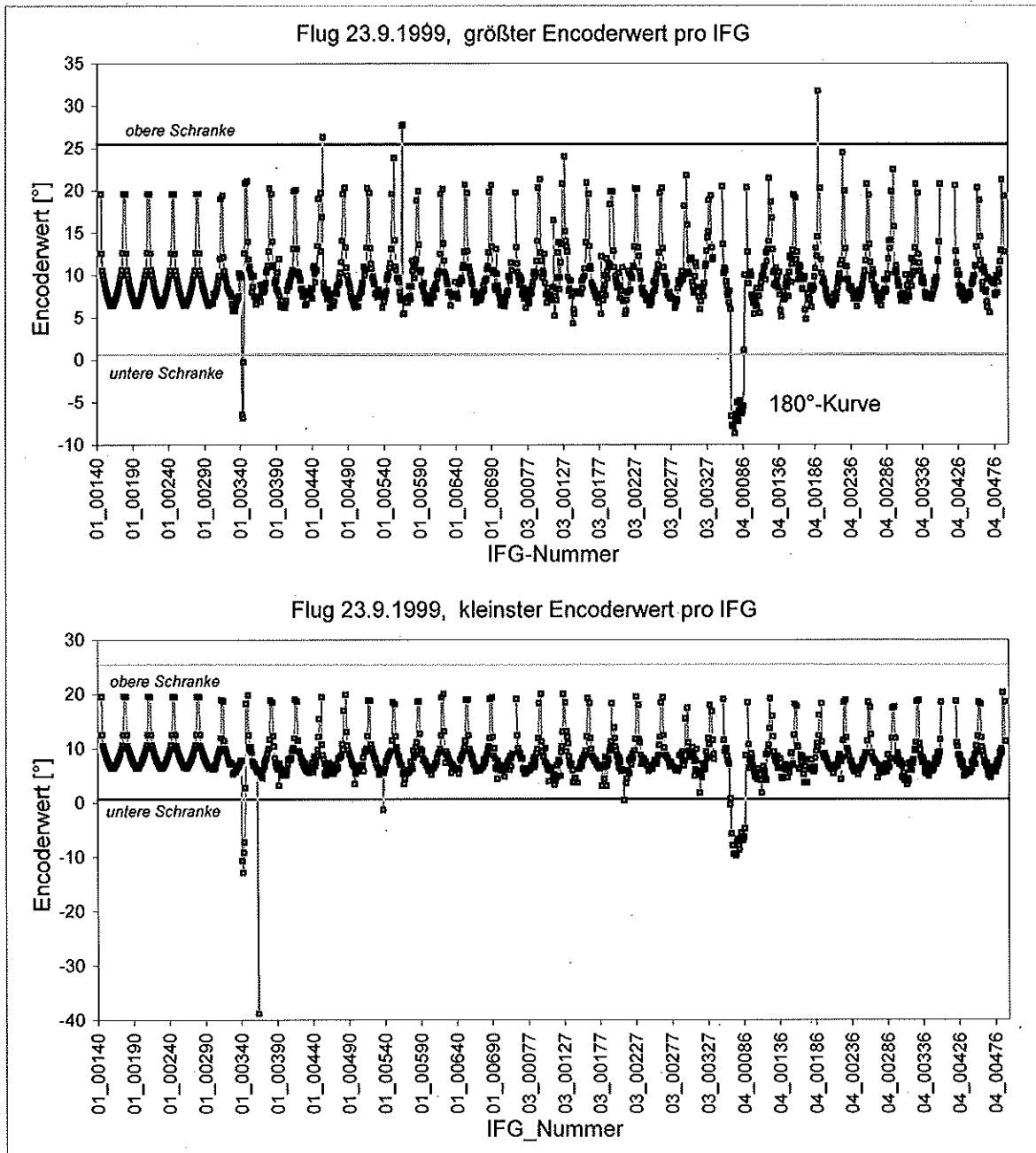


Abb. 4.13 Gesamtübersicht über alle Interferogramme vom Messflug am 23.9.1999

Ist der eingestellte Encoderwert größer als die obere Schranke oder kleiner als die untere Schranke, so passt das FOV nicht mehr durch die Öffnungen in der Gerätewand, das gemessene IFG setzt sich dann aus dem Atmosphärenanteil und aus einem Graukörperanteil der Gerätewand zusammen. Diese IFG müssen gesondert ausgewertet werden.

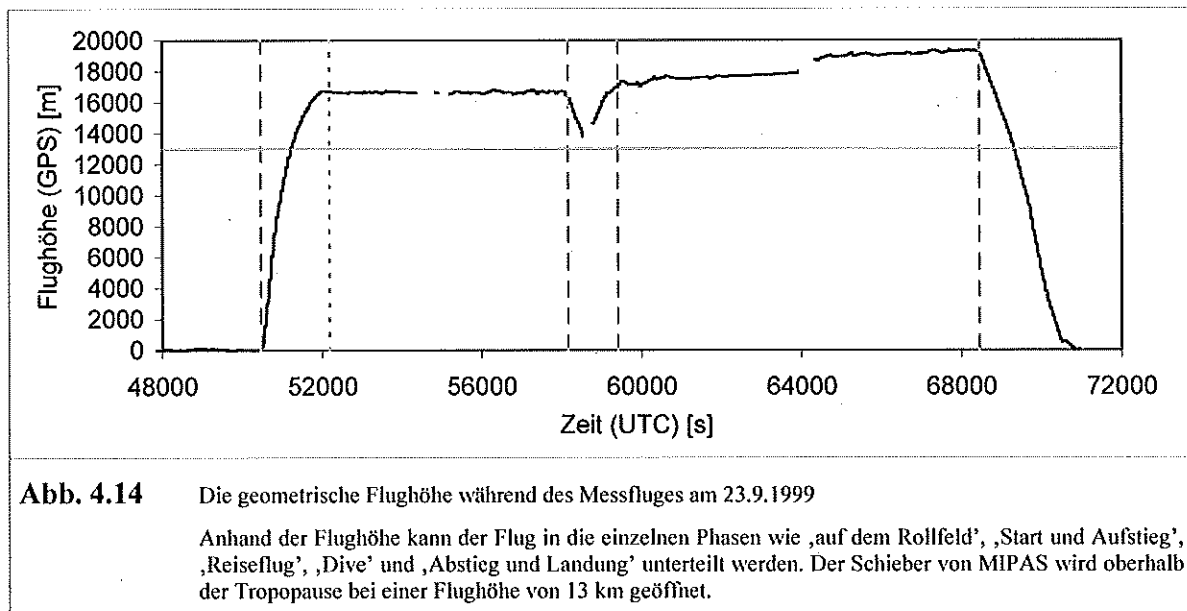
Im oberen Diagramm ist der größte eingestellte Encoderwert pro Interferogramm dargestellt, dieser darf nicht größer als die obere Begrenzung werden.

Im unteren Diagramm ist der kleinste eingestellte Encoderwert pro Interferogramm dargestellt, dieser darf nicht kleiner als die untere Begrenzung sein.

4.6.4 Die Stabilität des Elevationswinkels

Die Stabilität des Elevationswinkels wird in zwei Kategorien unterteilt: die Stabilität während der Aufnahme eines Interferogramms und die Stabilität von einem Interferogramm zum nächsten. Die charakteristischen Fehler in den unterschiedlichen Prozessen und Systemen, die an der Stabilisierung des Elevationswinkels beteiligt sind, wirken sich unterschiedlich auf die beiden Stabilitätskategorien aus. Der Fehler in den Lagewinkeln hat durch die GPS-Stützung des AHRS eine Periode von ca. fünf Minuten. Die Fehler in den Einbauwinkeln, die entweder bei der Bestimmung oder durch Verzug entstehen, bewirken einen nahezu konstanten Elevationsfehler. Fehler bei der Berechnung des Scanwinkels, bei der anschließenden Extrapolation und durch den Regelkreis können von einer Vorgabe zur nächsten variieren.

Aus den gespeicherten Housekeeping-Werten der LOSE kann nach einem Messflug der Fehler bestimmt werden, der durch die Berechnung des Scanwinkels, durch die Extrapolation und durch den Regelkreis entsteht. Dazu wird die Elevation aus dem Istwert des Encoders und den Lagewinkeln bestimmt. Da alle Werte der Lagewinkel nun bekannt sind, können sie am gewünschten Zeitpunkt interpoliert werden. Dadurch kann auch die Qualität der Extrapolation selbst bestimmt werden. Die Korrektur bei Sprüngen in den Lagewinkeln kann anders als im Flug, je nach zeitlicher Position, sowohl am Anfang als auch am Ende des Interferogramms vorgenommen werden. Die so gewonnene bestmögliche Annahme über die reale Elevation der Sichtlinie wird im Folgenden mit „Ist-Elevation“ bezeichnet. Für jedes gemessene Interferogramm wird die über seine Aufnahmezeit gemittelte Ist-Elevation und deren Standardabweichung bestimmt. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Stabilität der Elevation während der Aufnahme eines Interferogramms. Die mittlere Ist-Elevation weicht nur wenige Bogensekunden von der Soll-Elevation ab. Allein mit Hilfe der Housekeeping-Werte können die dominierenden Fehlerquellen nicht berücksichtigt werden. Die mittlere Elevation eines Interferogramms bzw. einer ganzen Limbsequenz wird daher in Kapitel 5 aus gemessenen Spektren bestimmt.



In Abb. 4.15 ist zu jedem Interferogramm die Standardabweichung der Ist-Elevation aufgetragen. Zusammen mit der Information über die Flughöhe (Abb. 4.14) erkennt man, dass die Qualität der Sichtlinien-Stabilisierung von der Flugphase abhängt. Der Bereich 50000-52000 Sekunden ist die Start- und Aufstiegsphase. Hier wird das Flugzeug und damit auch der

MIPAS-Sensor u.a. durch die Turbulenzen in der Troposphäre sehr stark geschüttelt. In dieser Phase werden keine Atmosphärenspektren aufgenommen, da der Schieber erst über der Tropopause geöffnet wird, um keinen Wasserdampf ins Gerät zu lassen. Die Stabilisierung der Elevation wurde deshalb nicht für diese Extremsituation ausgelegt.

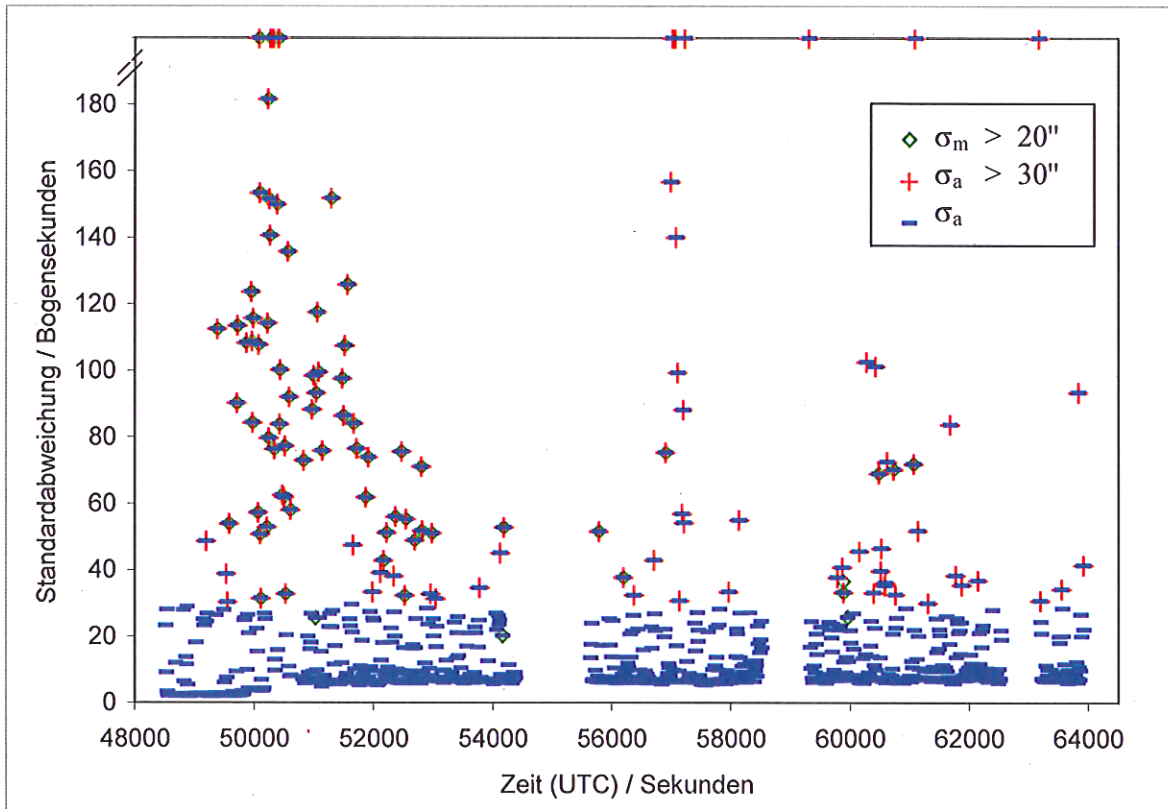


Abb. 4.15 Die Standardabweichung der Ist-Elevation pro IFG, während des Messfluges am 23.9.1999

In diesem Diagramm ist die Standardabweichung σ_a der Ist-Elevation für jedes Interferogramm, auch für die mit geschlossenem Schieber, aufgetragen. Man erkennt die gut stabilisierten Interferogramme mit $\sigma_a < 30''$. Rote Kreuze markieren die IFG mit $\sigma_a > 30''$. Außerdem wurde die Standardabweichung σ_m nur über die mittleren sieben Zeitsekunden des IFG gebildet; IFG mit $\sigma_m > 20''$ sind mit grünen Diamanten markiert.

Bevor die Standardabweichung bewertet wird, werden die Interferogramme aussortiert, die zu Schwarzkörpermessungen gehören, da hier aufgrund der geringeren Anforderung die Stabilisierung immer ausreichend genau ist. Bei den verbleibenden Interferogrammen sind im obigen Diagramm zwei Arten markiert. Diejenigen, bei denen die Standardabweichung der Elevation über die gesamte Interferogramm-Aufnahmezeit groß ist ($\sigma_a > 30''$, rote Kreuze), und diejenigen, bei denen die Standardabweichung auch dann noch groß ist ($\sigma_m > 20''$, grüne Diamanten), wenn der Datenbereich am Anfang und am Ende um jeweils eine Sekunde reduziert ist. Bei den markierten Interferogrammen sind drei Probleme aufgetreten. Erstens kann das Einschwingen zu lange dauern. Dann ist σ_a größer als $30''$, σ_m ist deutlich kleiner als $20''$. In Abb. 4.16 a-e sind Beispiele solcher Interferogramme detailliert dargestellt. Zweitens kann der Scanspiegelregelkreis aus noch ungeklärter Ursache zum Schwingen angeregt werden (Abb. 4.16 f-h). Dies tritt zu beliebigen Zeiten auf. Die Standardabweichungen σ_a und σ_m sind hierbei ähnlich groß, je nach Größe und Dauer der Störung sind sie größer als die gesetzten Schwellwerte. Drittens führt ein Synchronisierungsfehler zwischen IFME und LOSE dazu, dass die Elevation noch während der Datenaufnahme geändert wurde. Bei diesen Interferogrammen ist, wie im ersten Fall, σ_a größer als $30''$, σ_m ist kleiner als $20''$. Die vielen

gut stabilisierten Interferogramme, bei denen sowohl σ_a deutlich kleiner als $30''$ als auch σ_m deutlich kleiner als $20''$ ist, zeichnen sich durch eine kurze Einschwingzeit und eine störungsfreie Mitte aus. Außerdem fand die Änderung zum nächsten Elevationswinkel erst nach Beendigung der Interferogrammaufnahme statt. In Abb. 4.16 a+i sind zwei Beispiele dargestellt.

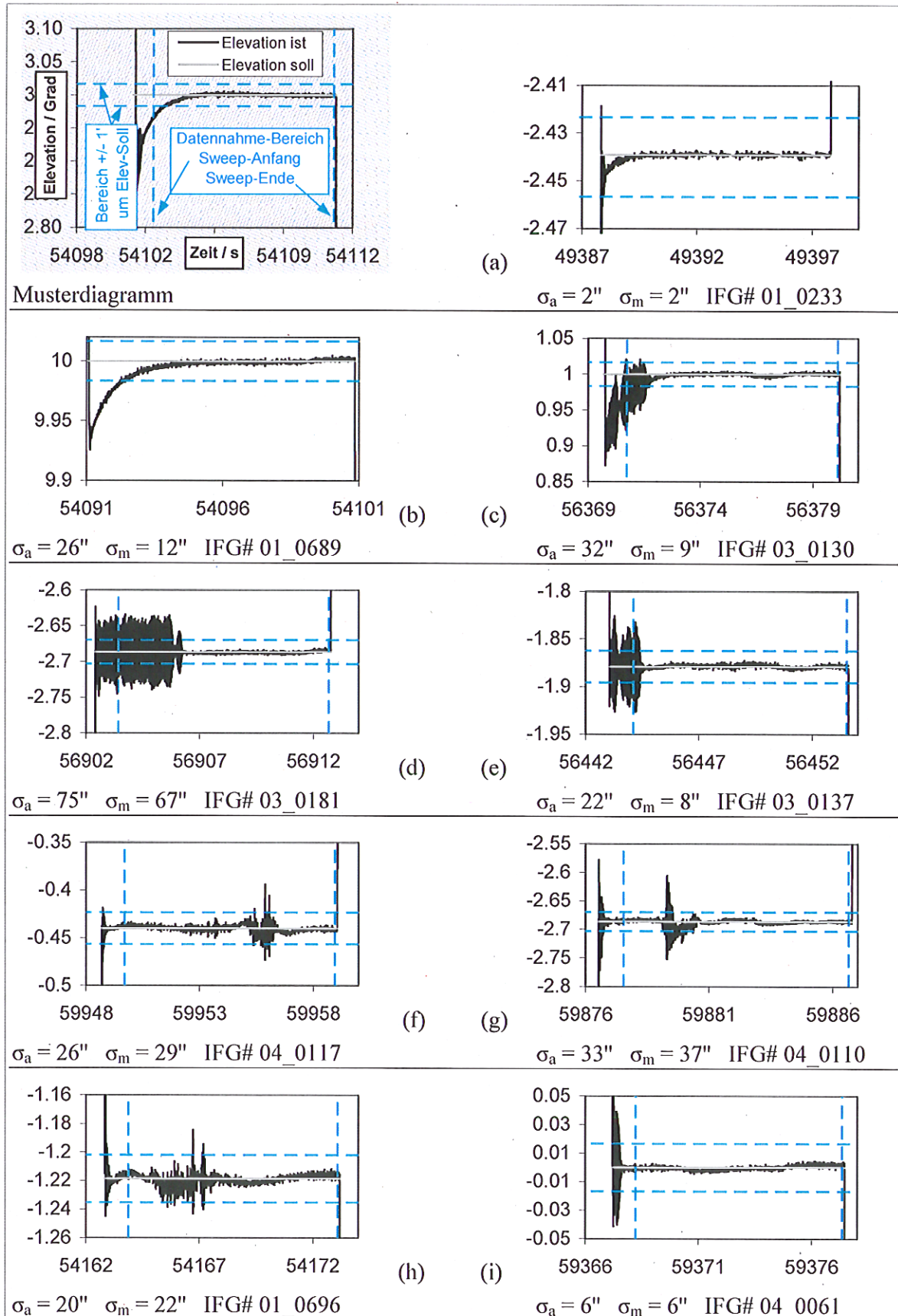


Abb. 4.16 exemplarische Einschwingensituationen vom Messflug.
 Unter den Diagrammen sind die Standardabweichung der Elevation über das gesamte IFG und nur über die Mitte angegeben, Achsenbeschriftung und Legende siehe Musterdiagramm.
 Die Varianten (a) und (i) dominieren die gemessenen Interferogramme mit 91%.

Kapitel 5

Die Validierung der Sichtlinienstabilisierung durch Spektren

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Elevation der Sichtlinie aus einer Sequenz von kalibrierten Spektren bestimmt werden kann. Zuerst wird jedoch kurz skizziert, wie die gemessenen Interferogramme aus der atmosphärischen Emission entstehen und wie aus den Interferogrammen kalibrierte Spektren gewonnen werden. Diese Beschreibung dient vor allem als Grundlage für die spätere Zuordnung von Fehlerquellen in der Elevation und deren Quantifizierung. Außerdem werden in diesem Kapitel kurz das verwendete Strahlungsübertragungsmodell KOPRA (Karlsruhe optimized and precise radiative transfer algorithm) und das Inversionsprogramm KOPRAFIT beschrieben.

5.1 Vom atmosphärischen Signal zum Interferogramm

Wie schon in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, durchläuft die von der Atmosphäre emittierte Strahlung das Interferometer und erzeugt am IR-Detektor ein Interferogramm. Dieses vom IR-Detektor gemessene Signal wird zeitäquidistant abgetastet, und in ein digitales Signal gewandelt. Die Zuordnung der Messpunkte zum Gangunterschied x geschieht mit Hilfe eines parallel zur IR-Strahlung durch das Interferometer laufenden monochromatischen Laserstrahls. Das AC-gekoppelte Signal am Referenzdetektor hängt nur vom Gangunterschied ab. Das Referenzinterferogramm ist kosinusförmig mit einer Periodenlänge, die der Wellenlänge λ des Lasers entspricht. Das zeitabhängige Signal des IR-Detektors wird auf die Zeitpunkte jedes zweiten Nulldurchgangs des Referenzinterferogramms interpoliert. Nach der Reduktion der Bandbreite auf den Bereich des optischen Filters wird jeder 22. Wert gespeichert.

Ist die Responsivität, das Verhältnis zwischen der Ausgangs-Spannung des Detektors und der Intensität des auf den Detektor fallenden Photonenstroms, nicht konstant, sondern eine Funktion des Photonenstroms, so entsteht ein verzerrtes Interferogramm [Kleinert 1998, Kimmig 2001]. Wird bei der Kalibrierung des Spektrums diese Nichtlinearität des Detektors nicht berücksichtigt, sondern von einem konstanten Verhältnis ausgegangen, so entspricht das in erster Näherung einer Multiplikation des gesamten Spektrums mit R/R_k , wobei R die reale Responsivität und R_k der verwendete konstante Wert sind (s. Anhang B).

Während der Kampagne ist leider der folgende Fehler häufiger aufgetreten: Die Regelung der Vorschubgeschwindigkeit des Pendels konnte die Störung durch die starken Vibrationen des Flugzeugs nicht ausregeln, und das Pendel lief kurzzeitig in die falsche Richtung. Weißt das Referenzinterferogramm auf dem dabei zurückgelegten Weg einen Nulldurchgang auf, so

wird ein Interpolationspunkt zusätzlich erzeugt. Da dies nicht vorgesehen war, wurde es bei der Interpolation nicht berücksichtigt. Auf ähnliche Weise können „Spikes“ einen Nulldurchgang des Referenzinterferogramms vortäuschen und so einen Interpolationspunkt zuviel erzeugen. Dies wurde in der geflogenen Interferometerelektronik ebenfalls nicht abgefangen.

Man kann zeigen, dass solch ein zusätzlicher Punkt die Phase und die Wellenzahlachse des Spektrums beeinflussen kann (s. Anhang A). Da hierbei ebenfalls die Intensität der Linien beeinflusst werden kann, werden im Kontext dieser Arbeit solchermaßen auffällige Spektren nicht verwendet.

Die maximal mögliche optische Wegdifferenz des Doppelpendels bei MIPAS-STR beträgt ± 15 cm. Daraus berechnet sich eine unapodisierte Auflösung $dv = 0,033 \text{ cm}^{-1}$. Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Spektralbereich um $10 \mu\text{m}$ ($= 1000 \text{ cm}^{-1}$) ergibt sich daraus ein Auflösungsverhältnis dv/v von 1:30000.

5.2 Vom Interferogramm zum kalibrierten Spektrum

Aus den gemessenen Interferogrammen IFG(x) sollen kalibrierte Spektren gewonnen werden. Dazu wird das IFG fouriertransformiert, und es entsteht ein komplexes Spektrum $S(v)$. Durch geeignete Drehung in der komplexen Ebene, der sogenannten Phasenkorrektur [Trieschmann 2000] und Projektion auf die reelle Achse wird aus dem komplexen Spektrum ein reelles Spektrum erzeugt.

$$S(v) = \text{Re} \left(e^{-i\varphi(v)} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \text{IFG}(x) e^{-i2\pi vx} \cdot dx \right) \quad (5.1)$$

mit:

$S(v)$: berechnetes reelles Spektrum
 $\text{IFG}(x)$: gemessenes Interferogramm
 $\varphi(v)$: spektrale Phasenfunktion

Um das Spektrum in Strahldichteinheiten ($\text{SDE} = \text{nW}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$) umzurechnen, wird eine Zwei-Punkt-Kalibrierung verwendet. Wesentliche Annahme bei diesem Kalibrierungsverfahren ist die Linearität des Detektors, d. h. die Ausgangsspannung hängt linear von dem einfallenden Photonenstrom ab. Unter dieser Voraussetzung kann aus zwei Spektren bekannter spektraler Strahldichte zu jeder spektralen Stützstelle die Kalibrierungsgerade bestimmt werden.

Die Kalibrierungsgerade ändert sich nur langsam mit der Wellenzahl, wie sich bei der Durchführung der Kalibration zeigte. Die Kalibrierungsfunktion wird mit einer spektralen Auflösung von nur 2 cm^{-1} bestimmt, da dadurch das Rauschen verringert werden kann.

Die zwei Punkte der Zwei-Punkt-Kalibrierung sind zum einen das Schwarzkörper-Spektrum $\text{BB}(v)$ (engl. blackbody), das mit Blick auf einen $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ kalten Hohlraumstrahler aufgenommen wird, zum anderen das sogenannte Weltraum-Spektrum $\text{DS}(v)$ (engl. deep space), das unter $+10^\circ$ Elevation aufgenommen wird (s. Abb. 2.6). Dieses Weltraum-Spektrum besteht zu einem großen Anteil aus dem gerätespezifischen Untergrund $U(v)$. Da der atmosphärische Beitrag $\text{ADS}(v)$ verhältnismäßig klein ist, ist es für die Bestimmung der Strahldichte ausreichend, ihn mit Hilfe des Modells KOPRA aus der gemessenen Temperaturverteilung und den Standardmischungsprofilen der Spurengase zu simulieren. Durch die verringerte spektrale Auflösung (2 cm^{-1}) werden im Weltraum-Spektrum nur breitbandige Strukturen des atmosphärischen Emissionsspektrums, keine Linien, aufgelöst. Durch die Kalibrierung werden deshalb die linienförmigen Beiträge nicht aus den Atmosphärenspektren entfernt.

Die Kalibrierung erfolgt in zwei Schritten für jede spektrale Stützstelle. Die im Schwarzkörper-Spektrum enthaltene Strahldichte setzt sich aus der aus Temperatur und Emissivität des Schwarzkörpers berechneten Planck-Verteilung und dem Geräteuntergrund zusammen. Im ersten Schritt wird der noch unbekannte Geräteuntergrund durch das Weltraum-Spektrum angenähert. Der (spektrale) Quotient aus der Differenz zwischen Schwarzkörper-Spektrum und Weltraum-Spektrum und der Planck-Verteilung stellt eine erste Näherung der Steigung der Kalibrierungskurve dar. Multipliziert man den modellierten Atmosphärenanteil des Weltraum-Spektrums hiermit, und zieht ihn vom gemessenen Weltraum-Spektrum ab, so bleibt der Geräteuntergrund übrig. Der so berechnete Geräteuntergrund stellt den Achsenabschnitt der Kalibrierungskurve dar.

Für die beiden Kalibrierungsspektren gilt:

$$\begin{aligned} DS(\nu) &= c(\nu) \cdot ADS(\nu) + U(\nu) \\ BB(\nu) &= c(\nu) \cdot P(\nu, T) \cdot e(\nu) + U(\nu) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Mit:

- DS(ν): gemessenes Kalibrierungsspektrum gegen den Weltraum (deep space)
- c(ν): spektrale Nachweisempfindlichkeit = Steigung der Kalibrierungskurve
- ADS(ν): atmosphärischer Anteil im gemessenen Weltraum-Spektrum
- U(ν): Geräteuntergrund = y-Achsenabschnitt der Kalibrierungskurve
- BB(ν): gemessenes Kalibrierungsspektrum gegen den Schwarzkörper (black body)
- P(ν, T): Planck-Verteilung zur Temperatur T des Schwarzkörpers
- e(ν): Emissionsvermögen des Schwarzkörpers

Mit der Näherung

$$c_0(\nu) = \frac{BB(\nu) - DS(\nu)}{P(\nu, T) \cdot e(\nu)} \quad (5.3)$$

für die Steigung der Kalibrierungskurve und dem durch das Modell angenäherten Atmosphärenanteil $ADS_{calc}(\nu)$ wird der Geräteuntergrund U(ν) bestimmt:

$$U(\nu) = DS(\nu) - c_0(\nu) \cdot ADS_{calc}(\nu) \quad (5.4)$$

Im zweiten Schritt wird vom gemessenen Schwarzkörper-Spektrum nicht mehr das gesamte Weltraumspektrum abgezogen, sondern nur noch der darin enthaltene Geräteuntergrund. Der (spektrale) Quotient mit der erwarteten Planck-Verteilung ergibt die Steigung der Kalibrierungskurve.

$$c(\nu) = \frac{BB(\nu) - (DS(\nu) - c_0(\nu) \cdot ADS_{calc}(\nu))}{P(\nu, T) \cdot e(\nu)} \quad (5.5)$$

In einem dritten Schritt könnte nun noch mal der Geräteuntergrund genauer bestimmt werden. Da der (additive) Untergrund beim späteren Auswerten von Spurengasprofilen mitbestimmt werden kann, ist dieser dritte Schritt nur sinnvoll, wenn er die Grundlage zu Verbesserung der Genauigkeit der Steigung in einem weiteren vierten Schritt darstellt. Die Änderung der Steigung zwischen dem zweiten und vierten Schritt ist jedoch so klein, dass das Verfahren nach dem zweiten Schritt beendet werden kann [Höpfner et al. 2001b].

Zur Kalibration der gemessenen Atmosphären-Spektren A(ν) wird von jedem Atmosphären-Spektrum der darin enthaltene Geräteuntergrund (= Achsenabschnitt der Kalibrierungskurve) abgezogen. Die Differenz wird durch die Steigung der Kalibrierungskurve geteilt.

$$A(\nu) = c(\nu) \cdot S(\nu) + U(\nu) \quad (5.6)$$

mit:

- c(ν): spektrale Nachweispfindlichkeit = Steigung der Kalibrierungskurve aus Gl.(5.5)
- U(ν): Geräteuntergrund = Achsenabschnitt der Kalibrierungskurve aus Gl.(5.4)
- A(ν): Rohspektrum der Atmosphärenmessung
- S(ν): Emissionsspektrum der Atmosphäre
bzw. kalibriertes Messspektrum der Atmosphärenmessung

daraus ergibt sich:

$$S(\nu) = (A(\nu) - U(\nu)) / c(\nu) \quad (5.7)$$

Die wesentlichen Fehlerquellen hierbei sind:

- Eine ungenaue Messung der Schwarzkörpertemperatur,
- eine ungenauer Wert des Emissionsvermögens des Schwarzkörpers,
- eine ungenaue Modellierung des atmosphärischen Anteils im Weltraum-Spektrum,
- die Nichtberücksichtigung der Nichtlinearität des Detektors (s. Anhang B).

5.3 Das 'Linie-für-Linie'-Strahlungsübertragungsprogramm KOPRA und das Inversionsmodul KOPRAFIT

Mit Hilfe des Inversionsprogramms KOPRAFIT [Höpfner 2002] können atmosphärische Parameter aus den gemessenen, kalibrierten Spektren bestimmt werden (dies wird i.F. mit Retrieval bezeichnet). Dazu werden die kalibrierten Spektren mit denen verglichen, die das Strahlübertragungsmodell KOPRA [Stiller et al. 2000] berechnet hat. KOPRA greift zur Berechnung des Spektrums auf einen Satz Eingangsparameter zu, mit denen die Atmosphäre beschrieben wird. Dies sind Profile von Temperatur, Druck und Volumenmischungsverhältnissen von Spurengasen. KOPRAFIT variiert den Wert einer vorher definierten Untermenge dieser Eingangsdaten solange, bis die gemessenen Spektren bestmöglich mit den simulierten übereinstimmen. Außerdem gibt es noch Parameter, die nicht die Atmosphäre, sondern das Messgerät beschreiben. Dies sind der oben erwähnte additive Untergrund des Messspektrums und eine Wellenzahlverschiebung des simulierten Spektrums. Ein für diese Arbeit wichtiger, variierbarer Eingangsparameter ist die Elevation η der Blickrichtung.

5.3.1 KOPRA

Als Strahlungsübertragungsalgorithmus wird bei MIPAS-STR das 'Linie-für-Linie'-Programm KOPRA [Stiller et al. 2000] verwendet. Als Ausgangspunkt der Rechnung dient ein homogenes Gasgemisch in einem definierten Volumen, welches durch seinen Zustand in Form von Druck, Temperatur, chemischer Zusammensetzung etc. bestimmt ist. Dieses Volumen emittiert und absorbiert Strahlung (i. Allg. ist Streuung im IR vernachlässigbar, s.u.), so wie es seinem Zustand entspricht. Entlang des Weges des Sehstrahls durch die Atmosphäre reihen sich solche Luftvolumina aneinander. Am Detektor des MIPAS-STR kommt Strahlung an, zu der jedes dieser Volumina durch Absorption und Emission beigetragen hat. Die numerisch gebildeten Spektren beruhen im Wesentlichen auf Informationen aus Liniendatenbanken (z.B. HITRAN [WWW:HITRAN]), in denen die einzelnen spektroskopischen Größen wie Linienstärke, Linienpositionen und die Parameter für Druck- und Dopplerverbreiterung enthalten sind. Mit geeigneten Annahmen für die Konzentrationen der in den hintereinander liegenden Luftvolumina enthaltenen Gase sowie den Temperatur- und Druckwerten kann ein Spektrum berechnet werden. Dabei wird die

Strahlungsübertragungsgleichung (s. Gleichung (5.8)) eingesetzt, die sowohl die Emission innerhalb des Luftvolumens, als auch die Extinktion durch Absorption und Streuung von eingestrahler und selbstemittierter Strahlung berücksichtigt. Streuung kann aufgrund des niedrigen Streuquerschnittes im IR immer dann unberücksichtigt bleiben, wenn der Partikelgehalt entlang des Sehstrahls nicht durch stratosphärische Wolken oder durch einen Vulkanausbruch stark erhöht ist.

5.3.2 Die Strahlungsübertragungsgleichung

Die spektrale Strahldichte S , die am Beobachterort l_{obs} ankommt, wird durch die Strahlungsübertragungsgleichung beschrieben.

$$S_{\Theta}(v, l_{\text{obs}}) = S_{\Theta}(v, l_0) \cdot \tau(v, l_{\text{obs}}, l_0) + \int_0^{\text{obs}} J(v, l) \cdot \sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v, l) \cdot \tau(v, l_{\text{obs}}, l) \cdot dl \quad (5.8)$$

Im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht entspricht die Quellstärke $J(v, l)$ der Planckfunktion $P(v, T_{\text{kin}}(l))$.

Der auf Volumenelemente bezogene Absorptionskoeffizient $\sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v, l)$ entsteht aus den Absorptionsquerschnitten der einzelnen Gase durch Multiplikation mit der Teilchendichte des Gases und Summation über alle Gase. Zusätzliche Absorption und Extinktion durch Aerosole wird hier nicht berücksichtigt.

$$\sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v, l) = \sum_g \sigma_{\text{g, gas}}(v, l) \cdot \rho_g(l) \quad (5.9)$$

Die spektrale Transmission $\tau(v, l_{\text{obs}}, l)$ von der Quelle (Ort l) zum Beobachter am Ort l_{obs} berechnet sich als:

$$\tau(v, l_{\text{obs}}, l) = \exp\left(-\int_l^{l_{\text{obs}}} \sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v, l) \cdot dl\right) \quad (5.10)$$

Für homogene Bedingungen entlang l (z.B. in einer Küvette) kann das Integral in (5.8) geschlossen angegeben werden:

$$\int_0^{\text{obs}} J(v, l) \cdot \sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v, l) \cdot \tau(v, l_{\text{obs}}, l) \cdot dl \stackrel{\text{homogen in } l}{=} J(v) \cdot (1 - \tau(v, l_{\text{obs}}, l_0)) \quad (5.11)$$

In optisch dünnen Medien sind die Absorptionsquerschnitte klein, die Transmission kann durch die Entwicklung der e-Funktion und Abbruch nach dem ersten Glied genähert werden:

$$\begin{aligned} J(v) \cdot (1 - \tau(v, l_{\text{obs}}, l_0)) &\approx J(v) \cdot \sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v) \cdot (l_{\text{obs}} - l_0) \\ &= J(v) \cdot \sigma_{\text{a, total}}^{\text{Vol}}(v) \cdot (l_{\text{obs}} - l_0) \\ &= J(v) \cdot \sum_g \sigma_{\text{g, gas}}(v) \cdot \rho_g \cdot (l_{\text{obs}} - l_0) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Ohne Hintergrundstrahlung gilt dann für die gemessene Strahldichte S_{homogen} in homogenen, optisch dünnen Medien:

$$S_{\text{homogen}}(v, \Delta l) \approx J(v) \cdot \sum_g \sigma_{\text{g, gas}}(v) \cdot \rho_g \cdot \Delta l \quad (5.13)$$

Im Bereich der Linie eines Gases, $\nu = \nu_0$, ist es anschaulich, den Absorptionsquerschnitt in Linienform Φ und Linienintensität A aufzuteilen. Die Form Φ der Linie wird vor allem durch den Druck, die Höhe A der Linie wird durch die Temperatur bestimmt.

$$\sigma_{g,\text{gas}}(\nu) = A_{g,\text{gas}}(T_{\text{kin}}, \nu_0) \cdot \Phi_{g,\text{gas}}(\nu, p, T_{\text{kin}}) \quad (5.14)$$

$$S_{g,\text{homogen}}(\nu, \Delta l) \approx J(\nu) \cdot A_{g,\text{gas}}(T_{\text{kin}}, \nu_0) \cdot \Phi_{g,\text{gas}}(\nu, p, T_{\text{kin}}) \cdot \rho_g \cdot \Delta l \quad (5.15)$$

5.3.3 KOPRAFIT

Die bei MIPAS-STR verwendete Horizontsondierung liefert eine Sequenz von Spektren unter unterschiedlichen Blickwinkeln. Das Instrument schaut entsprechend Abb. 2.2 durch die Atmosphärenschichten in den kalten Weltraum. Die Strahlungsübertragung erfolgt entlang des gesamten Sehstrahls bis zum Experiment. I. Allg. liefert dabei jeweils die Schicht des Tangentenpunktes, des Punktes mit dem geringsten Abstand zur Erdoberfläche, den größten Beitrag zum Spektrum. Die mit Hilfe des Vorwärtsmodells KOPRA berechneten Spektren lassen sich durch gezielte Variation des Spurengas-Konzentrations-Profiles, im Folgenden abgekürzt durch vmr-Profil (vmr = volume mixing ratio), des Temperatur-Profiles und des Blickwinkels an die gemessenen Spektren angleichen. Im Gegensatz zum früher verwendeten 'onion-peeling'-Verfahren RAT [Clarmann 1994] werden beim Retrievalprogramm KOPRAFIT die Parameter aller Atmosphärenschichten gleichzeitig aus allen verwendeten Spektren einer Sequenz gewonnen [Höpfner et al. 2001a].

Da die Gaskonzentration in mehr Schichten bestimmt werden soll, als Tangentschichten vorhanden sind, ist das Problem in aller Regel nicht ausreichend bestimmt. Deshalb müssen Zusatzbedingungen eingeführt werden. Im Fall der Auswertung der MIPAS-STR Spektren wird deshalb gefordert, dass die Form des gewonnenen Profils der Form des A-priori-Profiles möglichst ähnlich ist. Dieses Regularisierungs-Verfahren geht auf A. Tikhonov und D. Phillips zurück [Phillips 1962, Tikhonov 1963]. Mathematisch formuliert, sieht die Regularisierung folgendermaßen aus:

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S_y^{-1} K_i + \gamma L^T L)^{-1} [K_i^T S_y^{-1} (y - F(x_i)) + \gamma L^T L (x_a - x_i)] \quad (5.16)$$

Mit

i:	Index der Iteration
x_i :	Vektor mit den Retrievalgrößen
K_i :	Matrix mit den Ableitungen
S_y :	Kovarianzmatrix der Messung
y:	Vektor mit dem gemessenen Spektrum
$F(x_i)$:	Mit KOPRA aus dem Profil x_i berechnetes Spektrum
γ :	Regularisierungsparameter
L:	Regularisierungsoperator der ersten Ableitung
x_a :	Vektor mit dem A-priori-Profil, $x_0 = x_a$

Im Unterschied zu einem „normalen“ least-square-Verfahren, trägt bei dieser Form der Regularisierung nicht nur die Differenz zwischen Messwert und Funktionswert zur Fehlersumme bei, sondern auch die Differenz zwischen der Steigung des Profils und deren A-priori-Wert. Durch Wahl des Regularisierungsparameters γ kann die Gewichtung zwischen dem Beitrag der Messwerte und dem Beitrag des Profils balanciert werden. Auf die Wahl des geeigneten Wertes wird in Abschnitt 5.6 eingegangen. Für $\gamma = 0$ geht Gleichung (5.16) in eine „normale“ Approximation ohne Zusatzbedingung über.

KOPRAFIT unterscheidet im Hinblick auf die Regularisierung zwei Arten von Parametern. Die erste Gruppe enthält Parameter, von denen genau einer pro Spektrum oder pro Sequenz

bestimmt wird. Solche Parameter werden nicht regularisiert. Zu dieser Gruppe gehören u. a. der Elevationswinkel und der Offset.

Zur zweiten Gruppe gehören die Profile (p, T, vmr), wenn mehr Schichten bestimmt werden, als Spektren vorhanden sind. Das Regularisierung-Verfahren kann aus mehreren implementierten ausgewählt werden.

5.4 Elevationsbestimmung mit Hilfe von KOPRAFIT

Wie oben erwähnt, kann mit Hilfe von KOPRAFIT die Elevation der Blickrichtung, unter der ein Spektrum gemessen wurde, ermittelt werden. Dabei kann entweder jedes Spektrum einzeln prozessiert werden, oder es kann für die ganze Limbsequenz eine gemeinsame Konstante bestimmt werden, die zur jeweiligen nominellen Elevation addiert werden muss. Die Differenz zwischen nomineller Elevation und der von KOPRAFIT bestimmten wird hier als *Elevationsabstand* δ definiert. Zusätzlich zum Elevationsabstand können alle erwähnten atmosphärischen und sonstigen Parameter mitvariiert werden. Dabei sollte aber beachtet werden, dass zwar theoretisch alle Parameter voneinander unabhängig sind, dass es aber u. a. durch das Rauschen in den gemessenen Spektren Kombinationen von Parametern gibt, die praktisch voneinander abhängig sind.

Ändert man die Elevation hin zu kleineren Winkeln, so wird die Tangentenhöhe kleiner und der Weg durch die Atmosphäre länger. Vor allem durch das nach unten exponentiell ansteigende Druckprofil wird bei optisch dünnen Medien, und nur solche sollen hier betrachtet werden, die Strahldichte in den Emissionslinien vergrößert. Bei einem mit der Höhe konstanten Temperatur- und Volumenmischungsprofil entspricht die Änderung der Elevation einer Skalierung der gemessenen Strahldichte. Andere Möglichkeiten, die Strahldichte in den Linien zu vergrößern sind: Erhöhen des Drucks, Erhöhen der Temperatur und Erhöhen des Mischungsverhältnisses des die Linie emittierenden Gases. In simulierten, d.h. rauschfreien Spektren lassen sich die letzten drei Einflüsse trennen. Die Linienform wird vor allem durch das Druckprofil bestimmt. Das Temperaturprofil beeinflusst hauptsächlich die Form der Bande(n) und die Strahldichte der Linien. Eine Änderung des Mischungsprofils bewirkt eine Skalierung des Spektrums. Schon bei simulierten Spektren kann nicht gleichzeitig noch Information über die Elevation aus den Spektren gewonnen werden. Standardmäßig wird deshalb das Druckprofil unabhängig aus Analysedaten von ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) gewonnen und festgehalten.

Die Bestimmung einer der vier Größen, die die Strahldichte beeinflussen, wird umso einfacher und genauer, je mehr der übrigen drei Größen bekannt sind. Zur Bestimmung der Elevation soll darum auch ein festgehaltenes vmr-Profil verwendet werden. Am besten bekannt ist das vmr-profil eines Gases, wenn das Gas weder durch chemische noch physikalische Prozesse zerstört wird oder entsteht. Dann ändert sich horizontal und vertikal das vmr kaum und Mischungsprozesse spielen eine kleine Rolle. Ein solches Gas ist CO₂, das außerdem noch den großen Vorteil hat, dass es im mittleren Infrarot starke Linienintensitäten aufweist (Abb. 5.2 oben). CO₂ weist allerdings eine jahreszeitliche Variation (1-3 ppmv, Südhemisphäre) und einen über die Jahre ansteigenden Trend (1-2 ppmv/a) auf [WWW:NOAA], verglichen mit dem absoluten Mischungsverhältnis von 360 ppmv (1999 in 17 km Höhe, im antarktischen Polarwirbel) sind diese Einflüsse allerdings klein. Das auf der Geophysica installierte In-situ-Gerät HAGAR [Riediger 2000] misst CO₂ mit einer hohen Genauigkeit (0,1%), so dass das an und für sich schon gute Standardprofil an die aktuelle Atmosphärensituation angepasst werden kann (Abb. 5.1).

Selbstverständlich kann aus dem Spektrum einer Tangentenhöhe, selbst bei festgehaltener Elevation, kein komplettes Temperaturprofil abgeleitet werden. Zur Bestimmung der

Elevation eines einzelnen Spektrums muss daher das Temperaturprofil vorgegeben werden. Für die in Abschnitt 5.7 beschriebenen Ergebnisse wurde dazu das Temperaturprofil, ebenso wie das Druckprofil, aus Analysedaten von ECMWF verwendet.

Vorversuche haben gezeigt, dass aus einer Limbsequenz zwar das Temperaturprofil bestimmt werden kann, aber nicht gleichzeitig die Elevation jedes einzelnen Spektrums. Gute Ergebnisse liefert jedoch die Bestimmung der gemeinsamen Konstante, um die die nominelle Elevation korrigiert wird (Abschnitte 5.6).

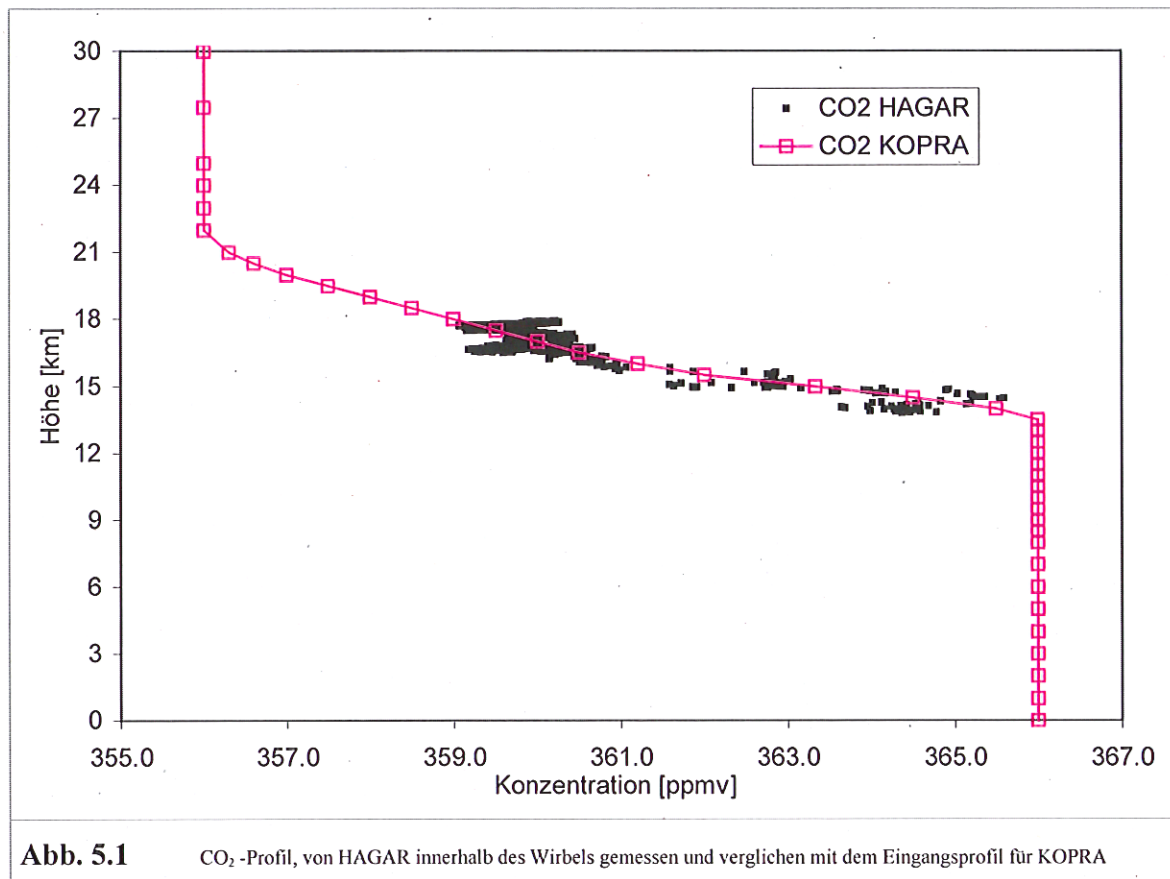


Abb. 5.1 CO₂-Profil, von HAGAR innerhalb des Wirbels gemessen und verglichen mit dem Eingangsprofil für KOPRA

Der Spektralbereich, der zur Bestimmung der Elevation verwendet wird, soll möglichst keine starke Signaturen von Gasen enthalten, deren Volumenmischungsprofil nicht bekannt ist. Abb. 5.2 oben zeigt ein simuliertes Spektrum einer Atmosphäre, die nur CO₂ enthält. Man erkennt die beiden zur Elevationsbestimmung verwendbaren Banden um 781 und 960 cm⁻¹. In derselben Abbildung ist in der Mitte ein gemessenes Spektrum dargestellt. Hieran kann man erkennen, in welchen Bereichen, und wie stark die übrigen atmosphärischen Spurengase Signaturen besitzen. Die Bande bei 781 cm⁻¹ stellt sich dabei zur Bestimmung der Sichtlinie als weniger gut geeignet heraus, da sich in diesem Bereich noch starke Linien von Ozon befinden. Außerdem ist hier das sogenannte Kontinuum (Linien, die so dicht sind, dass sie mit MIPAS-STR nicht spektral aufgelöst werden können), hervorgerufen von einigen FCKWs (F10, F22, F113), Chlornitrat, und Ozon sehr groß. Bei der Auswertung lässt sich der nach der Kalibrierung in den Spektren verbleibende Teil des Geräteuntergrunds nicht vom Kontinuum trennen und stellt daher eine Fehlerquelle für die Stahldichte in den Linien dar. Im untersten Spektrum von Abb. 5.2 ist die Bande bei 960 cm⁻¹ vergrößert dargestellt. Des weiteren ist der Bereich markiert, der für die Auswertung der Elevation im Folgenden verwendet wird. Er zeichnet sich dadurch aus, dass hier so wenig wie möglich Gase außer CO₂ Signaturen haben. Es sind dies sehr schwache Linien von Wasser und die ebenfalls schwache Bande von SF₆ bei 948 cm⁻¹.

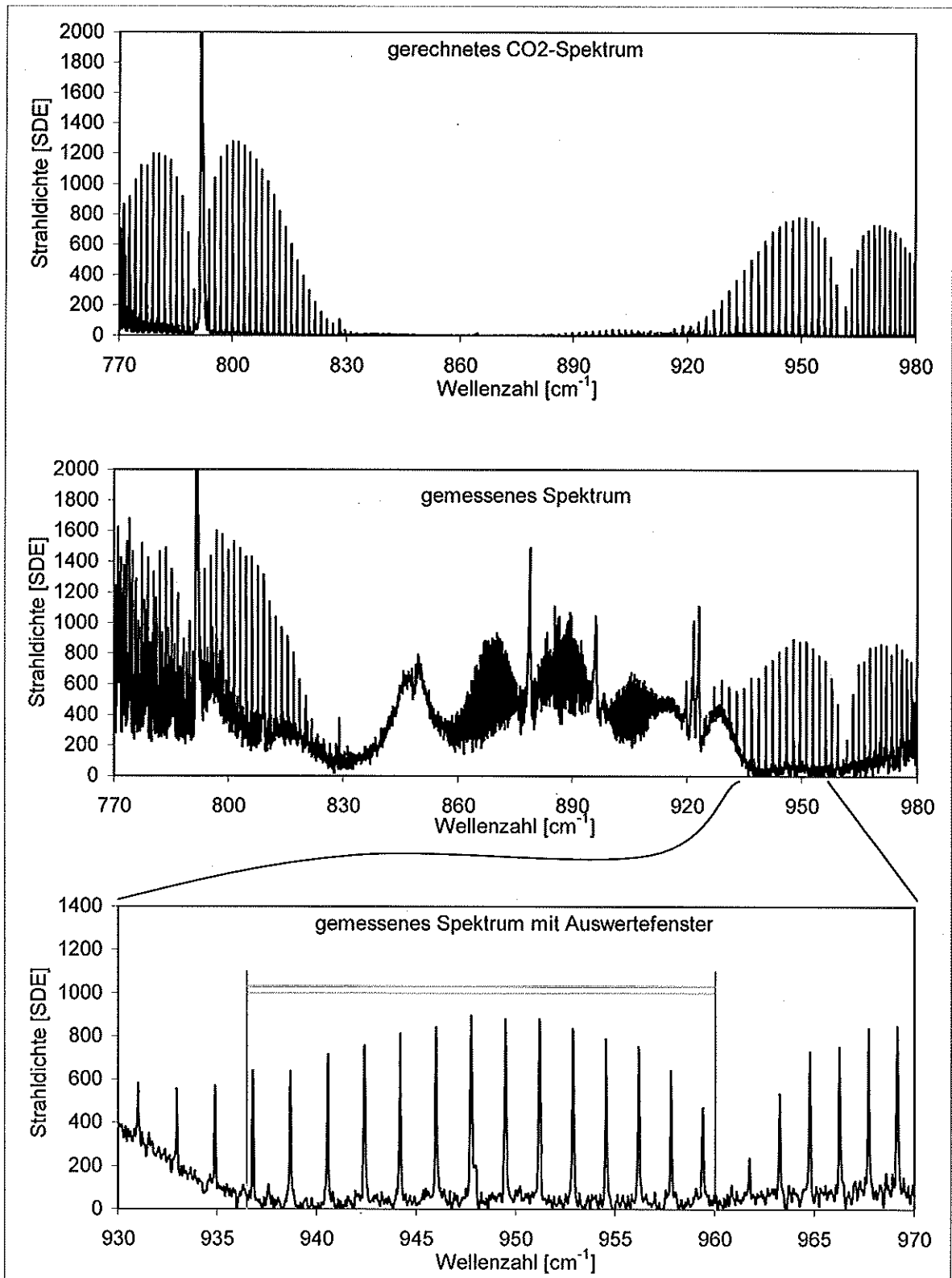


Abb. 5.2

Auswahl des zur Auswertung verwendeten Spektralbereichs (Auswertefenster).

Im obersten Diagramm ist ein gerechnetes CO₂-Spektrum dargestellt.

Im mittleren Diagramm ist ein gemessenes Spektrum dargestellt. Bereiche, die nicht nur CO₂ Signaturen beinhalten, sind deutlich erkennbar.

Im untersten Diagramm ist ein Zoom des gemessenen Spektrum dargestellt, der zur Auswertung verwendete Bereich ist markiert.

5.5 Auswahl der Spektren für eine gemeinsame Korrektur der Elevation einer ganzen Limbsequenz

Soll ein gemeinsamer Elevationsabstand δ bestimmt werden, so muss zuerst untersucht werden, welche und wie viele Spektren einer Limbsequenz dazu verwendet werden sollen. Ein Aspekt ist die Anzahl. Ist der zu bestimmende Elevationsabstand eine Konstante in der Zeit, bzw. ändert er sich nur langsam, dann ist es vorteilhaft, viele Spektren zu benutzen, weil dann der Fehler beim Mitteln klein wird. Ändert sich andererseits der Elevationsabstand schnell, so ist es besser, nur wenige Spektren zu verwenden, da dann der Zeitraum, über den gemittelt wird, kurz ist. A-priori und theoretisch kann die Anzahl nicht festgelegt werden. Konstante und sich langsam verändernde Elevationsabstände werden durch einen Fehler in der LOS-Kalibrierung und durch (thermischen) Verzug des Instruments erzeugt. Schnell variierende Elevationsabstände werden u.a. durch die GPS-Verfälschung der Lagewinkelmessung (s. Kapitel 3) verursacht. Diese Störung hat eine dominierende Periodenlänge von ca. fünf Zeitminuten [Maucher 1999]. Eine Limbsequenz von MIPAS besteht aus 14 Messgeometrien à 10 Sekunden, also insgesamt etwas mehr als zwei Minuten. Um die GPS-Verfälschung auflösen zu können, scheint es vernünftig zu sein, nur eine Sequenz gleichzeitig auszuwerten.

Bildet man die Ableitung des Spektrums nach dem Elevationswinkel, so sieht man, dass die Winkel nach oben eine sehr kleine Abhängigkeit aufweisen und diese Abhängigkeit nach unten zunimmt (Abb. 5.3). Deshalb sind die unteren Winkel die wichtigeren, hierin steckt mehr Information über die Elevation. Deshalb erzeugt das Rauschen in den Spektren einen von unten nach oben stark zunehmenden statistischen Fehler in der abgeleiteten Elevation. In Abb. 5.4 ist die nach Gleichung (5.18) berechnete Standardabweichung des aus einem Spektrum ermittelten Elevationsabstands δ über der Elevation aufgetragen. Der Fehler wurde für ein spektrales Rauschen von $\sigma = 30 \text{ nW}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-1})$ berechnet. Bei der Simulation ist es im Gegensatz zur Realität möglich, für das Retrieval dasselbe Temperatur- und vmr-Profil zu verwenden, wie bei der Generierung des Spektrums. Dadurch lassen sich die einzelnen Fehlerquellen trennen (hier wird nur der Fehler durch das Rauschen in den Spektren betrachtet, die sonstigen Fehlerquellen werden in Abschnitt 5.11 näher untersucht). In Abb. 5.5 ist dargestellt, wie sich die Standardabweichung des Elevationsabstands theoretisch durch gleichzeitige Verwendung mehrerer Spektren einer Sequenz verkleinert. Einmal wurde ausgehend vom Spektrum zum größten Elevationswinkel ($+3^\circ$) immer das Spektrum des nächstkleineren Elevationswinkels zur Sequenz dazugefügt. Erwartungsgemäß nimmt der Fehler dabei stark ab, da der Einzelfehler des dazukommenden Spektrums kleiner ist als der Gesamtfehler. Bei der zweiten Variante wird mit dem Spektrum zur kleinsten Elevation begonnen. Aus Gründen, die am Ende dieses Abschnittes erläutert werden, werden die drei untersten Tangentenhöhen verworfen, so dass der kleinste Elevationswinkel $-2,44^\circ$ beträgt. Bei dieser zweiten Variante zeigt sich, dass nicht jedes dazukommende Spektrum den Gesamtfehler verringert. Ab dem dritten verwendeten Spektrum ergibt sich keine sichtbare Verkleinerung des Gesamtfehlers durch neu hinzukommende Spektren.

Es gibt noch einen weiteren Aspekt bei der Bestimmung eines gemeinsamen Elevationsabstandes für mehrere Spektren. Welcher Wert wird bestimmt, wenn Elevationsfehler und Elevation nicht mehr unabhängig sind, sondern der Elevationsfehler von der Elevation selber abhängt? Dazu kommt es z.B., wenn bei der LOS-Kalibrierung die Steigung $d\eta/d\sigma$ falsch gemessen wird. In Abb. 5.6 ist das Ergebnis einer Simulation dargestellt, bei der der Elevationsfehler der einzelnen Spektren linear von der nominellen Elevation abhängt. Zur Berechnung der Spektren wurde das gleiche Temperaturprofil verwendet, wie als A-priori-Profil. Es wurde sowohl nur die Elevation ('_L'), als auch Elevation und Temperaturprofil ('_LT') gleichzeitig bestimmt. In beiden Fällen zeigt sich,

dass das Ergebnis nur durch die Spektren der tiefen Elevationen beeinflusst wird. Der bestimmte Elevationsabstand entspricht dem mittleren Elevationsfehler der unteren 2-3 Spektren (Elevationswinkel: -2.44° , -2.17° , -1.88°). Diese Beobachtung bestätigt die obige Aussage, dass bei der Mittelung des Elevationsabstands der einzelnen Spektren der statistische Fehler nur durch die untersten drei Spektren verkleinert wird, und nur diese deshalb effektiv zum gewichteten Mittelwert beitragen.

Die Standardabweichung des ermittelten Elevationsabstands (Abb. 5.4) ist für das Spektrum mit der kleinsten Elevation am kleinsten, da hier die Ableitung der Strahldichte nach der Elevation am größten ist. Andererseits können vor allem bei den Spektren der unteren Tangentenhöhen, also mit kleinen Elevationswinkeln, Wolken im Gesichtsfeld sein. Dies kann durch das Strahlübertragungsmodell nur unzureichend modelliert werden, da hierzu zusätzliche Information über Zusammensetzung, Dichte, Höhe und Ausdehnung der Wolke notwendig ist. Sind unter den untersuchten Spektren einer Limbsequenz solche 'Wolkenspektren', so wird der bestimmte Elevationsabstand fehlerhaft.

Da Wolken in erster Näherung einen Graukörper darstellen, sind sie in den Spektren durch einen breitbandigen Untergrund erkennbar. Beim Retrieval mit KOPRA/KOPRAFIT versteckt sich dieser im sogenannten Offset (Verschiebung der Basislinie). Durch Bestimmen des Offsets zu jedem Spektrum kann man solche Spektren mit Wolkenuntergrund herausfiltern. In Abb. 5.7 ist der Offset für alle Spektren aufgetragen, außerdem sind die untersten drei Elevationswinkel ($-2,69^\circ$, $-2,91^\circ$, $-3,12^\circ$) durch Kreuze markiert. Es fällt auf, dass fast alle Wolkenspektren in diesen untersten drei Winkeln auftreten. Da fast alle Limbsequenzen betroffen sind, wurden einheitlich die Spektren zu den untersten drei Elevationswinkeln bei der Bestimmung des Elevationsabstands weggelassen. Der tiefste, ausgewertete Elevationswinkel beträgt $-2,44^\circ$.

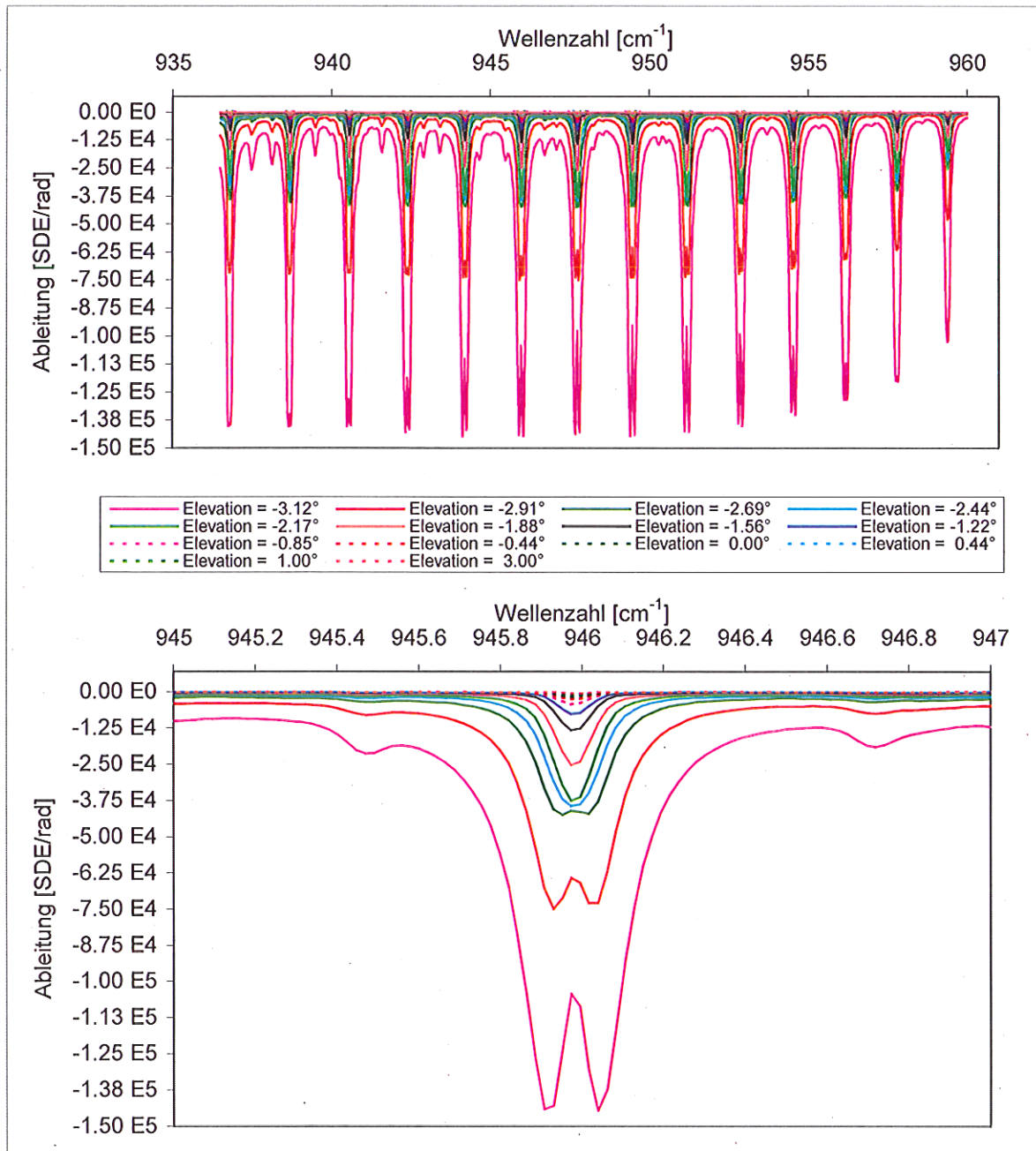


Abb. 5.3 Ableitung der Strahldichte nach der Elevation in Abhängigkeit von der Elevation.

Das obere Diagramm zeigt im verwendeten Auswertefenster die simulierte Ableitung der Strahldichte nach der Elevation für verschiedene Elevationswinkel. Das untere Diagramm zeigt die Vergrößerung im Bereich einer einzelnen Linie.

Man beachte auch, dass die Linienmaxima für tiefe Tangentenpunkte gesättigt sind. Diese drei untersten Elevationswinkel werden, wie im Folgenden beschrieben ist, für die Bestimmung der Elevation nicht verwendet.

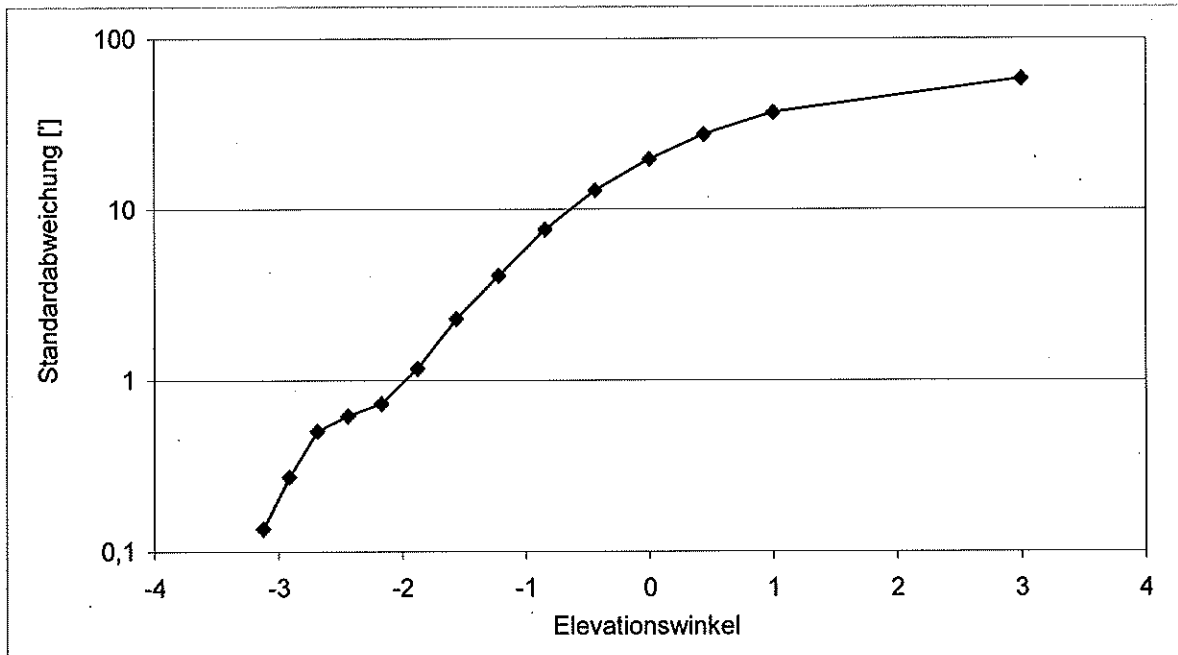


Abb. 5.4 Standardabweichung des aus einem Spektrum bestimmten Elevationsabstands δ .

Aufgetragen ist der aus rein statistischem Rauschen im Spektrum entstehende Fehler des Elevationsabstands in Abhängigkeit von der Elevation. Die hierbei verwendete Standardabweichung des spektralen Rauschens beträgt $30 \text{ nW}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-1})$.

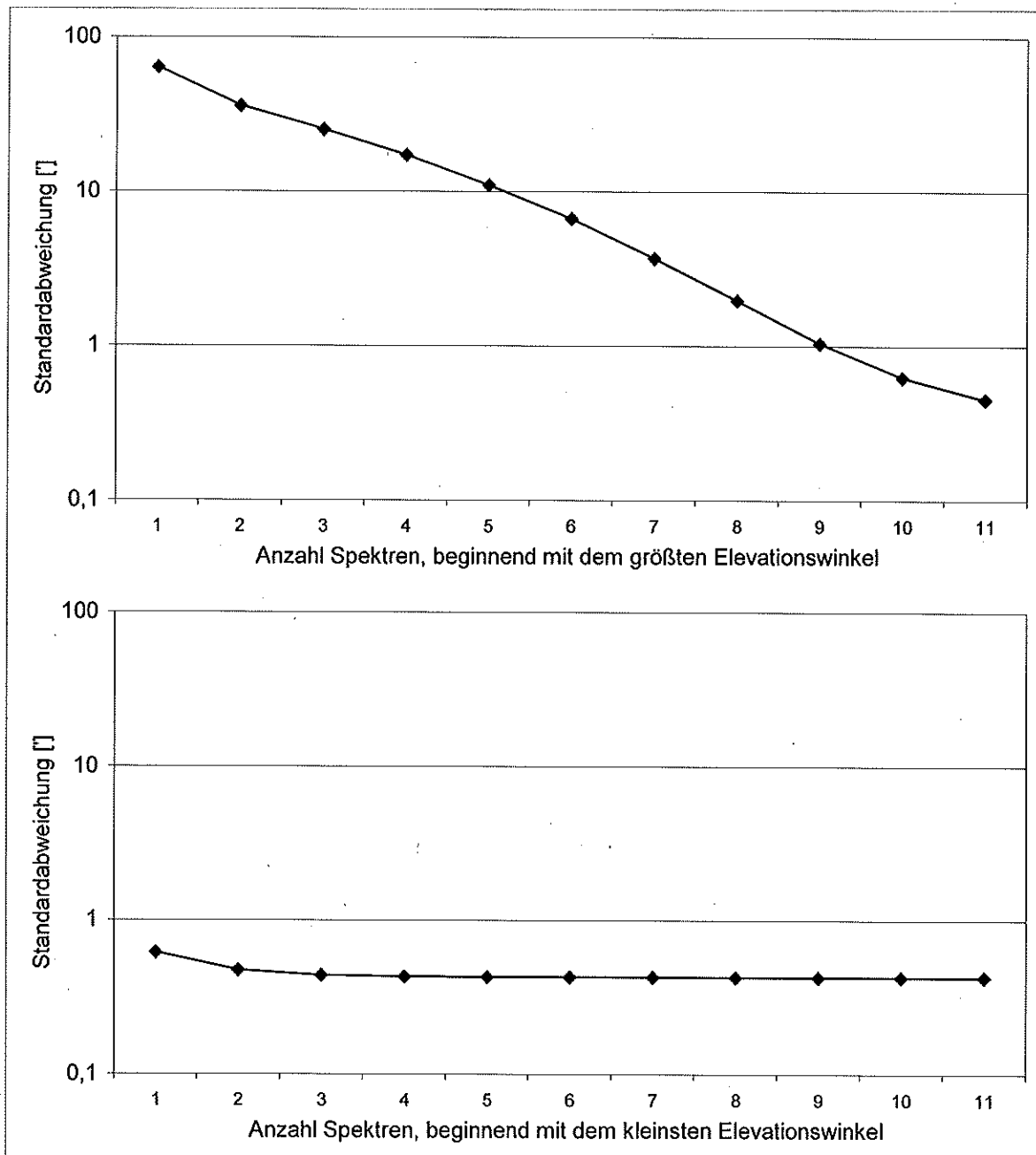


Abb. 5.5 Fehler bei der Bestimmung des gemeinsamen Elevationsabstands δ aus mehreren Spektren einer Sequenz. In den beiden Diagrammen ist dargestellt, wie sich der statistische Fehler durch Zusammenfassung von mehreren Spektren entwickelt. Im oberen Diagramm ist der Fall von oben nach unten dargestellt. Der Fehler des dazukommenden Spektrums ist kleiner als der Gesamtfehler, der Gesamtfehler wird dadurch immer kleiner. Im unteren Diagramm ist der Fall von unten nach oben dargestellt. Der Fehler des dazukommenden Spektrums ist ungefähr ab dem dritten Spektrum größer als der Gesamtfehler, der Gesamtfehler wird dadurch nicht mehr kleiner. Die gewichtete Mittelung ist in Anhang C beschrieben.

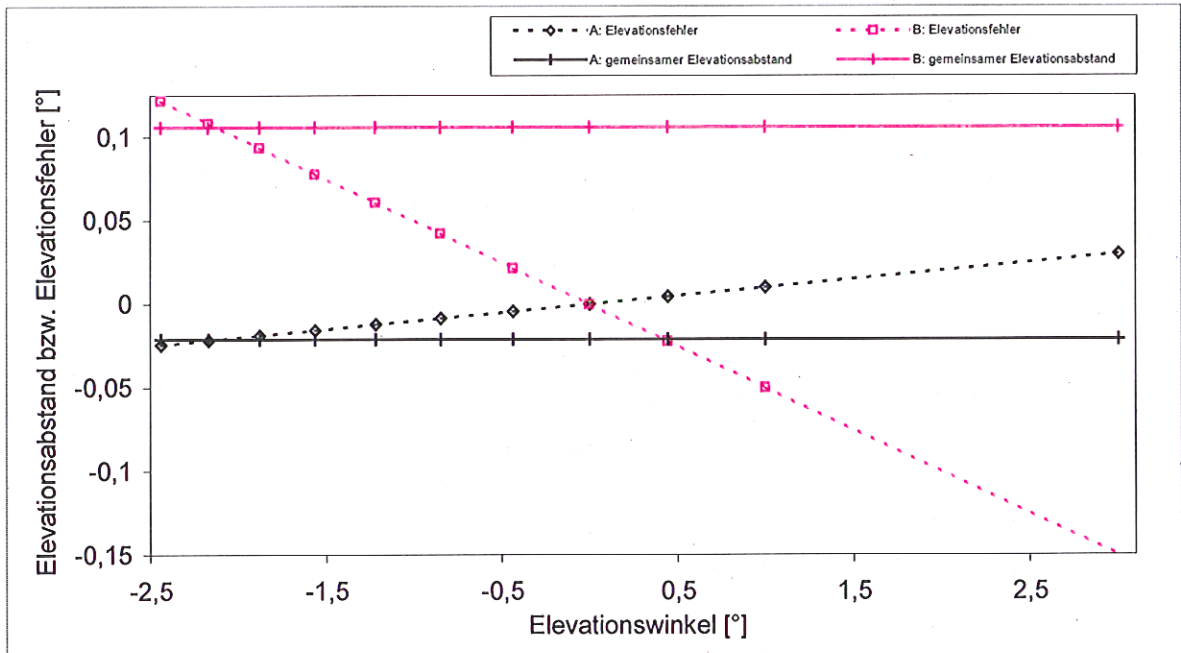


Abb. 5.6

Der gemeinsame Elevationsabstand δ , wenn der Elevationsfehler linear von der Elevation abhängig ist.

Dargestellt sind die aus allen elf Spektren einer Sequenz bestimmten Elevationsabstände für zwei verschiedene Skalierungsfaktoren (A: 0,01; B: -0,05) des Elevationsfehlers von der Elevation.

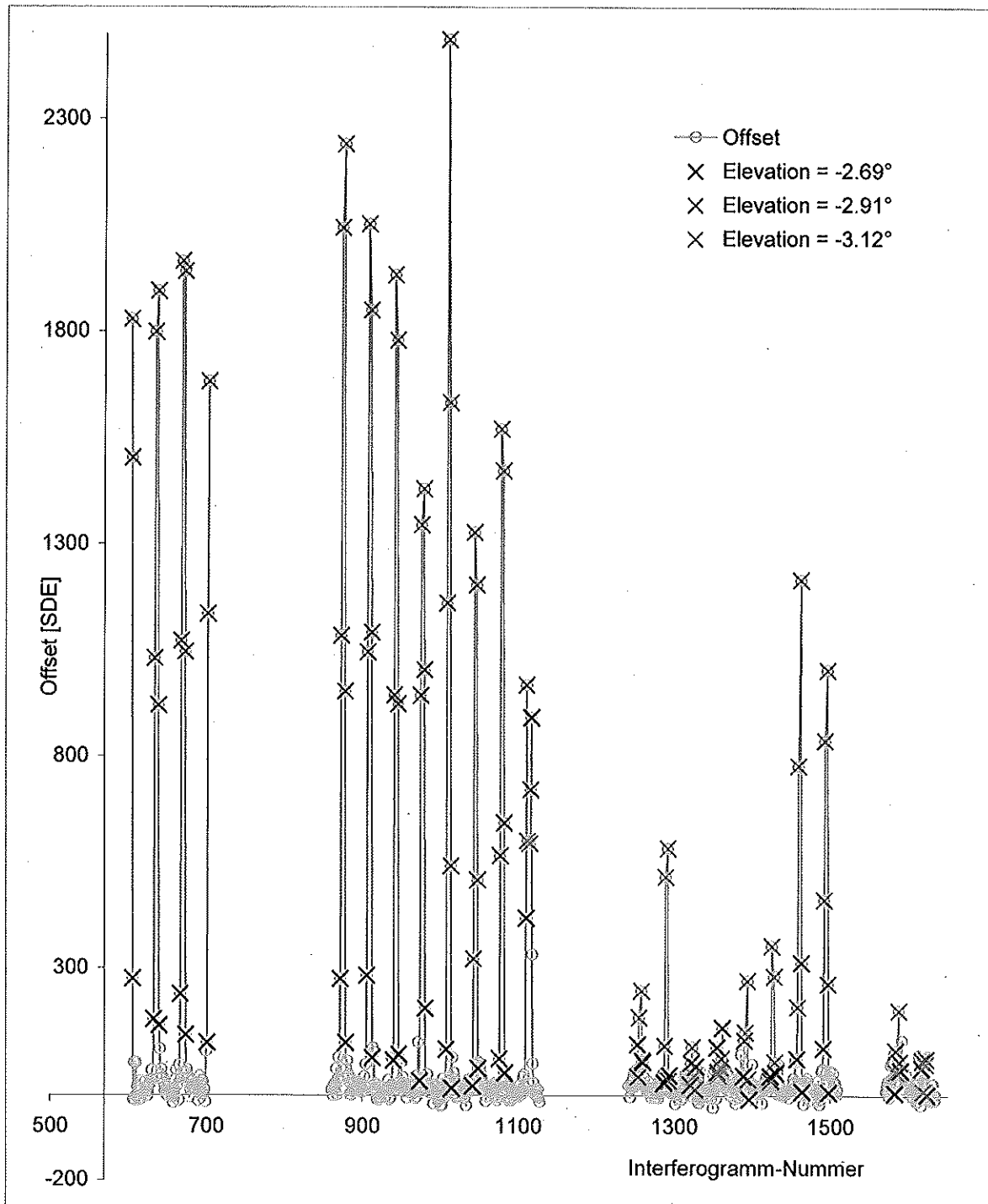


Abb. 5.7

Detektion von 'Wolkenspektren' an Hand des Offset in den Spektren.

Das Diagramm zeigt den bei der Auswertung mit KOPRA/KOPRAFIT mitbestimmten Offset in den einzelnen Spektren. Wolken stellen einen Graukörper dar, deshalb ist die Basislinie in den betroffenen Spektren erhöht. Fast alle Spektren der untersten drei Elevationswinkeln (Kreuze) sind 'Wolkenspektren'

5.6 Bestimmung von Elevation und Temperaturprofil aus einer Sequenz

Bestimmung des Regularisierungsparameters γ aus der L-Kurve:

KOPRA berechnet die Strahlübertragung mit dünnen (unterhalb der Beobachterhöhe 0,5 km dicken) Atmosphärenschichten. Bei der Bestimmung des Temperaturprofils wird für jede dieser Schichten ein Temperaturwert berechnet. Da es normalerweise, auch bei MIPAS-STR, mehr Schichten als Spektren gibt, muss beim Retrieval regularisiert werden (siehe auch Abschnitt 5.3.3). Die Gewichtung, mit der die Information über das Profil zum einen aus dem A-priori-Profil und zum anderen aus dem Spektrum genommen wird, lässt sich mit dem Regularisierungsparameter γ steuern.

Der optimale Regularisierungsparameter lässt sich mit dem L-Kurven-Kriterium bestimmen.

Trägt man für verschiedene Werte von γ $\sqrt{\sum_i (\text{Spektrum}_{\text{gemessen}}(v_i) - \text{Spektrum}_{\text{KOPRA}}(v_i))^2}$ doppelt logarithmisch über $\sqrt{\sum_i (\text{Profil}_{\text{a priori}}(h_i) - \text{Profil}_{\text{KOPRA}}(h_i))^2}$ auf, so hat die Kurve die Form eines L. Der Punkt größter Krümmung definiert das optimale γ [Schimpf und Schreier 1997].

In Abb. 5.8 sind beispielhaft die L-Kurven für eine Sequenz, "04_00278", dargestellt, zum einen für die Bestimmung des Temperaturprofils bei festgehaltenen Elevationswinkeln und zum anderen für die simultane Bestimmung des Temperaturprofils und des gemeinsamen Elevationsabstands. Aus beiden Kurven ergibt sich jeweils ein optimaler Regularisierungsparameter zwischen 0,1 und 1,0. Von Sequenz zu Sequenz kann sich der optimale Regularisierungsparameter geringfügig ändern.

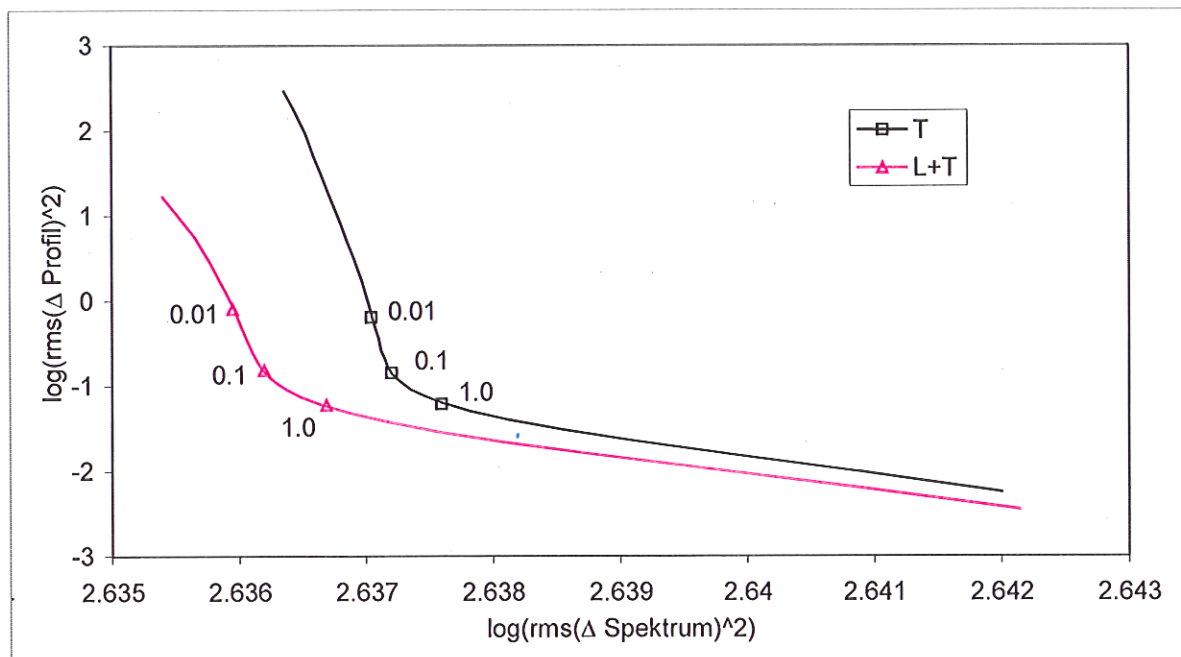


Abb. 5.8

L-Kurven zur Bestimmung des optimalen Regularisierungsparameters.

Die Kurven wurden aus den 11 Spektren der Sequenz 04_00278 für das gleichzeitige Retrieval von Elevation und Temperaturprofil („L+T“) und für das ausschließliche Retrieval des Temperaturprofils („T“) bestimmt. Die Werte für $\gamma = 0.01, 0.1, 1.0$ sind mit Symbolen markiert.

Alternative Methode zur Bestimmung des Regularisierungsparameters:

Eine alternative Methode bei der Validierung der Elevation basiert auf simulierten Spektren. Zu gegebenen Elevationen und gegebenem Temperaturprofil wird mit KOPRA eine unverrauschte Spektrensequenz berechnet. Das A-priori-Temperaturprofil für KOPRAFIT wird aus den simulierten Spektren mit um 7 Bogenminuten verschobenen und dann festgehaltenen Elevationswinkeln bestimmt.

Da sich durch die Regularisierung das Temperaturprofil ändert, wird hierdurch auch die gleichzeitig mitbestimmte Elevation beeinflusst. Der Regularisierungsparameter für das Temperaturprofil muss so schwach gewählt werden, dass der dadurch entstehende Fehler in der Elevation tolerierbar klein bleibt. In Abb. 5.9 ist das Ergebnis einer solchen Simulation dargestellt. Mit der verschobenen Elevation und dem generierten A-priori-Temperaturprofil als Startwerte wurde KOPRAFIT mehrmals durchlaufen, dabei wurde der Regularisierungsparameter variiert. Wie man im oberen Diagramm von Abb. 5.9 am Verlauf des Elevationsabstands δ sieht, sollte der Regularisierungsparameter γ_T nicht größer als 0,3 sein. Der Fehler in der Elevation ist dann kleiner als 10 Bogensekunden. Aus dem mittleren Diagramm erkennt man, dass bei so kleinen Regularisierungsparametern der Einfluss des A-priori-Profiles auf das bestimmte Temperaturprofil verschwindet.

Ein weiterer Punkt ist, dass durch die Einführung einer Nebenbedingung die numerische Stabilität des Minimierungsproblems erhöht wird. Bei Verwendung realer Spektrensequenzen stellt sich heraus, dass KOPRAFIT für zu kleine Regularisierungsparameter ($< 0,003$) nicht mehr konvergiert.

Bei der Bestimmung des Elevationsabstands wird für die Regularisierung des Temperaturprofils, in Übereinstimmung mit der L-Kurve, ein Wert von 0,3 ausgewählt.

Erste Bestimmung des gemeinsamen Elevationsabstands δ für die Sequenzen des Fluges:

Mit den Ergebnissen der Simulation soll nun die Auswertung der Spektren der Kampagne in Feuerland angegangen werden. Es wurde zuerst die Stärke der Regularisierung überprüft. In Abb. 5.10 ist dargestellt, in wieweit die Regularisierung des Temperaturprofils das Ergebnis der Elevationsabstandsbestimmung beeinflusst. Im oberen Diagramm wird das Temperaturprofil nicht mitbestimmt, im unteren Diagramm wurde das Temperaturprofil zusätzlich zum Elevationsabstand mit verschiedenen Werten des Regularisierungsparameters bestimmt. Die Kurve zu $\gamma = 0,3$ (der obigen Auswahl) ist etwas dicker gezeichnet. Der Unterschied zu dem etwas weicher regularisierten ($\gamma = 0,03$) Elevationsabstand ist kaum sichtbar. Der Ausreißer in Sequenz 04_00176 ist sicher zu schwach regularisiert, da diese Sequenz für $\gamma = 0,003$ stark abweicht. Aus den Diagrammen lassen sich zwei grundlegende Eigenschaften der Elevationsabstandsbestimmung entnehmen: Erstens ist der über die Flugabschnitte gemittelte Elevationsabstand abhängig vom Regularisierungsparameter. Zweitens ist der Unterschied zwischen den Elevationsabständen benachbarter Sequenzen in weiten Grenzen unabhängig von der Regularisierung. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Differenz der Elevationsabstände benachbarter Sequenzen der entsprechenden Differenz der wahren Elevationsfehler entspricht.

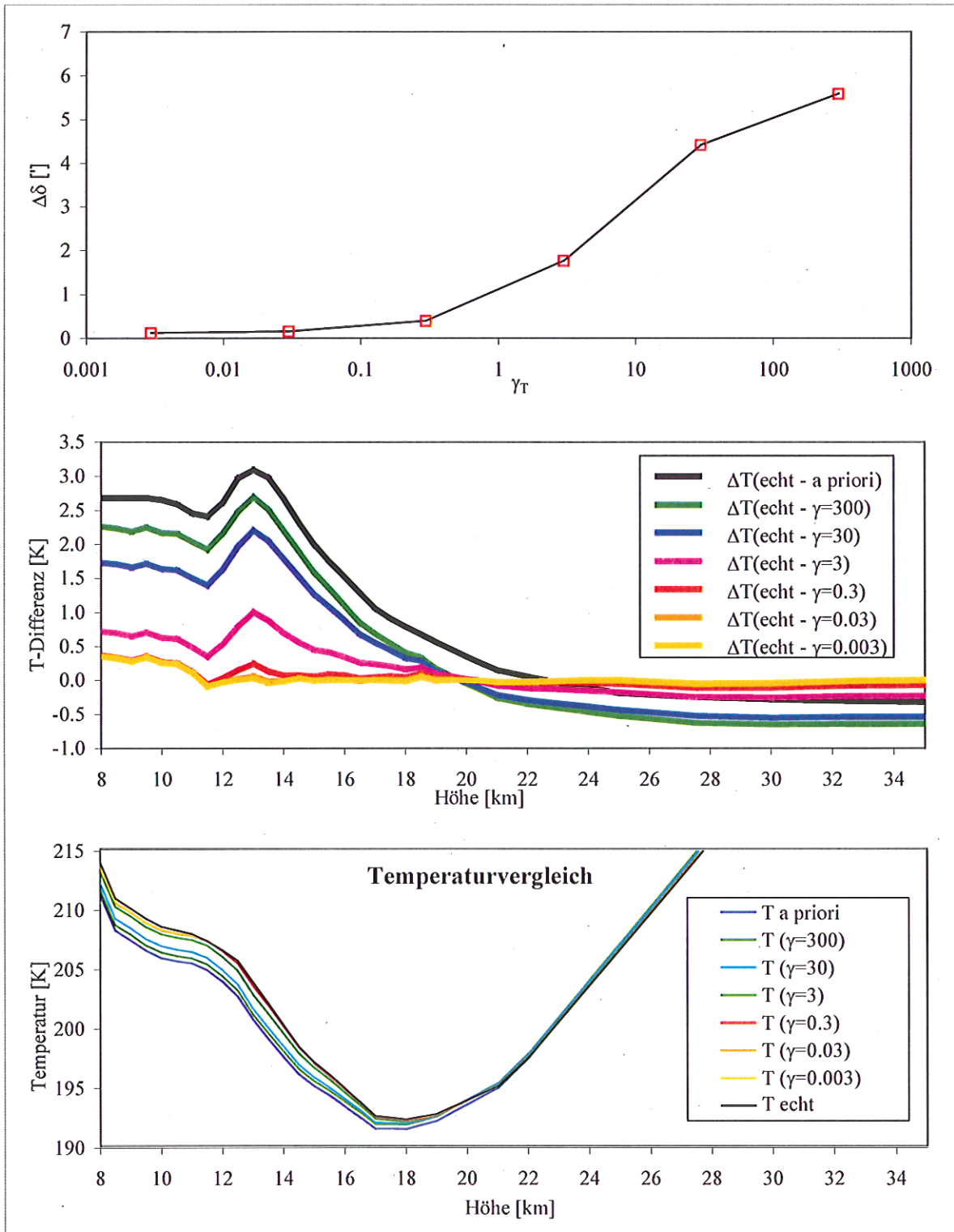


Abb. 5.9

Einfluss des Regularisierungsparameters γ_T der Temperatur auf den Fehler des Elevationsabstands δ

Im oberen Diagramm ist die Abhängigkeit des Fehlers des Elevationsabstands vom Regularisierungsparameter der Temperatur dargestellt. Für $\gamma_T < 0,3$ ist der Fehler im Elevationsabstand vernachlässigbar klein.

Das mittlere und das untere Diagramm zeigen, dass das Retrieval ein falsches A-priori-Temperaturprofil bei einer zu starken Regularisierung nicht korrigieren kann. Hierdurch wird der Fehler im Elevationsabstand verursacht.

Auf der linken Seite von Abb. 5.10 sind die beiden Flugabschnitte des Hinflugs dargestellt, dieser fand auf ca. 16,5 km Höhe statt. Beim Rückflug, analog die beiden rechten Flugabschnitte, wurde die Flughöhe auf 17,5 km erhöht. Die geografische Zuordnung der Flugabschnitte bzw. Limbsequenzen ist in Abb. 5.13 aufgetragen.

Der stark Zick-Zack-förmige Verlauf des Elevationsabstands bei gleichzeitiger Bestimmung des Temperaturprofil kann kein Elevationsfehler sein, da dieses Muster dann bei Verwendung eines glatten, festgehaltenen Temperaturfeldes ebenfalls auftreten müsste. Es kann auch nicht an einer zu schwachen (oder zu starken) Regularisierung liegen, da das Muster bei allen Kurven ähnlich auftritt. Vermutlich liegt es daran, dass bei gleichzeitiger Bestimmung von Elevationsabstand und Temperaturprofil das Minimum breit und flach wird. Durch das Rauschen in den verwendeten Spektren kann dann das effektive Minimum irgendwo im Talgrund liegen. Die Breite des Tals entspricht dem Bereich, den der Elevationsabstand überstreicht.

Der Elevationsabstand ändert sich bei der Bestimmung mit festgehaltenem Temperaturprofil vom zweiten zum dritten Abschnitt. Vermutlich ist die Ursache für den Sprung nicht die Änderung der Flugrichtung, sondern die Änderung der Flughöhe. In Abschnitt 5.7 wird der Einfluss der Flughöhe auf den Elevationsabstand näher untersucht. Innerhalb der vier Flugabschnitte fällt der Elevationsabstand, bei festgehaltenem Temperaturprofil bestimmt, mit der Messzeit ab. Hierfür konnten zwei einander ergänzende mögliche Begründungen gefunden werden.

Es liegt nahe, zuerst die Kalibrierung der Spektren (siehe Abschnitt 5.2) zu hinterfragen. Zur Kalibrierung wird für jede Sequenz die Kalibrierungsfunktion aus dem Weltraumspektrum und aus dem Spektrum des kalten Schwarzkörpers bestimmt. Um den Kalibrierungsfehler zu reduzieren, werden die einzelnen Kalibrierungskurven zu einer mittleren Kalibrierungskurve für die vier Abschnitte des Fluges zusammengefasst. Existiert eine zeitliche Abhängigkeit der Kalibrierungsfunktion, bleibt das so bei der Kalibrierung der Spektren unberücksichtigt.

Die Kalibrierungsfunktion beschreibt, wie viele der in das Teleskop einfallenden Photonen am Detektor in Form eines Interferogramms nachgewiesen werden. Dieses Verhältnis wird maßgeblich durch drei Größen bestimmt: die Transmissionseigenschaft des Optikmoduls, die Responsivität des Detektors und die Modulationseffizienz des Interferometers. Die Responsivität des Detektors, also das Verhältnis zwischen Ausgangsspannung und einfallendem Photonenstrom, ist zwar von sehr vielen Umgebungsparametern abhängig, diese werden aber gemessen und waren während des Fluges konstant. Die Modulationseffizienz beschreibt, welcher Anteil der durch das Interferometer laufenden Strahlung zur Interferenz gebracht wird und als Interferogramm messbar wird. Im Wesentlichen ist dies durch die geometrische Überlappung der beiden Teilstrahlen bei der Rekombination am Strahlteiler bestimmt. Der in Abb. 5.14 dargestellte Verlauf der Modulationseffizienz ist durch thermischen induzierte mechanische Veränderungen des Interferometers erklärbar, da das Instrument im Verlauf des Fluges um ca. 30 K kälter wurde.

Wird die Abnahme der Modulationseffizienz bei der Kalibration der Spektren nicht berücksichtigt, weil mit einer Kalibrationsfunktion für den ganzen Abschnitt kalibriert wird, so ist die Strahldichte in den später aufgenommenen Spektren (in den Abbildungen links) relativ zu den älteren Spektren (rechts) zu klein. Wird bei festgehaltenem Temperaturprofil der Elevationsabstand bestimmt, wird die Verkleinerung der Strahldichte durch eine Vergrößerung der Elevation kompensiert. Aus dem Modulationsabfall lässt sich eine Steigung des Elevationsabstands erklären, die halb so groß ist, wie die Steigung in Abb. 5.10 oben.

In Abb. 5.15 ist der Elevationsabstand aus Spektren bestimmt, bei deren Kalibrierung die zeitliche Änderung der Kalibrierungskurve durch die Änderung der Modulationseffizienz berücksichtigt wurde. Zum Vergleich wurde auch das Ergebnis aus Abb. 5.10 oben dargestellt.

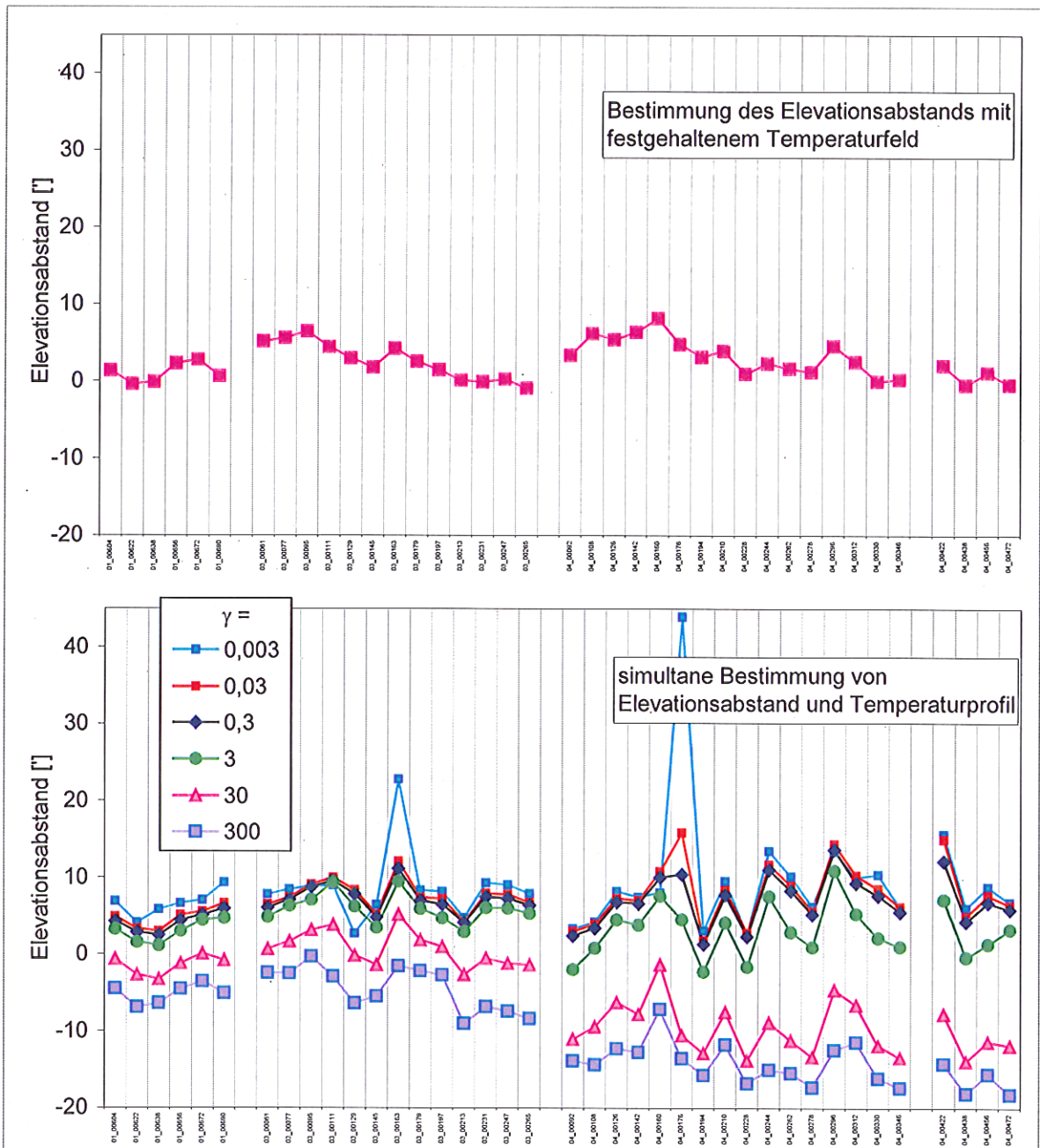


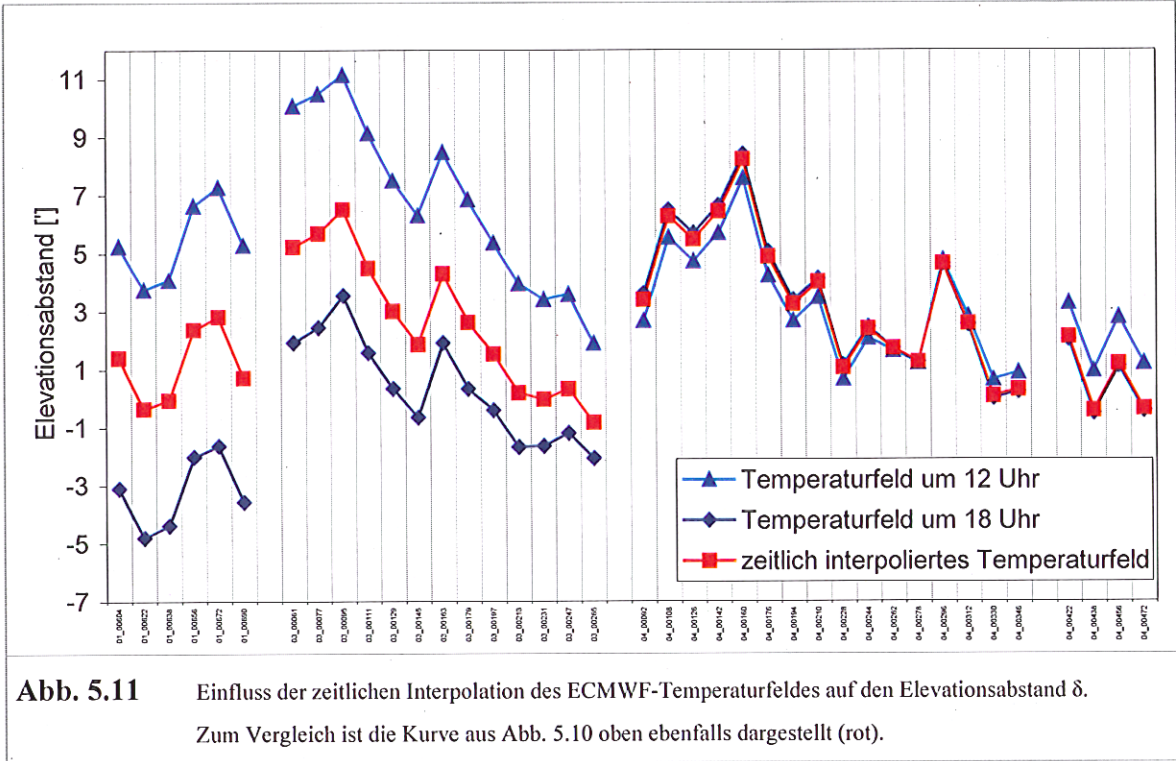
Abb. 5.10 Elevationsabstand δ für ganze Sequenzen

Das obere Diagramm zeigt den bei festgehaltenem Temperaturfeld bestimmten gemeinsamen Elevationsabstand für alle Sequenzen des Fluges am 23.9.1999. Die Nummern der Sequenzen sind auf der Abszisse aufgetragen. Das Temperaturfeld wurde durch Interpolation aus den Temperaturfeldern von ECMWF gewonnen.

Das untere Diagramm zeigt das Ergebnis, wenn gleichzeitig zum Elevationsabstands auch das Temperaturprofil mitbestimmt wird. Der Mittelwert des Elevationsabstands ist abhängig vom verwendeten Regularisierungsparameter. Die Variation des Elevationsabstands von Sequenz zu Sequenz ist davon unabhängig. Bei den beiden ausreißenden Werten für $\gamma = 0,003$ ist die Regularisierung zu klein, es kann deshalb kein sinnvoller Wert für den Elevationsabstand bestimmt werden.

Als zweite Ursache wurde die zeitliche Interpolation der ECMWF-Temperaturfelder untersucht. Die Messungen liegen zwischen 14:45 Uhr und 17:45 Uhr (UTC). Die ECMWF-Felder stehen um 12:00 Uhr und um 18:00 Uhr zur Verfügung, dazwischen wird linear interpoliert. Der reale Tagesgang der Temperatur ist sicherlich nicht linear mit der Uhrzeit, so

dass hier ein Fehler entsteht. Um die Auswirkung abzuschätzen, wurde der Elevationsabstand mit den beiden Temperaturfeldern (12 und 18 Uhr) ohne zeitliche Interpolation bestimmt (Abb. 5.11). Diese Abbildung zeigt einerseits, dass die korrekte Interpolation sehr wichtig ist, andererseits aber auch, dass der Abfall des Elevationsabstands nicht an einer falschen Interpolation liegen kann. Eine weitere Möglichkeit, den Abfall zu erklären wäre die, dass das Temperaturfeld einen breitenabhängigen Fehler hat. Dann müsste der Trend auf dem Rückflug aber entgegengesetzt sein. Abb. 5.12 zeigt, dass die beiden auf die Flugzeugposition interpolierten Temperaturfelder von ECMWF generell 2-3 K kälter als die Temperaturmessung am Flugzeug sind. Durch Mitbestimmen des Temperaturprofils können die Temperaturfehler größtenteils kompensiert werden, da nur noch die Form und nicht mehr die Absolutwerte des A-priori-Profiles verwendet wird. Wie schon beschrieben, führt dies jedoch zu einem Zick-Zack-förmigen Elevationsabstand.



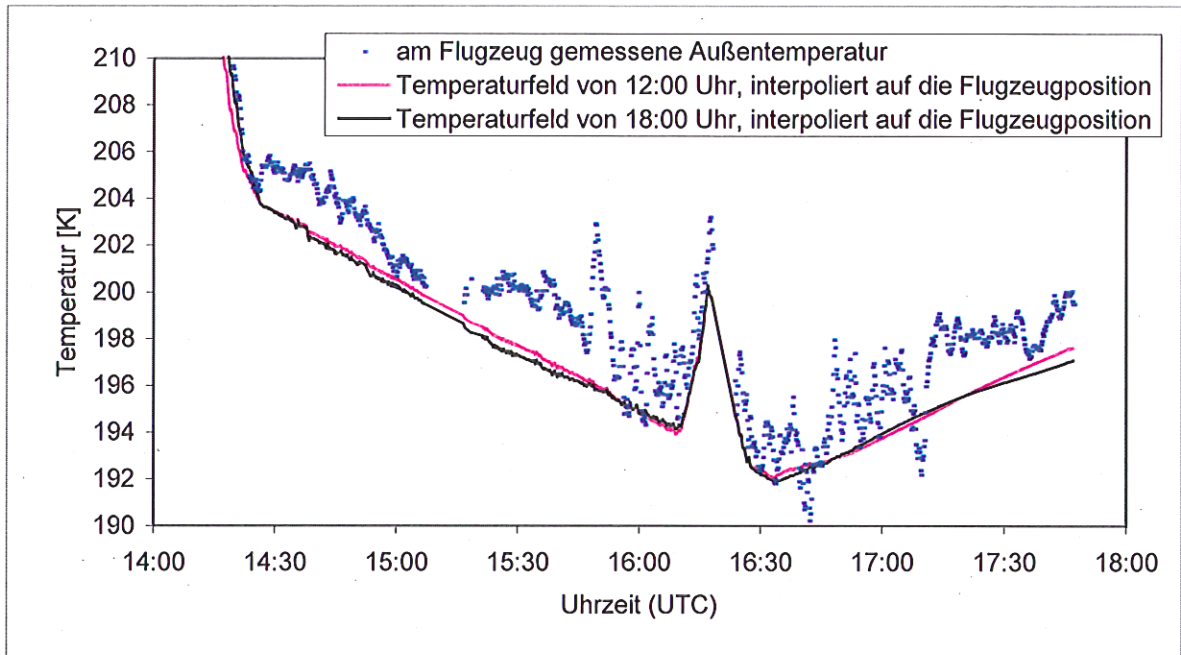


Abb. 5.12 Vergleich der ECMWF-Temperatur mit der am Flugzeug gemessenen Außentemperatur.

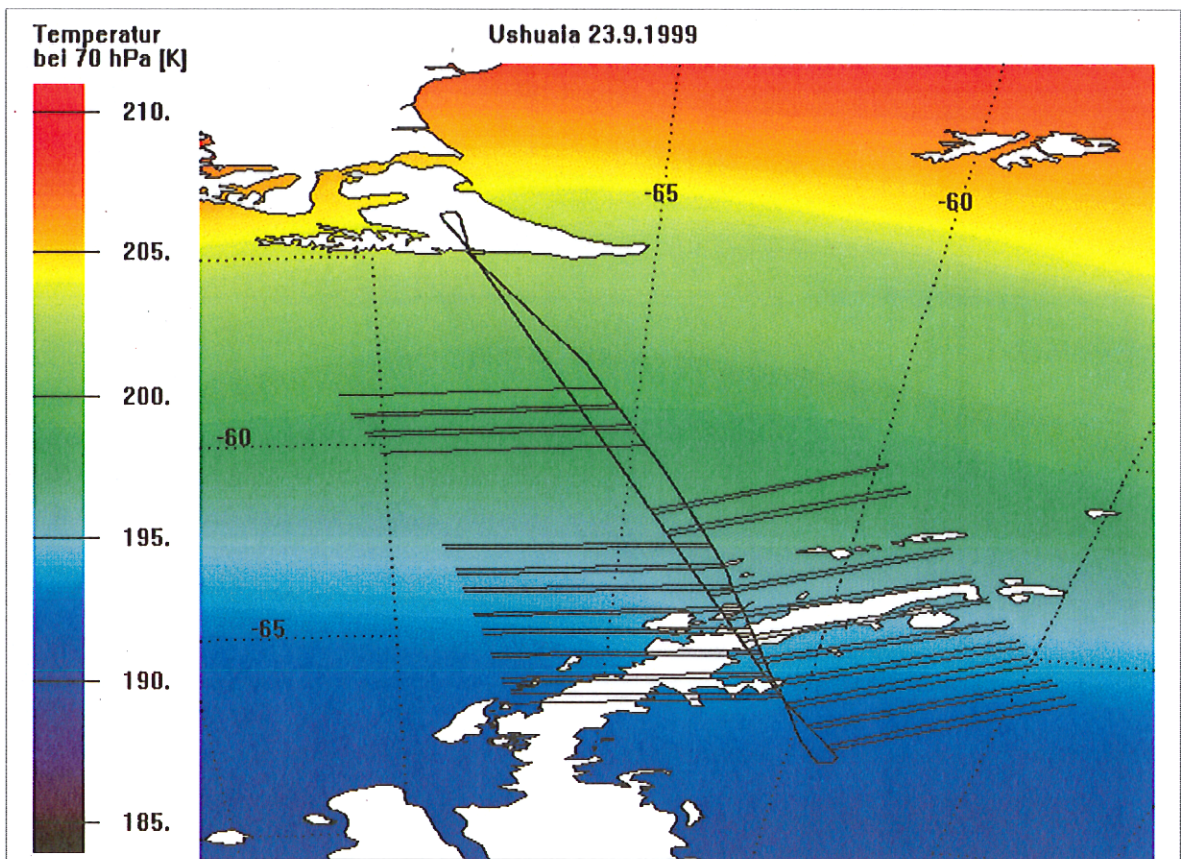


Abb. 5.13 geografische Zuordnung der Limbsequenzen und Flugabschnitte.

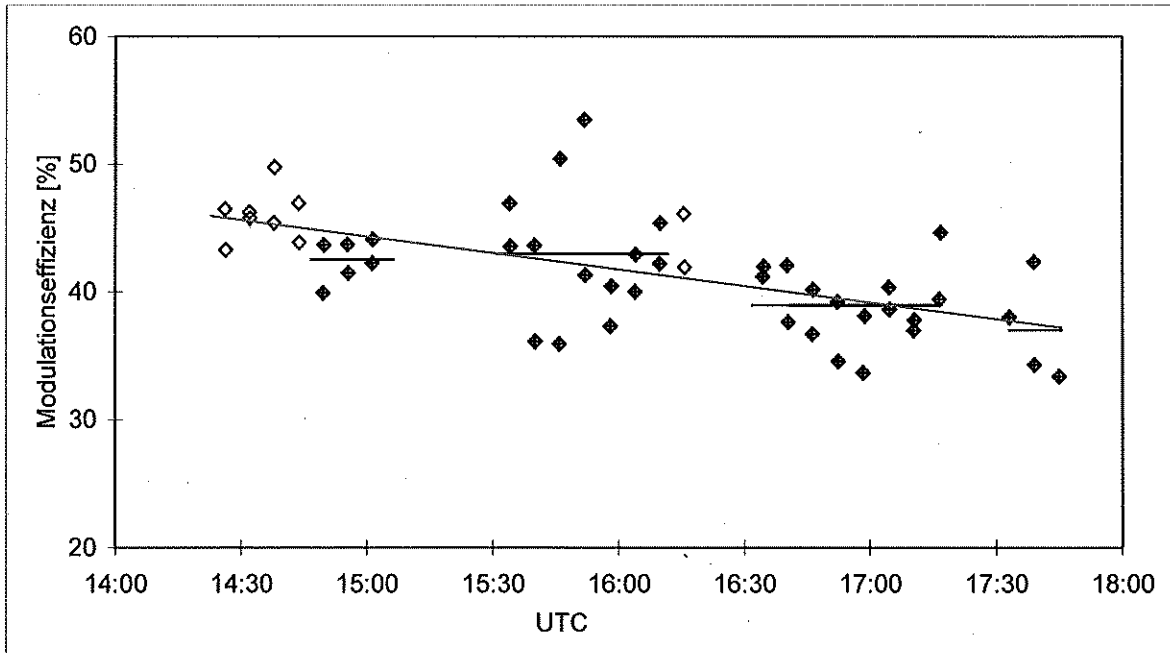


Abb. 5.14 Modulationseffizienz im Verlauf des Fluges am 23.9.1999.
 Das Diagramm zeigt die Modulationseffizienz. Mit offenen Symbolen sind die Sequenzen zu Beginn und im Dive markiert, zu denen kein Elevationsabstand bestimmt wurde. Die Ausgleichsgerade wurde durch alle Sequenzen gelegt.

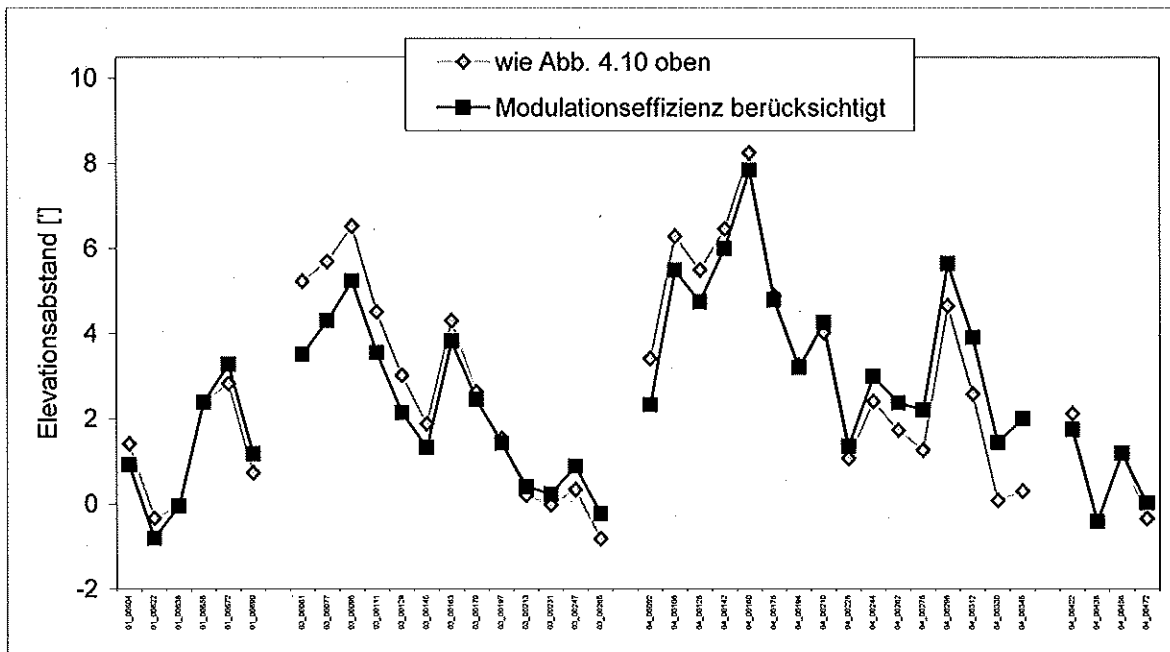


Abb. 5.15 Elevationsabstand δ unter Berücksichtigung der abnehmenden Modulationseffizienz.
 Bei den Spektren, die zur Bestimmung des Elevationsabstands verwendet wurden, wurde die linear abnehmende Modulationseffizienz bei der Kalibrierung berücksichtigt. Zum Vergleich ist die Kurve aus Abb. 5.10 oben ebenfalls dargestellt.

5.7 Elevationsabstand für einzelne Spektren

Mit KOPRA/KOPRAFIT kann die Elevation der Sichtlinie, und damit der Abstand zu der nominellen Elevation, auch für jedes gemessene Spektrum einzeln bestimmt werden. Dazu sollten das Temperaturprofil, und je nach Microwindow, die Profile der Spurengase bekannt sein. Das beste komplett unabhängig gewonnene Temperaturprofil kann aus der Analyse von ECMWF (WWW:ECMWF) durch Interpolation in Zeit und Raum gewonnen werden. Der angegebene Fehler des Profils von 2 K entspricht einem Elevationsfehler von ca. 6 Bogenminuten. In zahlreichen Studien wurde das Temperaturfeld des ECMWF mit Sondendaten verglichen und die angegebene Qualität der Daten bestätigt. Ein Vergleich zeigt, dass die am Flugzeug gemessene Außentemperatur 2-3 K höher als das interpolierte ECMWF-Temperaturfeld ist [Lessenich 2000]. Nimmt man daher an, dass der Fehler des Temperaturprofils durch eine systematische Verschiebung dominiert wird, so kann die Elevationsbestimmung von Einzelspektren vor allem dazu genutzt werden, die Schwankung des Elevationsfehlers zwischen den Spektren einer Sequenz abzuschätzen. In Abb. 5.16 ist das Ergebnis dargestellt. Jeweils in einer anderen Farbe ist für jede Limbsequenz innerhalb des Polarwirbels (= Interferogramm-Namen, die mit '03_' und '04_' beginnen) der Elevationsabstand δ über der Elevation aufgetragen. Das dichte Beieinanderliegen der Kurven innerhalb der beiden Kurvenscharen rechtfertigt die obige Annahme, wonach der Temperaturfehler der ECMWF-Profile vor allem durch einen systematischen Offset dominiert wird. Jedoch stimmen die starke Abhängigkeit des Abstands der aus den Spektren bestimmten Elevation von der nominellen Elevation und die unrealistisch großen Werte von mehreren Grad nicht mit der Erwartung überein.

Als mögliche Gründe der obengenannten Abhängigkeit sollen nun die einzelnen Schritte von der Einstellung der Sichtlinie über die Messung der Spektren (genauer Interferogramme) bis zur Ausgabe der mit KOPRAFIT bestimmten Elevation betrachtet werden.

- Fehlerquellen bei der Einstellung der Sichtlinie:
 - Die vom AHRS gemessenen Lagewinkel: Ein Elevationsfehler wird in erster Linie durch einen Fehler im Rollwinkel erzeugt. Es gibt keine Rückkopplung zwischen der Elevationswahl und der Rollwinkelmessung, folglich kann es keine Abhängigkeit zwischen Rollwinkelfehler und Elevation geben. Lagewinkelfehler sind also nicht für die gesuchte Abhängigkeit, sicher aber, wie in Abschnitt 5.10 gezeigt wird, für die Variabilität des Elevationsabstands verantwortlich.
 - Die Berechnung der Scanwinkelvorgabe und die Bestimmung der Einbauwinkel: Durch eine falsche funktionale Beschreibung der Abhängigkeit der Elevation von den einzelnen Parametern, durch vernachlässigte und vergessene Parameter und durch falsche Einbauwinkel können Fehler entstehen. Diese können in zwei Kategorien aufgeteilt werden: die elevationsunabhängigen und die elevationsabhängigen Fehler. Das Kalibrierungsverfahren ist so gestaltet, dass elevationsabhängige Fehler erstens vermieden werden, und zweitens bei der Auswertung auffallen (s. Abschnitt 3.5). Fehler größer als eine Bogenminute können sicher ausgeschlossen werden. Die systematischen Fehler des Kalibrierungsverfahrens, z.B. durch gekeilte Fenster, sind nicht elevationsabhängig, können also die gesuchte Abhängigkeit nicht verursachen.
 - Der dynamische Fehler der LOS-Regelung liegt im Bereich von einigen Bogensekunden (s. Abb. 4.15).

Diese drei, die Einstellung der Sichtlinie betreffenden Punkte, zeigen, dass die gesuchte Abhängigkeit des Elevationsabstands kein Fehler der Elevationsstabilisierung sein kann.

- Fehler durch das Vorwärtsmodell KOPRA: Das Modell wurde durch andere Strahlungsübertragungsmodelle validiert [Glatthor et al. 1999, Tjemkes et al. 2001], die dominierenden Fehlerquellen liegen in den verwendeten Eingangsdaten.
 - Das ist zum einen die Liniendatenbank HITRAN [WWW:HITRAN], die Fehler sowohl in der Position der Linie als auch in der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Linienintensität aufweist. In Abschnitt 5.8 wird gezeigt, dass die gemessene Strahldichte in den Weltraumspektren fast 50% zu groß ist. So große Abweichungen können nicht durch Fehler in HITRAN erklärt werden.
 - Eine weitere Fehlerquelle sind die verwendeten Druck- und Temperaturprofile (s. hierzu auch Absatz 5.11.2). Für die Linien im gemessenen Spektrum sind vor allem die Verhältnisse am Tangentenpunkt entscheidend. Die Strahldichte der CO₂-Linien nimmt mit zunehmender Höhe des Tangentenpunktes ab. Deshalb verursacht ein Fehler in den Eingangsdaten, der die berechnete Strahldichte der Linie erhöht, eine Kompensation durch die gefittete Elevation in der Art, dass der Tangentenpunkt höher gesetzt wird, und umgekehrt. Zeigt ein Profil eine systematische Fehlerabhängigkeit von der Höhe, so bleibt diese Systematik in der gefitteten Elevation erhalten. Unter diesem Gesichtspunkt muss vor allem das Druck- und Temperaturprofil kritisch betrachtet werden. ECMWF erstellt Druck- und Temperatur-Felder nur bis zu einer (Druck-)Höhe von 1 hPa (= 45 km), darüber wurden die Profile mit Standardatmosphärendaten für mittlere Breiten ergänzt. Um festzustellen, ob die gesuchte Abhängigkeit hierdurch entsteht, wurde das Temperaturprofil oberhalb von 45 km mit KOPRA/KOPRAFIT bestimmt. Dazu wurde ein Elevationsabstand von 0° für alle Spektren angenommen. Dies ist deshalb sinnvoll, weil die Abhängigkeit von der Elevation für Schichten oberhalb des Flugniveaus sehr klein ist. Für den Fehler in der eingestellten Elevation kann angenommen werden, dass er in der Größenordnung ist, der sich für die unterste Tangentenhöhe ergab. Diese kleinen Elevationschwankungen haben praktisch keine Auswirkung auf den Temperaturfit oberhalb von 45 km. Mit diesem neuen, verbesserten Temperaturprofil wurde wiederum die Elevation der einzelnen Spektren bestimmt (Abb. 5.17). Auch wenn das Ergebnis sich von Abb. 5.16 unterscheidet, so ist doch sichtbar, dass hiermit die Abhängigkeit nicht aufgehoben wird. Der Blick auf das gefittete Temperaturprofil zeigt ein weiteres, sich dabei ergebendes Problem (Abb. 5.18). Die Temperaturen werden, verglichen mit dem Standardprofil, viel zu warm bestimmt. Dies ist ein Hinweis auf die eigentliche Ursache des Problems (Genauerer in Abschnitt 5.8).
 - Auch die verwendeten Spuregasprofile tragen mit ihren Ungenauigkeiten zum Gesamtfehler bei. Im Fall der Bestimmung des Elevationsabstands ist vor allem das Profil von Kohlenstoffdioxid relevant. Die Verteilung dieses Gases in der Atmosphäre ist sehr gut bekannt, da es sich kaum durch chemische und Transportprozesse ändert. Das verwendete Profil wurde mit den von HAGAR gemessenen Daten abgeglichen (Abb. 5.1). Je nach Microwindow gibt es noch Linien von andere Gasen. Im Fall des in dieser Arbeit (und auch in der Rechnung, die Abb. 5.16 zugrunde liegt) verwendeten P-Zweigs der Laserbande ist dies nur SF₆, das ebenfalls von HAGAR gemessen wurde. Da die Linienintensität sehr klein ist, wird nur ein anhand der HAGAR-Messung modifiziertes Standardprofil für den ganzen Flug verwendet.
 - Der Einfluss, den die Auswahl der verwendeten CO₂-Linien auf das Ergebnis hat, soll auch untersucht werden. Deshalb wurde die Elevation der einzelnen Spektren noch mit quasi allen im Kanal 1 möglichen CO₂-Linien bestimmt (vergl. Abb. 5.2). Es handelt sich dabei um die Bande um 781 cm⁻¹ und den R-Zweig der Laserbande. Hier besteht jedoch in viel größerem Maß das Problem der unbekanntenen Profile von Gasen, die in diesen Bereichen Signaturen haben. Das Ergebnis ist in Abb. 5.19 dargestellt. Deutlich sichtbar ist der kleinere Gradient bei nominellen Elevationen oberhalb von ca -1°, im

Bereich unterhalb (Zoom) sind die beiden Ergebnisse allerdings recht gut übereinstimmend.

- Eine weitere nicht vernachlässigbare Fehlerquelle ist die verwendete Flughöhe [Lessenich 2000]. Die Geophysica misst sowohl mit einem GPS (s. Abschnitt 3.1) die wahre Flughöhe in Metern als auch den dazu äquivalenten Luftdruck auf Flugniveau. Dieser kann mit Hilfe des aktuellen Druckprofils in Meter ungerechnet werden. Unter Verwendung des Druckprofils aus der ECMWF-Analyse ergibt sich ein Unterschied dieser beiden Flughöhen von ca. 350 m (die GPS-Höhe ist größer als die Druck-Höhe). Das bedeutet, dass das Druckprofil der ECMWF-Analyse um 350 m nach unten verschoben bzw. gestaucht ist. Dies ergibt bei der Bestimmung der Elevation natürlich einen Fehler. Aus Abb. 5.20 ist ersichtlich, dass die Flughöhe zwar einen entscheidenden Einfluss auf den Elevationsabstand hat, dass jedoch die beschriebene Abhängigkeit zwischen Elevationsabstand und Elevation eine andere Ursache haben muss.
- Fehler durch das Inversionsmodul KOPRAFIT in der gefundenen Größenordnung sind auszuschließen.
- Bei der Kalibrierung der Spektren gibt es zwei relevante Fehlerquellen. Es ist dies zum einen die Nichtberücksichtigung der Nichtlinearität des Detektors (s. Abschnitt 5.1). Dadurch wird die Strahldichte der Atmosphärenspektren zu groß. Der maximale Fehler beträgt ca. 4% (s. Anhang B). Dieser Fehler ist zwar von der Elevation abhängig (weil die Strahldichte elevationsabhängig ist), aber viel zu klein, um die Elevationsabhängigkeit des Elevationsabstands zu verursachen. Der zweite Fehler ist die Verwendung einer jeweils konstanten Kalibrierungsfunktion für die einzelnen Flugabschnitte. Dadurch bleibt der zeitliche Verlauf unberücksichtigt. Dieser Fehler trifft alle Elevationswinkel gleichermaßen, kann also die Elevationsabhängigkeit des Elevationsabstands nicht erklären. Für die später bestimmte Zeitabhängigkeit des Elevationsabstands (s. Abb. 5.31) ist dieser Fehler jedoch relevant.
- Bei sehr kleinem Druck wird die mittlere freie Weglänge der Moleküle sehr groß. Die Moleküle stoßen nicht mehr oft genug, um im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht zu sein. Die Emission der hohen Schichten der Atmosphäre kann deshalb nicht durch eine kinetische Temperatur und die daraus abgeleitete Boltzmannverteilung der Energieniveaus angegeben werden [Funke 2000]. Der sich aus der Abweichung vom lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (NLTE) ergebende Einfluss auf die gemessenen Spektren kann durch eine Simulation abgeschätzt werden (s. Abb. 5.21). Der zusätzliche Beitrag zur Strahldichte ist klein im Vergleich zu dem im nächsten Abschnitt bestimmten Unterschied zwischen gemessener und erwarteter Strahldichte (s. Abb. 5.23).

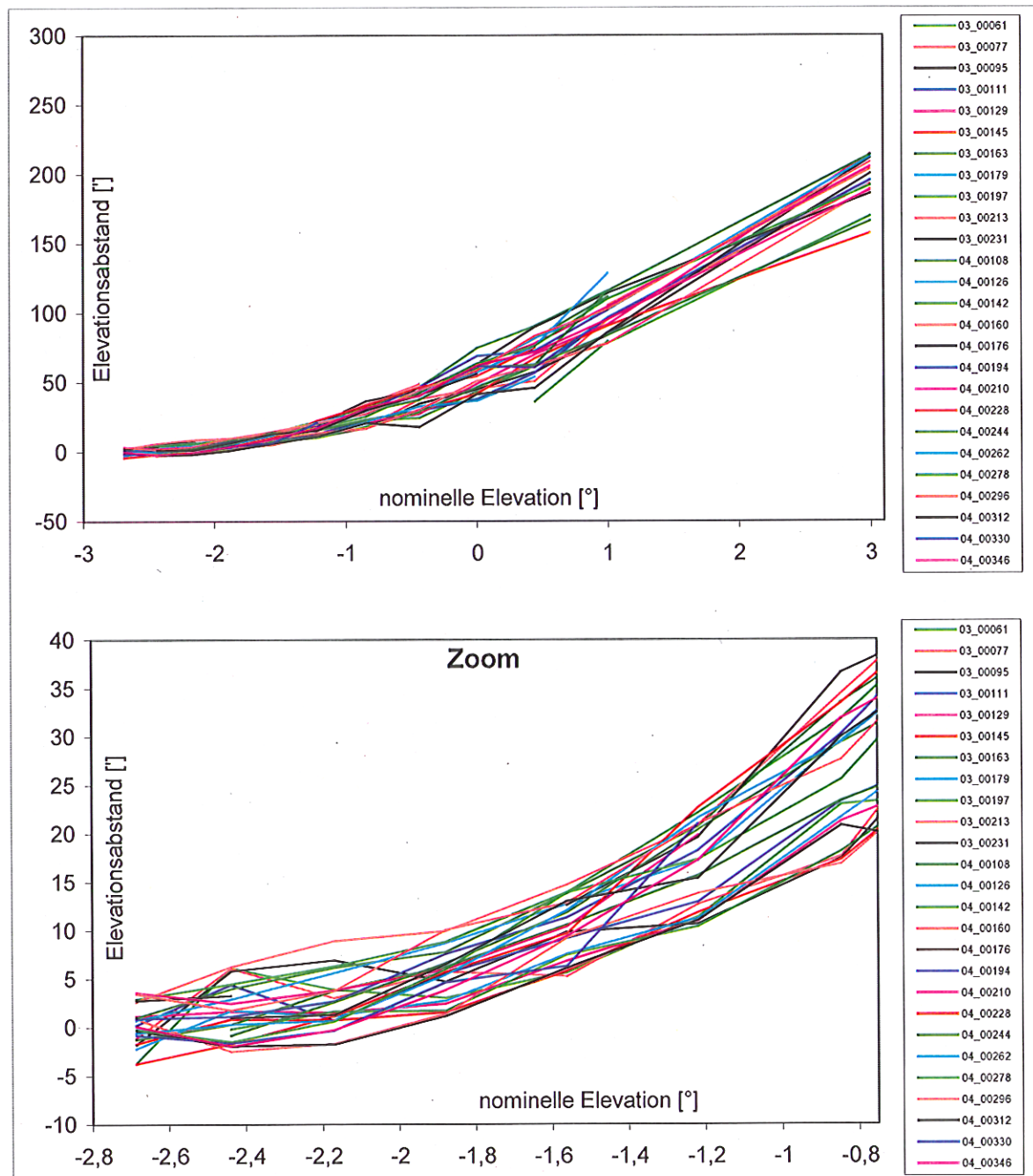


Abb. 5.16 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.
 Das Temperaturprofil wurde aus der Analyse von ECMWF gewonnen und nicht mitgefittet.
 Es wurden die CO₂-Linien der Laserbande verwendet (936 cm⁻¹ - 960 cm⁻¹).

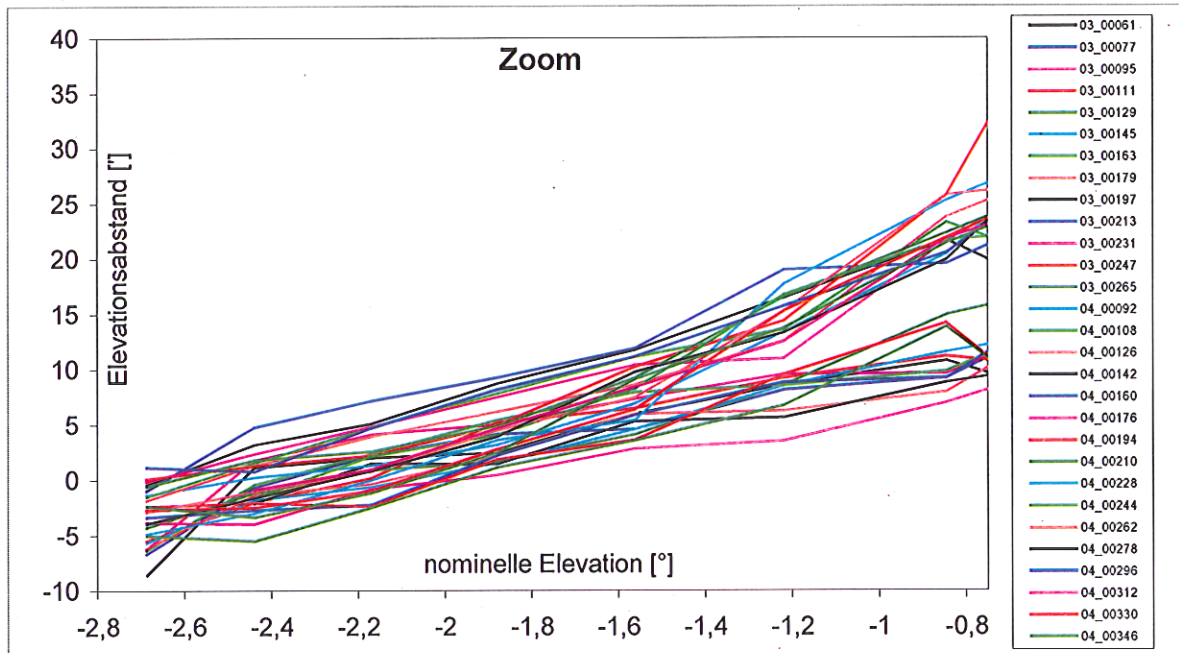


Abb. 5.17 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.
 Das Temperaturprofil wurde wieder nicht mitgefittet. Es wurde unterhalb 45km aus der Analyse von ECMWF gewonnen und oberhalb zuvor gefittet (das Temperaturprofil ist in Abb. 5.18 dargestellt).

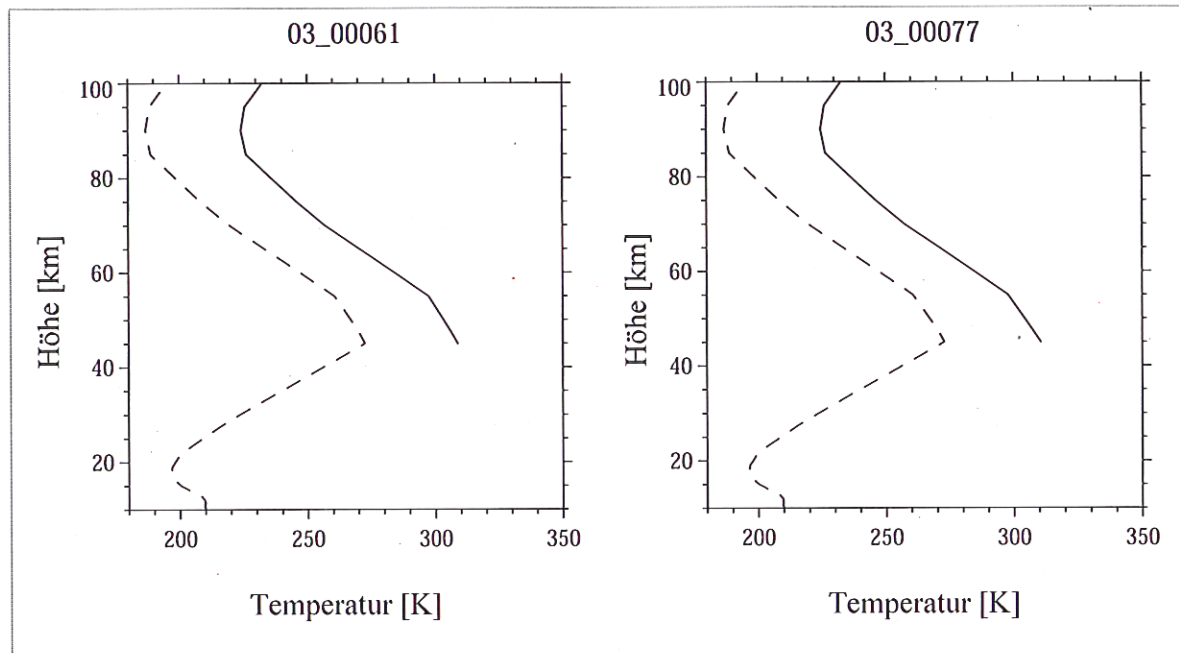


Abb. 5.18 Temperatur oberhalb von 45km mit KOPRA/KOPRAFIT gefittet.
 Beispielhaft ist für zwei Sequenzen das Ergebnis des Temperaturfits dargestellt. Durchgezogen das Fitergebnis, gestrichelt zum Vergleich das aus ECMWF und dem Standardprofil für mittlere Breiten zusammengesetzte Start- und Regularisierungs-Profil. Der Unterschied zwischen dem Fitergebnis und dem Start-Profil ist bei allen Sequenzen vergleichbar groß (siehe Anhang D). In Abb. 5.17 ist der mit diesem Temperaturprofil gefitteten Elevationsabstand dargestellt.

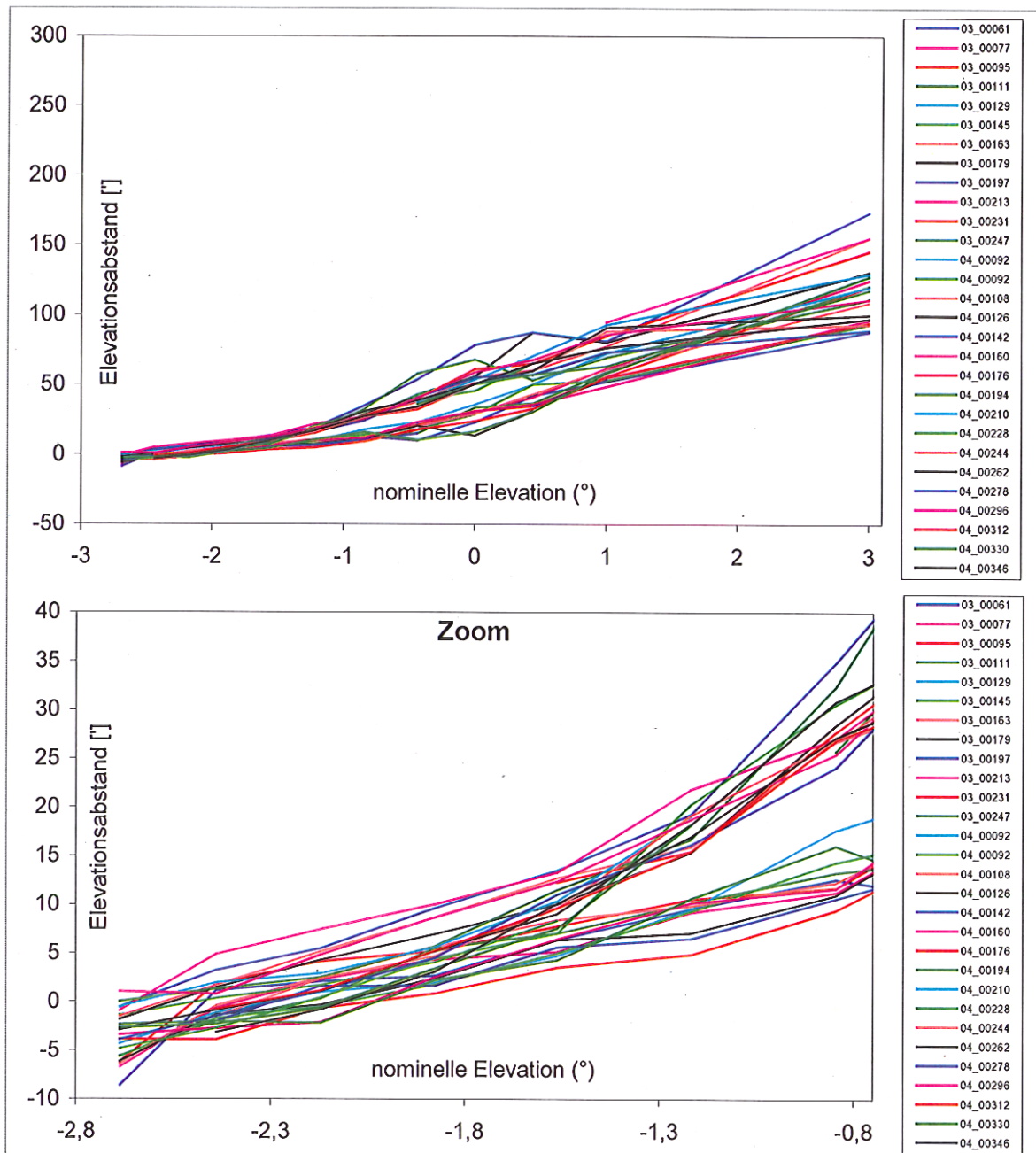


Abb. 5.19 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.
 Das Temperaturprofil wurde aus der Analyse von ECMWF gewonnen und nicht mitgefittet.
 Es wurden alle CO₂-Linien im Kanal 1 verwendet.

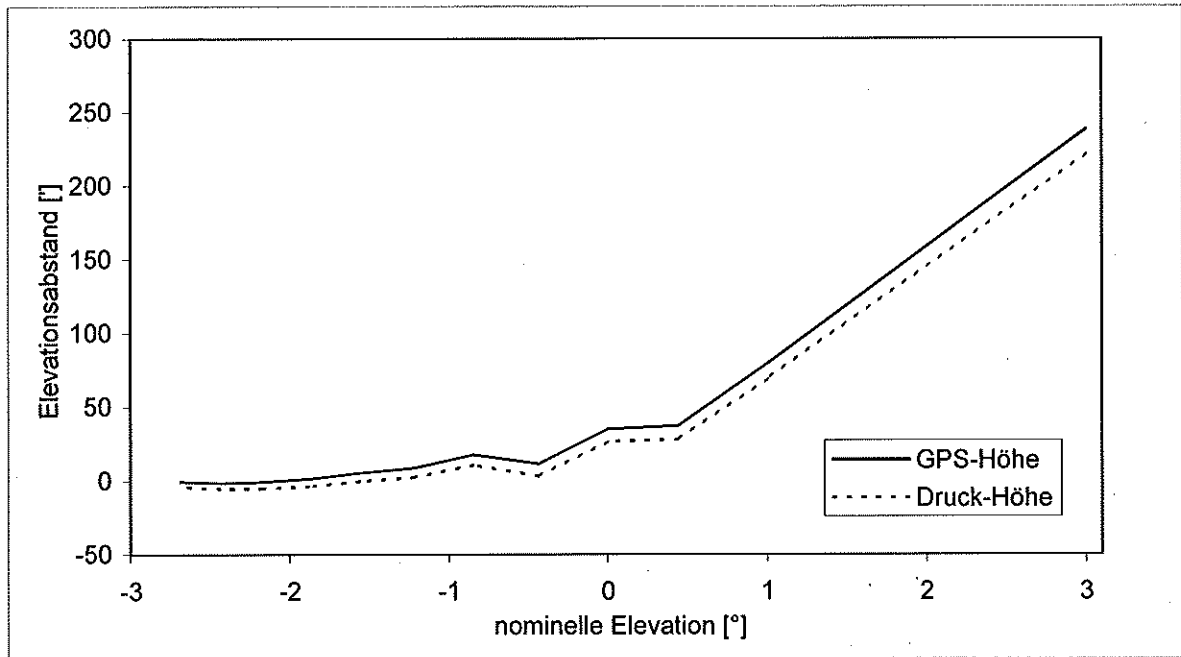


Abb. 5.20 Abhängig des Elevationsabstands δ von der angenommenen Flughöhe.

Das Diagramm zeigt exemplarisch für die Sequenz ,03_00231', dass die verwendete Flughöhe den bestimmten Elevationsabstand beeinflusst, jedoch nicht die gesuchte Abhängigkeit des Elevationsabstands von der Elevation erklärt. Gestrichelt dargestellt ist der Elevationsabstand, wenn die Flughöhe aus dem gemessenen Druck bestimmt wurde, durchgezogen dargestellt ist der Elevationsabstand, wenn die GPS-Höhe verwendet wird.

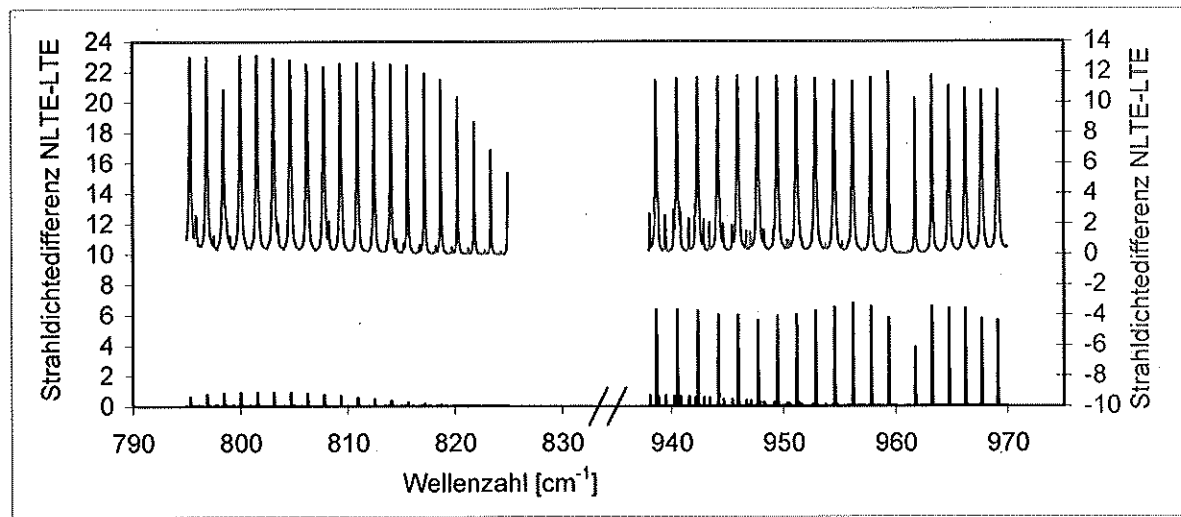


Abb. 5.21 Strahllichtdifferenz zwischen NLTE und LTE

Werden im Modell NLTE-Effekte berücksichtigt, so ist die berechnete Strahllichtdichte, vor allem in der Laserbande, fast immer größer als ohne Berücksichtigung diese Effekte. Die Abbildung stellt die Differenz für ein simuliertes Spektrum dar, das unter -3° -Elevation (oben, grau) bzw. unter $+3^\circ$ (unten, schwarz) aus 17km Höhe gemessen wird. Das zugrundeliegende Temperaturprofil entspricht mittleren Breiten bei Tag. Die dargestellte Differenz stellt den maximal möglichen Einfluss des NLTE bei den Messungen in Ushuaia dar.

Zusammenfassend erklärt keine der oben angeführten möglichen Ursachen die starke Elevationsabhängigkeit des bestimmten Elevationsabstands. Bisher wurden mögliche Fehlerquellen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Elevation bzw. den bestimmten Elevationsabstand analysiert. Eine andere Untersuchungsmöglichkeit bietet der direkte Vergleich von gemessenen und erwarteten Spektren im folgenden Abschnitt.

5.8 Streulicht

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Spektren mit Spektren verglichen, die mit dem Strahlübertragungsmodell KOPRA berechnet werden. Grundlage des Modells bilden das vmr-Profil von CO₂ (s. Abb. 5.1) und das Druck- und Temperaturfeld des ECMWF.

Damit das Rauschen in den gemessenen Spektren nicht den Effekt verdeckt, wurden die gemessenen Spektren durch approximierten Spektren ersetzt. Dazu wurde das Temperaturprofil mit KOPRAFIT so variiert, dass der Unterschied zwischen dem gemessenen und dem approximierten Spektrum minimal wurde. Vergleicht man das approximierten Spektrum mit dem Modellspektrum, so kann man deutlich erkennen, dass die Strahldichte unabhängig vom Elevationswinkel in den approximierten und damit auch in den gemessenen Spektren um einen annähernd konstanten Beitrag zu groß ist¹. In Abb. 5.22 wurde eine einzelne CO₂-Linie bei 947,75 cm⁻¹ exemplarisch herausgegriffen und die Strahldichte von Modell und approximierter Messung für eine Sequenz über den Elevationswinkel aufgetragen. Die Differenz der beiden Strahldichten ist in Abb. 5.23 dargestellt. Um eine bessere Statistik zu gewinnen, wurde die Strahldichtedifferenz dieser CO₂-Linie über den ganzen Flug bestimmt. Um die Abhängigkeit des Strahldichteüberschusses vom Elevationswinkel zu untersuchen, wurden die Differenzen über dem Elevationswinkel aufgetragen. Um die Abhängigkeit von der Flugsituation zu erhalten, wurde innerhalb eines Winkels die Reihenfolge im Flug beibehalten. Das Ergebnis ist in Abb. 5.24 abgebildet. Man erkennt das wiederkehrende Muster in den größeren Elevationswinkeln. Aus der Abbildung ergeben sich zwei Beobachtungen. Die Größe der Strahldichtedifferenz wird von der Flugsituation bzw. den Umgebungsbedingungen beeinflusst. Bei den größeren Elevationswinkeln (> - 1,5°) ist keine Abhängigkeit vom Elevationswinkel zu erkennen. Bei kleineren Winkeln tritt eine größere Streuung auf, die von der variablen und daher im ECMWF-Temperaturfeld nicht so gut wiederzugebenden atmosphärischen Situation in der Troposphäre und untersten Stratosphäre hervorgerufen wird. Außerdem nimmt zu kleineren Elevationswinkeln die Abhängigkeit der Strahldichte vom Elevationswinkel deutlich zu (s. Abb. 5.3), so dass kleine Fehler im Elevationswinkel nun in der Strahldichte sichtbar werden. Auch wenn die Streuung in den kleineren Elevationswinkeln recht groß ist, stehen die hier gewonnenen Werte nicht im Widerspruch zu der Behauptung, dass die Strahldichtedifferenz zwischen Modell und Messung unabhängig vom Elevationswinkel ist.

Nachdem in Abschnitt 5.7 viele mögliche Ursachen ausgeschlossen wurden, wird in diesem Abschnitt der Einfluss von Streuung an der Oberfläche des Scanspiegels untersucht. Der Scanspiegel war während der Messungen der Atmosphäre ausgesetzt, die über dem Ozean Seesalz-Aerosol enthält. Nach der Kampagne war auch deutlich zu erkennen, dass sich auf der Goldschicht des Spiegels ein kristalliner Belag abgesetzt hatte. Deshalb wird davon ausgegangen, dass es sich bei der überschüssigen Strahldichte um atmosphärische IR-Strahlung handelt, die am Scanspiegel in die optische Achse des MIPAS-STR gestreut wird².

¹ Natürlich wurde das approximierten Spektrum auch mit dem gemessenen verglichen, um sicherzustellen, dass der gefundene Strahldichteüberschuss nicht durch die Approximation entsteht.

² Ein ähnlicher Effekt kann auch durch Aerosole im Sehstrahl erzeugt werden. Diese streuen die atmosphärische Strahlung aus allen Raumrichtungen in alle Richtungen, u.a. auch in die Richtung des Sehstrahls. Da der Streulichtbeitrag elevationswinkelunabhängig ist, müsste die aerosolhaltige Luftschicht auf Flughöhe sein.

Um die Vermutung, dass Streuung an der Spiegeloberfläche die überschüssige Strahldichte verursacht, zu bestätigen, wurde mit Hilfe des Vorwärtsmodells KOPRA die Strahldichte der atmosphärischen Strahlung berechnet, die durch die Schieberöffnung auf die Mitte des Scanspiegels gelangt. Da die Strahldichtedifferenz unabhängig vom Elevationswinkel ist (s. Abb. 5.24), kann die Winkelabhängigkeit des differentiellen Streuquerschnitts nur sehr klein sein. Deshalb wurde sie nicht berücksichtigt. Als Begrenzung für die Richtung, aus der die Strahlung stammt, wurde der in Kapitel 3 bestimmte obere bzw. untere Rand der Schieberöffnung verwendet. Der Rollwinkel wurde auf 0° festgelegt. Die untere Begrenzung ist so tief, dass die Erdoberfläche gesehen wird.

Zum Vergleich mit diesem Modell der Streustrahlung wurde aus den Strahldichtedifferenzen zwischen approximierter Messung und Modellrechnung ein über alle Spektren gemittelttes Streulichtspektrum bestimmt. Beim Vergleich in Abb. 5.25 fällt sofort auf, dass die Linienform nicht stimmt. Die Linien im Streulicht sind so schmal wie stratosphärische Linien, die Linien im Modell, das Strahlung bis hinunter zur Erdoberfläche summiert, sind durch den troposphärischen Anteil stark druckverbreitert. Es muss also einen Effekt geben, der den Ursprung der Streustrahlung auf die Stratosphäre begrenzt. Betrachtet man die Verteilung des Offsets über den Elevationswinkel und die Flugzeit (Abb. 5.7), so kann man auf eine geschlossene Wolkendecke mit einer Oberkante bei 9 km schließen. Dies wird durch die Daten des ebenfalls auf der Geophysica installierten LIDAR ABLE [Fiocco et al. 1999] bestätigt.

Nimmt man eine optisch dichte, geschlossene Wolkendecke mit einer konstant hohen Oberkante an, so hat das zwei Einflüsse auf das Streulicht. Die Wolke selber liefert ein Schwarzkörperspektrum. Die Atmosphäre oberhalb der Wolke liefert schmale, linienförmigen Beiträge, die dem ‚gemessenen‘ Streuspektrum sehr ähnlich sind (Abb. 5.25).

Das Streulicht liefert nicht nur bei allen atmosphärischen Spektren, sondern auch bei dem Weltraumspektrum, einen quasi konstanten Beitrag. Die Kalibrierungsfunktion wird mit reduzierter Auflösung bestimmt. Deshalb wird die Schwarzkörperstrahlung der Wolke genauso wie der breitbandige Geräteuntergrund von allen Spektren abgezogen. In den kalibrierten Spektren ist die Schwarzkörperstrahlung der Wolke darum nicht mehr erkennbar.

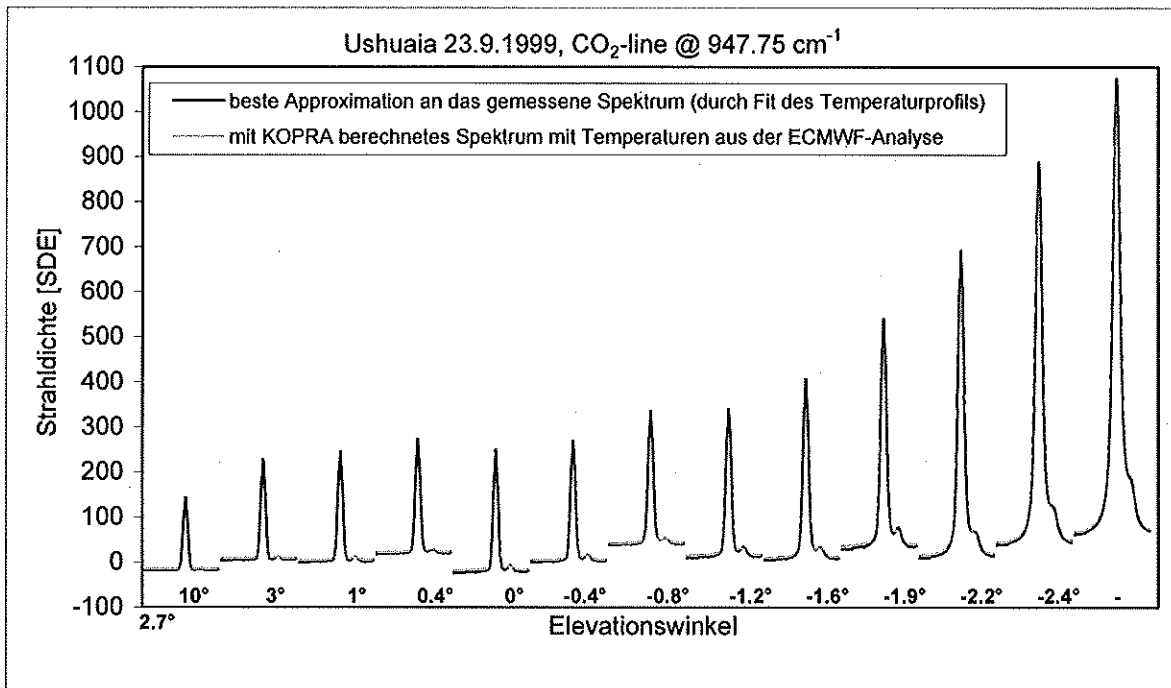


Abb. 5.22 Vergleich von Modell und Messung.
 In Sequenz 04_00142: alle Elevationswinkel für die CO₂-Linie bei 947.75 cm⁻¹

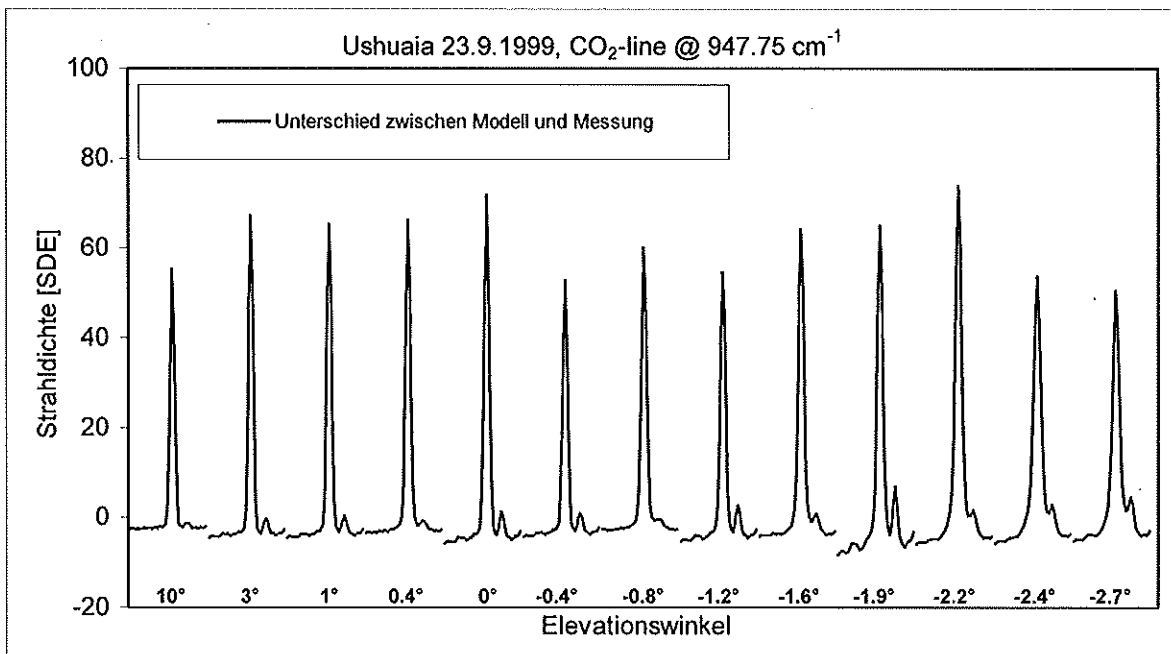


Abb. 5.23 Unterschied zwischen Modell und Messung.
 In Sequenz 04_00142: alle Elevationswinkel für die CO₂-Linie bei 947,75 cm⁻¹.

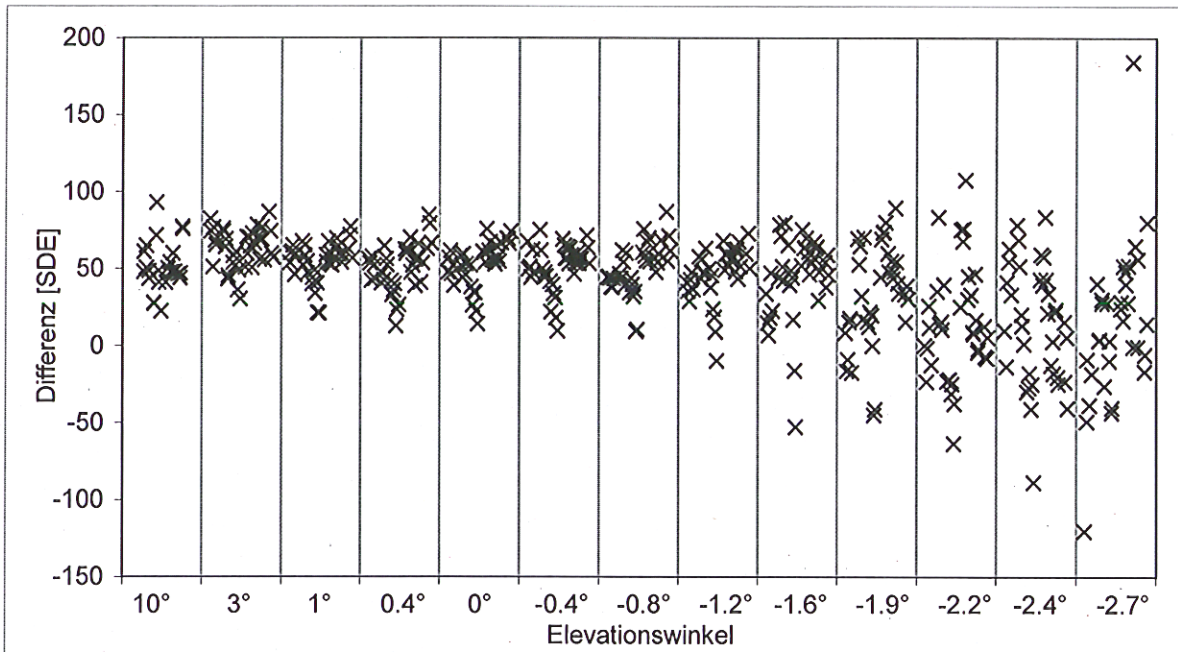


Abb. 5.24 Abhängigkeit der Strahldichtedifferenz vom Elevationswinkel

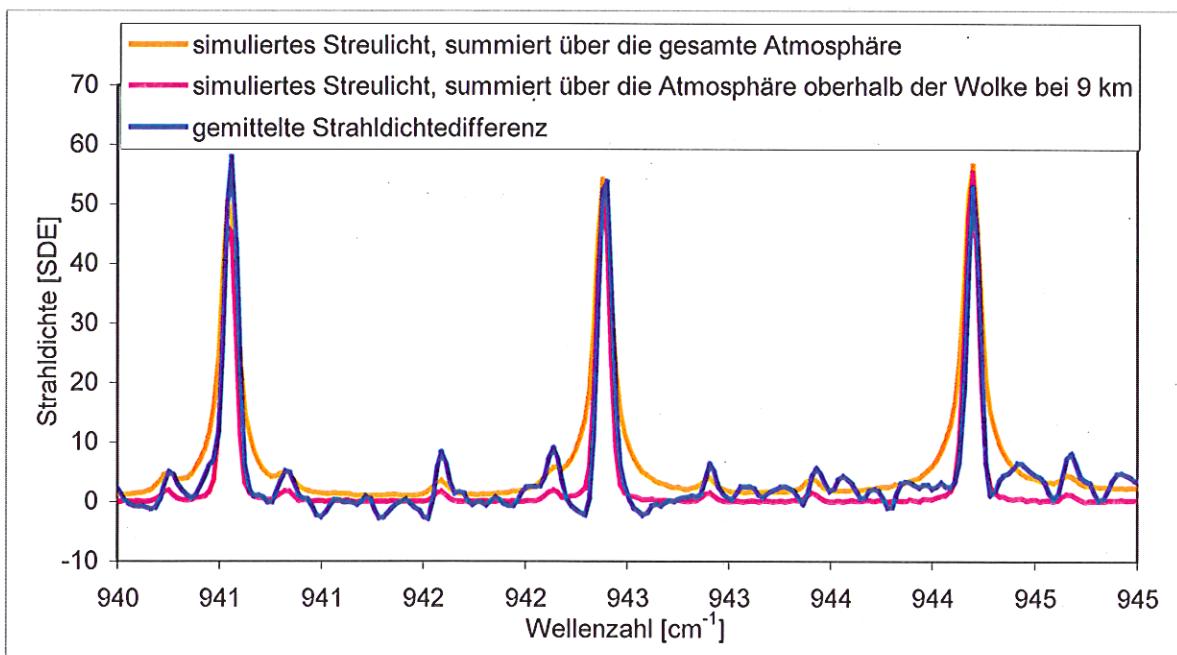


Abb. 5.25 Simulation des Streulichts, verglichen mit dem Strahldichteüberschuss in den Messungen

Zusammenfassend stellte sich bei der Analyse der Ursachen heraus, dass das gemessene Spektrum aus dem (erwarteten) elevationsabhängigen Spektrum mit nominellem FOV und zusätzlich aus einem elevationsunabhängigen Streulichtspektrum besteht. Um aus diesen gemessenen Spektren Information über die Elevation zu gewinnen, muss der Streulichtanteil in den Spektren entfernt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Methoden angewandt, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

5.9 Verfahren zur Bestimmung eines streulichtkorrigierten Elevationsabstands

Durch den simultanen Fit sowohl des Elevationsabstands δ einer Sequenz, als auch des Temperaturprofils in Abschnitt 5.6 wird im Prinzip dem Einfluss durch Streulicht entgegengewirkt. Die zu große Strahldichte in den Linien wird durch eine zu warme Temperatur kompensiert. Werden mit dem abgeleiteten Temperaturprofil die Elevationsabstände der Einzelspektren bestimmt, ist die Abhängigkeit vom Elevationswinkel aber noch vorhanden. Da sich die Temperatur auf jedes Spektrum unterschiedlich auswirkt, ist es nicht möglich, durch ein gemeinsames Temperaturprofil alle Spektren gleichzeitig zu korrigieren. In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt, den Effekt des Streulichts auf den Elevationsabstand (s. Abb. 5.16) zu korrigieren.

- 1) Die einfachste Methode, die Abhängigkeit des Elevationsabstands von der Elevation zu beseitigen, ist, von jedem Elevationsabstand den pro Winkel über den Flug gemittelten Elevationsabstand abzuziehen. Dabei wird der Streulichtanteil nicht aus den Spektren, sondern aus dem Elevationsabstand entfernt. Diese Methode ist deshalb geeignet, unvoreingenommen den relativen Verlauf des Elevationsabstandes über den Flug zu untersuchen. Das Ergebnis in Abb. 5.26 erstaunt nicht weiter, der Verlauf des differentiellen Elevationsabstand über die Messzeit in Abb. 5.27 kann aber erstmals dargestellt werden. Durch gewichtete Mittelung der einzelnen Elevationsabstände, die Mittelung ist in Anhang C beschrieben, kann nun ein gemeinsamer Elevationsabstand für jede Sequenz, siehe Abb. 5.28, bestimmt werden. Die geringfügigen Abweichungen zu dem Elevationsabstand, der mit festgehaltenem Temperaturfeld bestimmt wurde, entstehen durch die unterschiedliche Gewichtung der Einzelspektren, da der Fehler des abgezogenen Mittelwerts bei der Gewichtung berücksichtigt wird¹. Das Abfallen des Elevationsabstands in den Flugabschnitten mit zunehmender Messzeit hätte durch Abziehen einer linearen Funktion anstatt des Mittelwerts behoben werden könne. Dies wurde unterlassen, da diese Maßnahme nicht durch Streulicht begründet werden kann.
- 2) In den Spektren zum größten positiven Elevationswinkel (3°) ist der Effekt einer fehlerhaften Elevation auf die Strahldichte vernachlässigbar. Deshalb kann das erwartete, streulichtfreie Spektrum mit KOPRA gerechnet werden. Die Differenz zwischen gerechnetem und gemessenem Spektrum wird als Streulichtspektrum betrachtet. Da das Streulichtspektrum elevationsunabhängig ist (s. Abb. 5.24),

¹ Selbst wenn der Fehler des Mittelwerts nicht berücksichtigt wird, entspricht das Abziehen des Mittelwertes keiner reinen Verschiebung des gemeinsamen Elevationsabstands. Sei $\delta_{i,n}$ der von KOPRA bestimmte Elevationsabstand mit der dazugehörigen Standardabweichung $\sigma_{i,n}$, wobei i die Elevationswinkel durchnummeriert und n die Sequenzen. Ferner sei a_i der Mittelwert der Elevationsabstände zu einem Elevationswinkel. Daraus kann der gemeinsame Elevationsabstand $\tilde{\delta}_n$ einer Sequenz, der korrigierte gemeinsame Elevationsabstand $\tilde{\delta}_n$ und der Korrekturterm $a_n = \delta_n - \tilde{\delta}_n$ berechnet werden:

$$\delta_n = \frac{\sum_i \delta_{i,n} \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}, \quad \tilde{\delta}_n = \frac{\sum_i (\delta_{i,n} - a_i) \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}, \quad a_n = \frac{\sum_i a_i \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{i,n}^2}}$$

Der Korrekturterm a_n ist nicht unabhängig von der Sequenz. Im Mittel nimmt das Rauschen $\sigma_{i,n}$ über den Flug ab, da das Gerät deutlich kälter wurde. Deshalb beträgt die Korrektur a_n zu Beginn des Fluges ca. 5' und am Ende nur noch ca. 2'. Wird der Fehler des Mittelwertes bei der Gewichtung berücksichtigt, lässt sich der Sachverhalt nicht mehr in so einfachen Formeln ausdrücken, bleibt aber im Wesentlichen erhalten.

können nun alle Spektren dieser Sequenz korrigiert werden, indem das Streulichtspektrum abgezogen wird. Da das zur Korrektur verwendete 3°-Spektrum Rauschen enthält, wird durch die Korrektur der Anteil des Rauschens im korrigierten Spektrum um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht. Um rauschärmere, korrigierte Spektren zu erhalten, muss dieser Ansatz modifiziert werden. Von den möglichen Varianten soll hier nur eine vorgestellt werden, da sich die mit den verschiedenen Versionen bestimmten Elevationsabstände nur geringfügig unterscheiden. Wie man aus Abb. 5.24 entnimmt, ist der Streulichtbeitrag für $\eta \geq -1,6^\circ$ konstant, da erst darunter Abweichungen von der nominellen Elevation zu einer sichtbaren Änderung der Strahldichte im Spektrum führen. Aus der Abhängigkeit der Strahldichte von der Elevation geht ferner hervor, dass der gemeinsame Elevationsabstand einer Sequenz nur durch die Spektren mit $\eta \leq -1,8^\circ$ maßgeblich beeinflusst wird (s. Abb. 5.5). Um das Rauschen im Streulichtspektrum zu verkleinern, werden deshalb die Streulichtspektren zu den obersten acht Elevationswinkeln einer Sequenz gemittelt. Bei n Spektren erhöht sich das Rauschen in den korrigierten Spektren um einen Faktor $\sqrt{1+1/n}$, bei acht Spektren ist der Faktor nur noch 1,06. Die gemittelten Streulichtspektren werden nun von allen Spektren der gleichen Sequenz abgezogen, und für jedes einzelne Spektrum wird der Elevationsabstand bestimmt. Das Ergebnis ist in Abb. 5.29 dargestellt. Genau wie bei Methode 1) kann aus den einzelnen Elevationsabständen der Elevationsabstand der Sequenz berechnet werden.

Der mit den beiden beschriebenen Methoden streulichtkorrigierte Elevationsabstand der Sequenzen wird in Abb. 5.30 mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.6 verglichen, bei denen der Einfluss von Streulicht nicht berücksichtigt wurde (im Gegensatz zu den Ergebnissen in Abb. 5.10 ist nun die Abnahme der Modulationseffizienz berücksichtigt). Auffällig ist der ähnliche relative Verlauf bei den drei Verfahren, die die Temperatur nicht mitbestimmen. Aber auch das Verfahren mit Temperaturbestimmung weicht nur im dritten Flugabschnitt stark ab. Der Zick-Zack-förmige Verlauf ist ein Problem der gleichzeitigen Bestimmung von Elevationsabstand und Temperatur (s. Abschnitt 5.6).

Der Vergleich liefert folgende Ergebnisse:

- Der relative Verlauf des Elevationsabstands hängt fast nicht von der Methode ab, mit der das Streulicht korrigiert wurde. Auch der Verlauf ohne Korrektur, mit festgehaltenem Temperaturfeld, unterscheidet sich kaum. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, *dass der relative Verlauf des Elevationsabstands den relativen Verlauf des Elevationsfehlers wiedergibt.*
- Der Mittelwert des Elevationsabstands, jeweils über die vier Flugabschnitte gebildet, hängt stark von der Methode ab, mit der der Elevationsabstand bestimmt wurde. Der Mittelwert des Elevationsabstands ist somit nicht bestimmbar, für den absoluten Elevationsfehler kann deshalb nur eine obere Schranke von 10 Bogenminuten angegeben werden. Von einem zum nächsten Flugabschnitt springt der Mittelwert auch bei der gleichen Methode. Besonders hervorgehoben werden soll der Sprung vom zweiten zum dritten Flugabschnitt, da dieser im nächsten Abschnitt mit der Ausgabe der Navigationssysteme verglichen wird. Von den Verfahren mit festem Temperaturfeld ist der Sprung bei der zweiten Streulichtkorrekturmethode mit 5-6 Bogenminuten, unter Berücksichtigung des linearen Trends, am kleinsten.

- Die Verfahren mit festem Temperaturfeld zeigen innerhalb der Flugabschnitte einen leichten Abfall des Elevationsabstands mit der Flugzeit. Die Steigung ist unabhängig von der Methode. Dieser Abfall wurden bereits in Abschnitt 5.6 untersucht, konnte aber nicht vollständig erklärt und beseitigt werden.

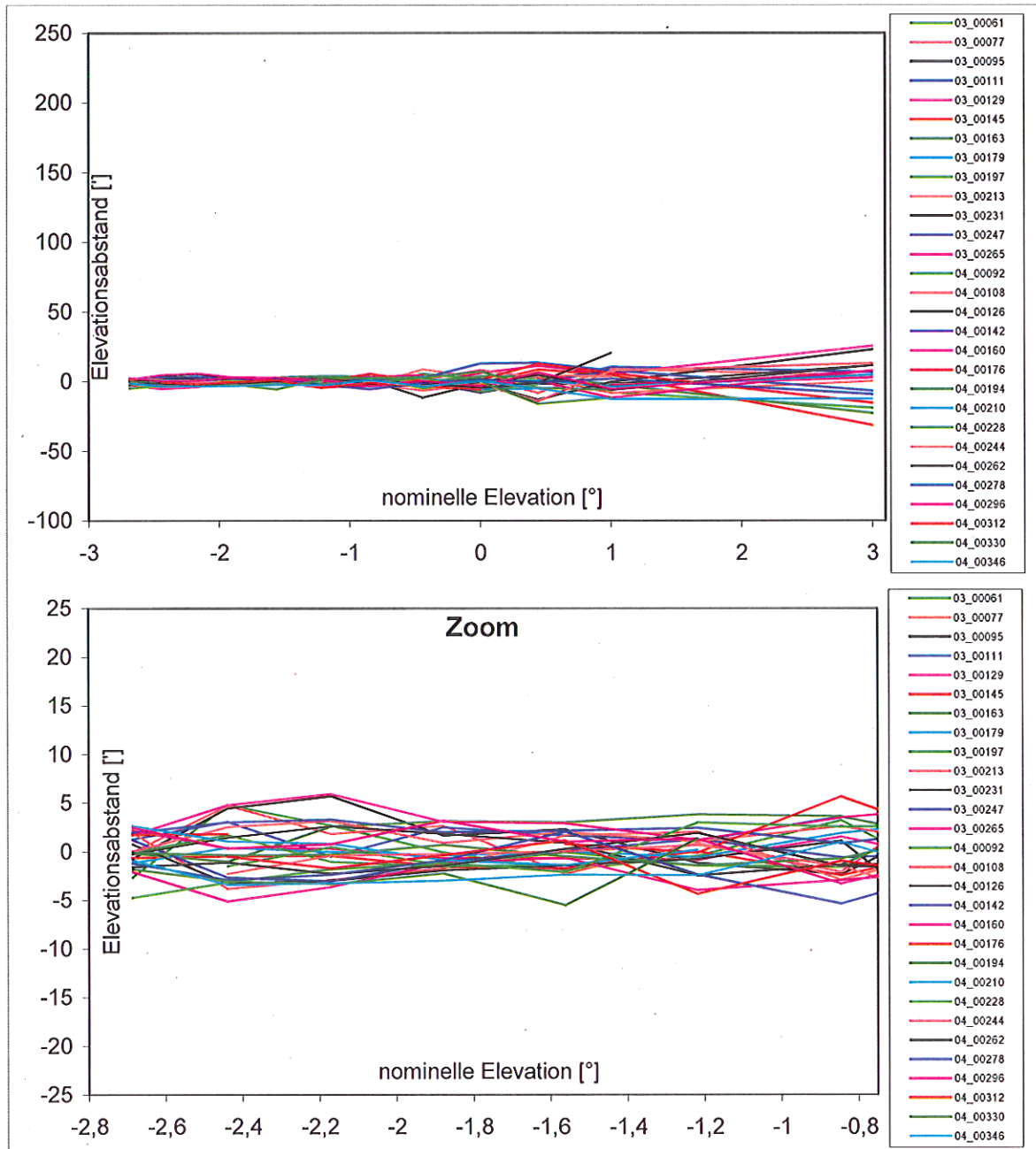


Abb. 5.26 Differenzieller Elevationsabstand.

Es wurde jeweils der mittlere Elevationsabstand pro Elevation abgezogen. Aufgetragen ist der Elevationsabstand in Abhängigkeit von der nominellen Elevation, vergl. Abb. 5.16.

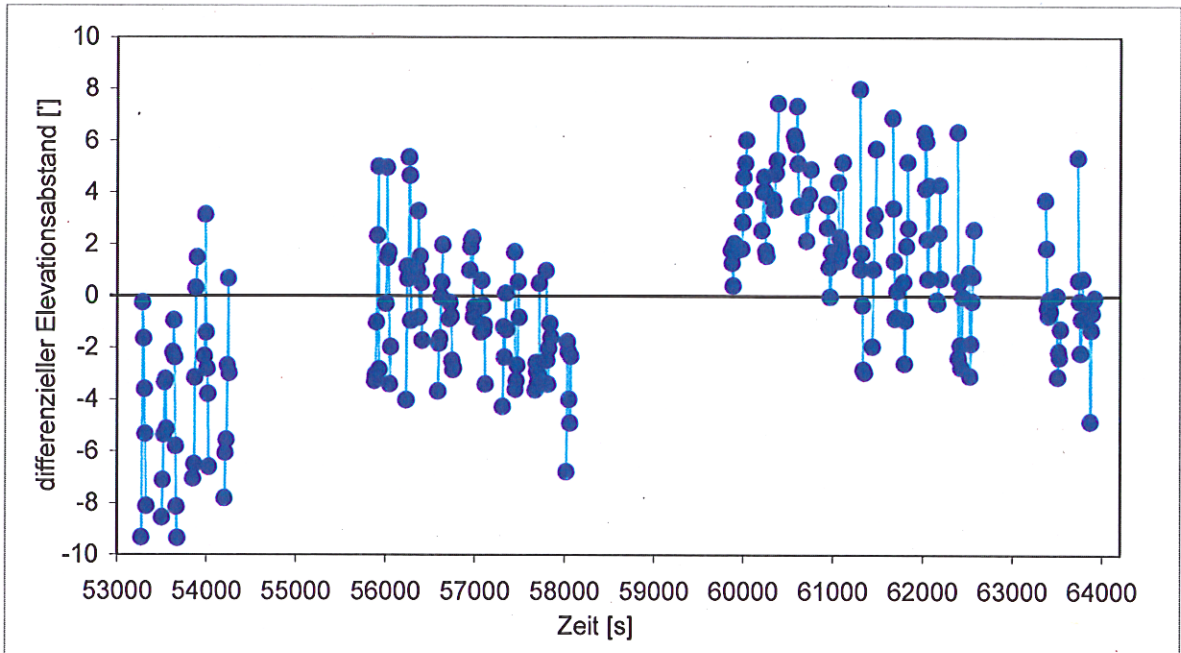


Abb. 5.27 Differenzieller Elevationsabstand über der Messzeit.

Es wurde jeweils der mittlere Elevationsabstand pro Elevation und Bereich abgezogen. Aufgetragen ist der Elevationsabstand für nominelle Elevationen kleiner -0.5° über der Messzeit. Diese Auftragung macht die gesuchten Strukturen sichtbar.

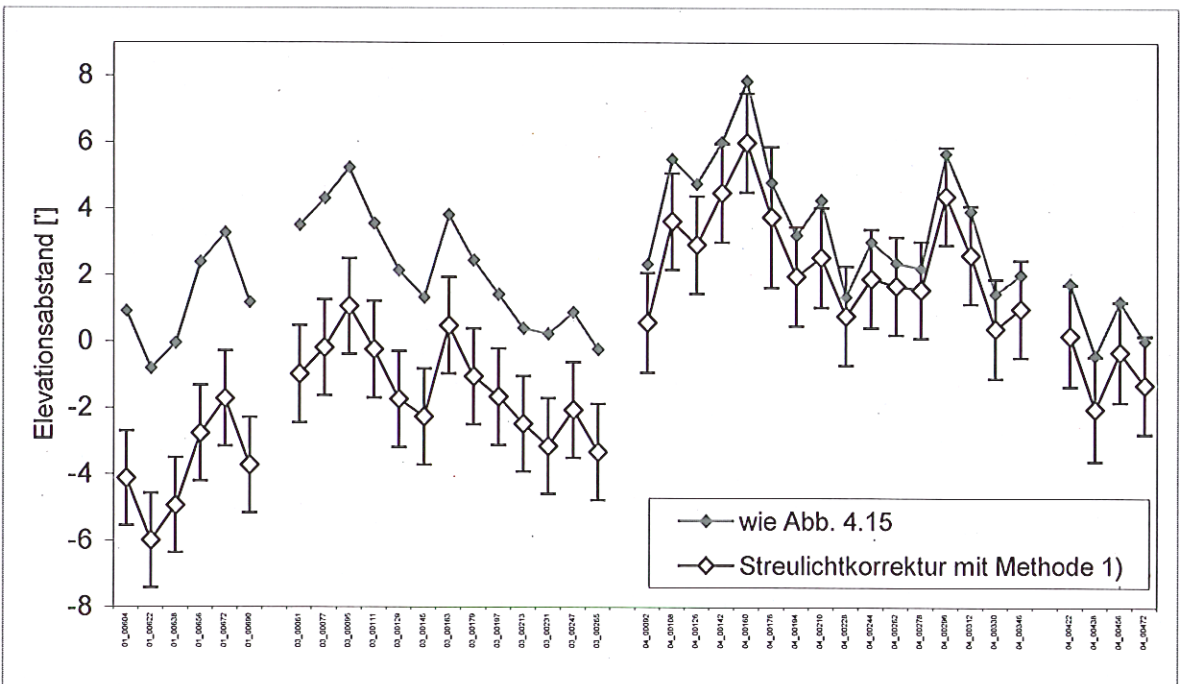


Abb. 5.28 streulichtkorrigierter Elevationsabstand δ pro Sequenz.

Die Elevationsabstände der Einzelspektren wurden korrigiert, indem der Mittelwert pro Elevation abgezogen wurde. Pro Sequenz wurde ein gewichteter mittlerer Elevationsabstand berechnet. Zum Vergleich ist die Kurve aus Abb. 5.15 ebenfalls dargestellt.

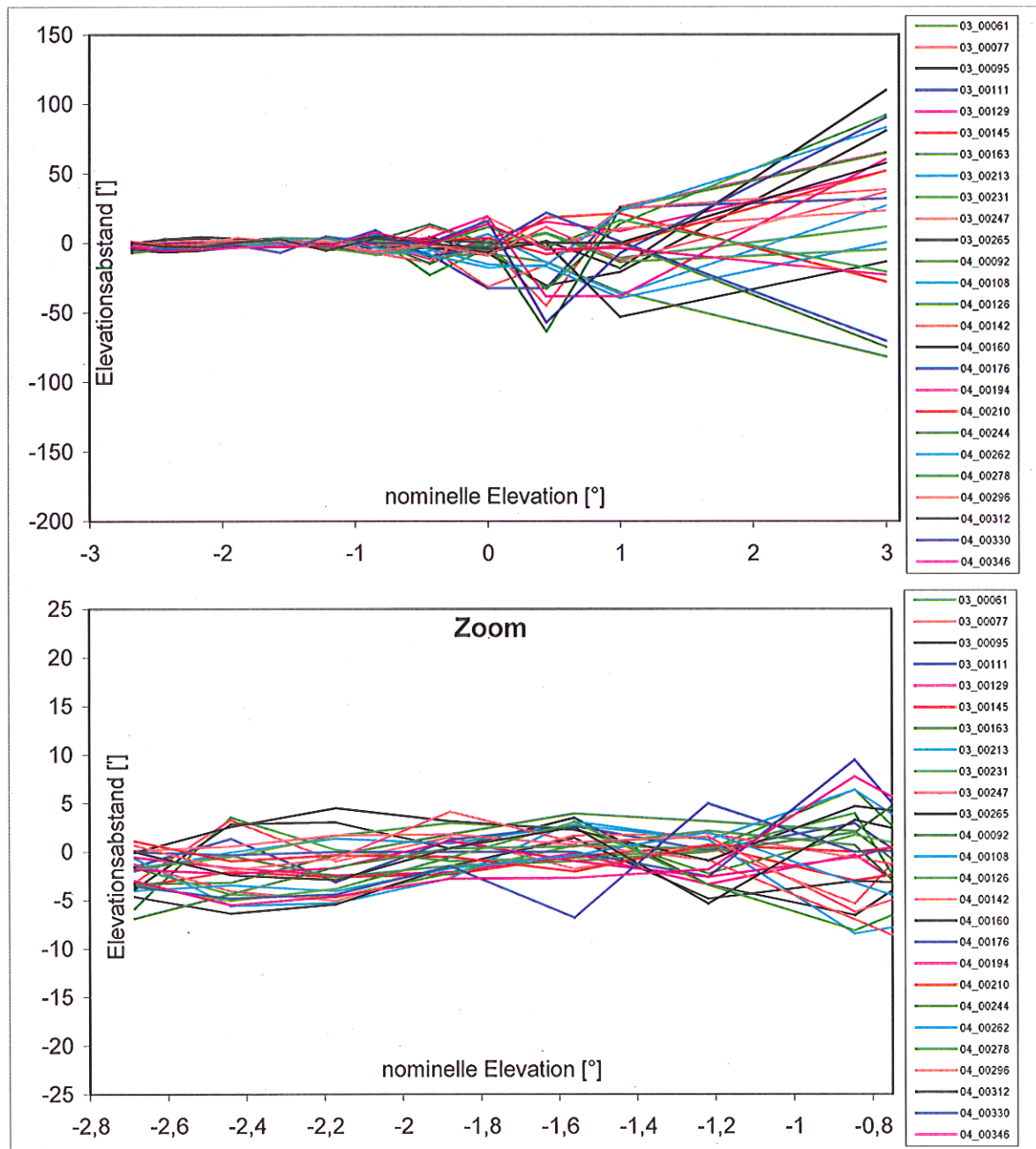
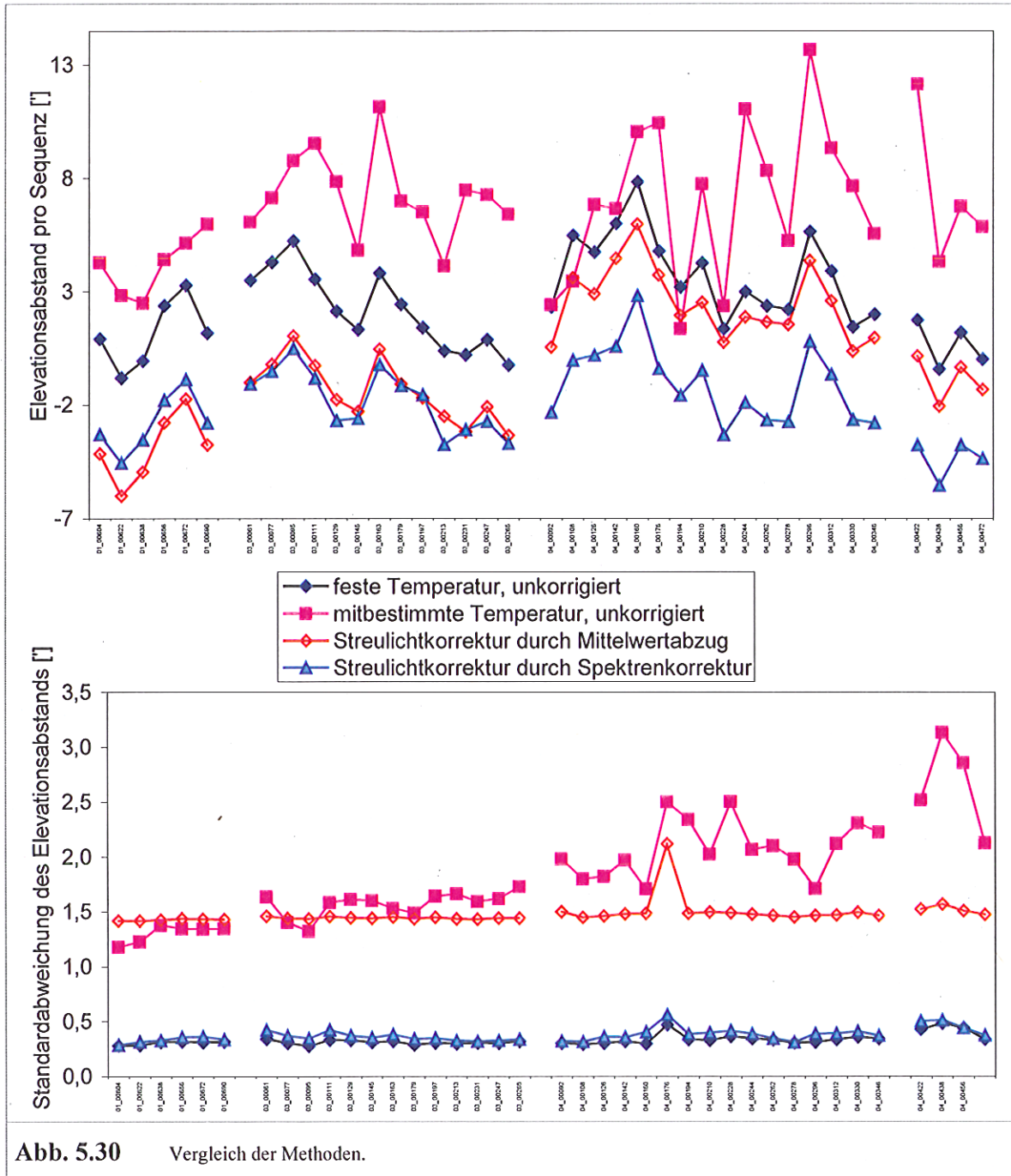


Abb. 5.29 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.

Die Spektren wurden mit Methode 2) streulichtkorrigiert: Abziehen der über die oberen acht Elevationswinkel gemittelten Differenz zwischen Vorwärtsrechnung mit ECMWF-Temperaturprofil und Messspektrum von allen Spektren.

Das Temperaturprofil wurde aus der Analyse von ECMWF gewonnen und nicht mitgefittet.

Es wurden die CO₂-Linien der Laserbande verwendet (936 cm⁻¹ - 960 cm⁻¹).



5.10 Bewertung und Vergleich mit der Rollwinkeldifferenz von AHRS zu GNS

In Kapitel 3 wurde das Navigationssystem AHRS, das die Lage des MIPAS-Optikmoduls misst, mit dem Navigationssystem der Geophysica verglichen. Dazu wurde die Differenz der beiden Rollwinkelangaben gebildet. Es traten dabei zwei Effekte auf. Zum einen gibt es kurzskalige Schwankungen, die entweder einen Messfehler eines (oder beider) Gerätes darstellen, oder die relative Bewegung des MIPAS gegenüber dem Flugzeugrahmen durch die Federn der Aufhängung beschreiben. Außerdem gab es beim Ändern der Flugrichtung um 180° einen Sprung in dieser Differenz, die sicher ein Fehler in der Messung ist.

Mit den Ergebnissen aus dem dritten Kapitel liegt eine weitere, unabhängig gewonnene Information über die Genauigkeit des vom AHRS gemessenen Rollwinkels vor. Nimmt man an, dass nur der Rollwinkel des AHRS Fehler hat (die Messwerte der Geophysica seien als fehlerfrei angenommen), so erscheinen diese zum einen in der Differenz zum Rollwinkel des GNS, und zum anderen in dem aus den Spektren bestimmten Elevationsabstand. Da die einzelnen Spektren unterschiedlich zum gemeinsam bestimmten Elevationsabstand der Sequenz beitragen (s. Abschnitt 5.5), wirkt sich der Rollwinkelfehler verschieden auf den Elevationsabstand aus, je nachdem unter welchem Elevationswinkel gerade das IFG aufgenommen wird. Deshalb wurde, um die Rollwindeldifferenz und den Elevationsabstand vergleichbar zu machen, eine gewichtete Rollwindeldifferenz gebildet. Dazu wird über den Zeitraum eines Interferogramms die mittlere Rollwindeldifferenz gebildet. Aus den mittleren Rollwindeldifferenzen zu allen Interferogrammen einer Limbsequenz wird dann ein gewichteter Mittelwert berechnet. Als Gewichtung wird der Rauschfehler des Elevationsabstands eines Einzelspektrums verwendet (s. Anhang C). So werden für diesen Mittelwert genau die gleichen Gewichte verwendet, wie wenn aus den Elevationsabständen der Einzelspektren ein gemeinsamer gemittelter Elevationsabstand gebildet wird. In Abb. 5.31 ist der Vergleich zwischen dem Elevationsabstand und der gewichteten Rollwindeldifferenz dargestellt.

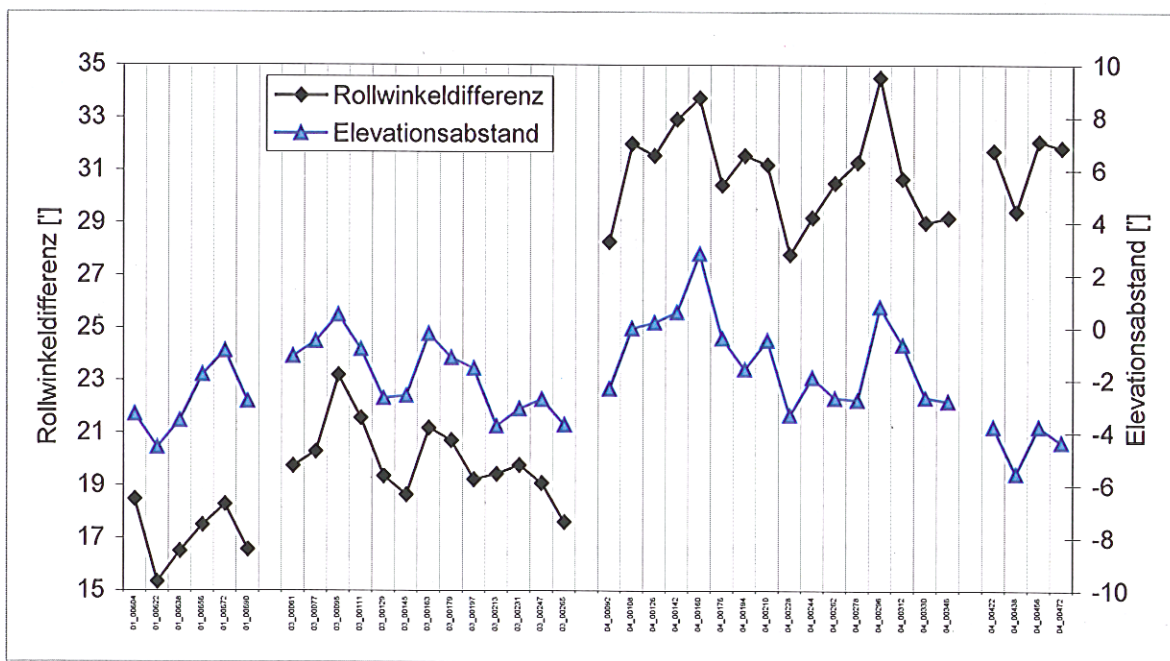


Abb. 5.31 Vergleich zwischen Elevationsabstand δ und Rollwindeldifferenz. Die Spektren, aus denen der Elevationsabstand bestimmt wurde sind modulationskorrigiert (s. Abb. 5.16), und der Streulichtanteil wurde entfernt (s. Abb. 5.30). Die in Kapitel 3 bestimmte Rollwindeldifferenz zwischen GNS und AHRS wurde für den Vergleich mit den gleichen Gewichten über jeweils eine Sequenz gemittelt wie der Elevationsabstand.

Hinsichtlich der Fragen, die sowohl im Kapitel 2 als auch in diesem Kapitel aufgetreten sind, liefert dieser Vergleich einige Antworten. Bei der Suche nach Antworten soll auch das in Abb. 5.30 dargestellte Ergebnis betrachtet werden.

- Die kurzskalige Struktur im Elevationsabstand ist bei allen Methoden sehr ähnlich (Abb. 5.30), und diese Struktur findet sich auch in der Rollwindeldifferenz wieder. Deshalb wird sie sehr wahrscheinlich durch eine fehlerhafte Lagewinkelausgabe des AHRS erzeugt.

- Bei allen Methoden, bis auf die, bei der die Temperatur mitbestimmt wird, gibt es innerhalb der Flugabschnitte einen abfallende Trend im Elevationsabstand. In Abschnitt 5.6 wurden bereits Ursachen für diesen Trend untersucht. In der Rollwinkeldifferenz ist der Trend nicht sichtbar. Deshalb kann das AHRS als Ursache ausgeschlossen werden.
- Eine weitere Frage gilt dem Sprung der Rollwinkeldifferenz beim Wechseln der Flugrichtung. Dieser trat bei allen bisher untersuchten Flügen auf. Je nach verwendeter Methode tritt auch bei der Bestimmung des Elevationsabstands ein Sprung auf. Dieser ist jedoch deutlich kleiner (s. Abb. 5.31). Um den Sprung des Elevationsabstands zu untersuchen, werden die Ergebnisse des simultanen Retrievals von Elevationsabstand und Temperaturprofil verwendet (s. Abb. 5.30). Der Fehler ist bei dieser Methode zwar am größten, jedoch schwankt der bestimmte Elevationsabstand bei jeder Sequenz statistisch um den wahren Wert. Deshalb beschreibt der simultan mit dem Temperaturprofil bestimmte Elevationsabstand am besten die langfristige Entwicklung des Elevationsfehlers. Hier tritt jedoch vom zweiten zum dritten Flugabschnitt kein Sprung im Elevationsabstand auf. Bei der Untersuchung in Kapitel 2 war die plausibelste Erklärung für den Sprung ein Fehler des Navigationssystems der Geophysica. Die systematischen Fehler im Temperaturfeld von ECMWF sind offenbar so, dass sie bei festgehaltenem Temperaturfeld einen Sprung des Elevationsabstands in die gleiche Richtung, aber mit einem kleineren Betrag ergeben. Ein weiteres Detail tritt bei der Untersuchung des Einflusses der richtigen zeitlichen Interpolation des Temperaturfelds in Abb. 5.11 auf. Verwendet man das Feld um 12 Uhr (UTC), so ist der Sprung deutlich größer als beim interpolierten Feld, der Sprung bei Verwendung des 18-Uhr-Feldes ist aber am kleinsten. Der Sprung im Elevationsabstand kann also durch einen Phasenversatz im Tagesgang der Temperatur verursacht werden.

5.11 Fehlerabschätzung

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Fehlerquellen untersucht und ihre Auswirkung auf den bestimmten Elevationswinkel quantifiziert. Eine gute Zusammenstellung, wie sich systematische und statistische Fehler im Spektrum auf z.B. den Elevationswinkel auswirken, findet sich in [Clarmann und Echle 1998]. Dabei wird ein linearer Ansatz (mehrdimensionale Taylorentwicklung 1. Ordnung) verwendet, wie er in einer kleinen Umgebung des wahren Werts gilt.

Der Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Größen wird dann durch die Kovarianzmatrix S_{tot} beschrieben. Sie setzt sich aus einem systematischen und einem statistischen, durch das Rauschen im Spektrum hervorgerufenen Anteil zusammen.

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{ran}} + S_{\text{sys}} \quad (5.17)$$

Die Matrizen haben die Dimension $(p \times p)$ bei p zu bestimmende Größen. Die Anzahl der Stützstellen im Spektrum sei m . Mit der Jakobi-Matrix K , die die Ableitung der Strahldichte im Spektrum nach den zu bestimmenden Größen darstellt, und der Kovarianzmatrix S_y der Messung kann der statistische Fehler berechnet werden.

$$S_{\text{ran}} = (K^T S_y^{-1} K)^{-1} \quad (5.18)$$

Ähnlich wird auch der systematische Fehler berechnet. Aus der linearen Änderung E_y , um die sich die Strahldichte durch den systematischen Fehler ändert, wird die Matrix E_{sys} und daraus die gesuchte Kovarianzmatrix S_{sys} berechnet.

$$S_{\text{sys}} = E_{\text{sys}} E_{\text{sys}}^T \quad (5.19)$$

$$E_{\text{sys}} = (K^T S_y^{-1} K)^{-1} K^T S_y^{-1} E_y \quad (5.20)$$

5.11.1 Fehler im Elevationsabstand durch Fehler im vmr von CO₂

Wie man an der linearisierten Strahlungsübertragungsgleichung (s. Gleichung (5.15)) leicht sieht, wirkt sich eine Skalierung des Volumenmischungsverhältnisses (vmr) in einer Skalierung der Strahldichte um den gleichen Faktor aus. Die Fehler im vmr von CO₂ sind mit 0,5 %¹ so klein, dass sie hier als Skalierung des gesamten Profils behandelt werden.

Der aus einer Skalierung des Spektrums mit $(1+\alpha)$ entstehende Elevationsfehler $\Delta\eta$ lässt sich in linearer Näherung leicht berechnen. Setzt man nun in (5.20) $\Delta\eta$ für E_{sys} ein und für E_y die Strahldichtedifferenz $\alpha \cdot Y(\eta_0)$ (dabei sei $Y(\eta_0)$ die Strahldichte zum wahren Elevationswinkel η_0), so erhält man:

$$\Delta\eta = (K^T S_y^{-1} K)^{-1} K^T S_y^{-1} \alpha Y(\eta_0) \quad (5.21)$$

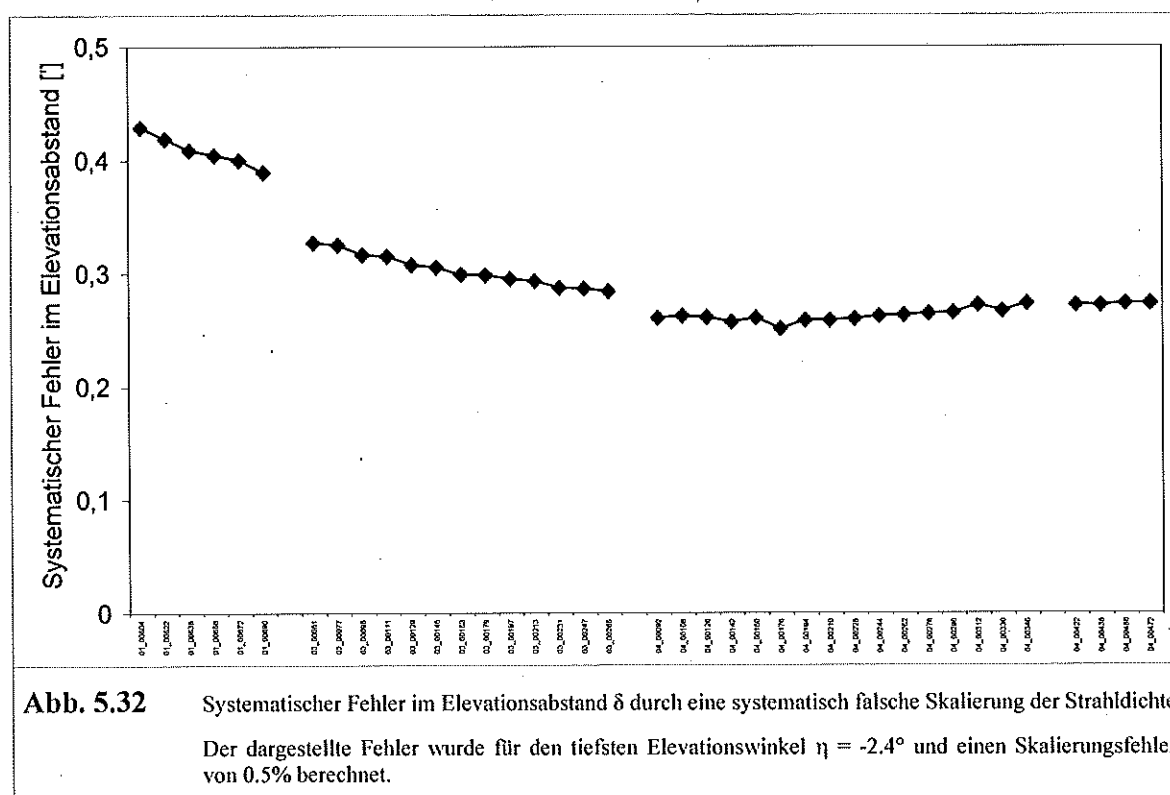


Abb. 5.32 Systematischer Fehler im Elevationsabstand δ durch eine systematisch falsche Skalierung der Strahldichte. Der dargestellte Fehler wurde für den tiefsten Elevationswinkel $\eta = -2,4^\circ$ und einen Skalierungsfehler von 0.5% berechnet.

In Abb. 5.32 ist die Auswirkung eines Fehler von 0,5 % im vmr auf den tiefsten Elevationswinkel $\eta_0 = -2,4^\circ$ aufgetragen. Dieser Winkel dominiert die Sequenz, wenn der Elevationsfehler gemeinsam für eine ganze Sequenz bestimmt wird. Während des Fluges ändern sich das Temperaturprofil und die Flughöhe, aber vor allem das Rauschen in den Spektren. Der Wert des Fehlers ändert sich daher während des Fluges. Pauschal kann der Fehler bei einem Skalierungsfehler von 0,5 % mit $< 0,4'$ angegeben werden.

¹ Die Messungen von HAGAR haben einen Fehler von 0,1 %, jedoch wird der Fehler im verwendeten Profil dadurch vergrößert, dass ein geglättetes Profil für den ganzen Flug verwendet wird.

5.11.2 Fehler im Elevationsabstand durch Fehler im Temperaturprofil

Um den Einfluss des Temperaturprofils auf den bestimmten Elevationsabstand zu quantifizieren, wurden Testläufe mit linear modifiziertem Temperaturprofil gemacht (Abb. 5.33). Zum Einen wurde das Temperaturprofil um ein Kelvin verschoben (Fall A kälter und Fall B wärmer). Zum Anderen wurde das Temperaturprofil um $\pm 1\%$ skaliert, in Fall C mit 0,99 multipliziert, im Fall D mit 1,01.

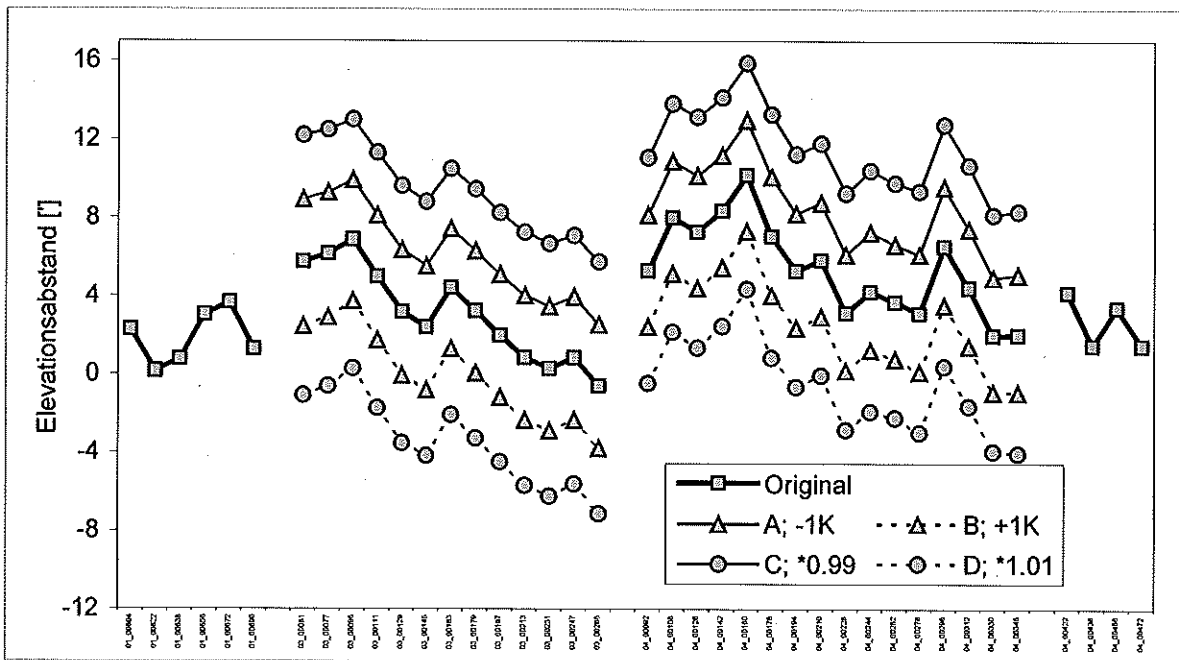


Abb. 5.33 Einfluss des Temperaturprofils auf den Elevationsabstand δ

Original: wie Abb. 5.10: mit ECMWF-Temperatur nur Elevationsabstand bestimmt, ohne Streulichtkorrektur
 A,B: im Gegensatz zu Original: Das verwendete Temperaturprofil wurde um ± 1 K verschoben
 C,D: im Gegensatz zu Original: Das verwendete Temperaturprofil wurde um $\pm 1\%$ skaliert

Der Einfluss des Temperaturprofils wirkt sich auf jede Sequenz ähnlich aus, der bestimmte Elevationsabstand wird nur entlang der Ordinate verschoben. Es gibt quasi keinen Einfluss auf den relative Unterschied zwischen den Sequenzen. Durch eine für alle Sequenzen identische lineare Modifikation des Temperaturprofils kann der tendenzielle Abfall des Elevationsabstands innerhalb der Flugabschnitte also nicht erklärt werden.

Außerdem wurde noch untersucht, wie sich eine Änderung des Temperaturprofils in nur einer Schicht auf den Elevationsabstand auswirkt (Abb. 5.34). Dadurch kann festgestellt werden, auf welche Schichten die Elevationsbestimmung sensitiv ist. Es ist nicht erstaunlich, dass es sich dabei mit 11-12 km um die Tangenschicht des tiefsten Elevationswinkels handelt. Die untere Abbildung zeigt, dass sich außer dem Elevationsabstand auch das rms des Residuums durch die Modifikation des Temperaturprofils ändert. Die Abbildung legt nahe, dass das verwendete Temperaturprofil im Bereich um 11 km zu warm und um 16 km zu kalt ist.

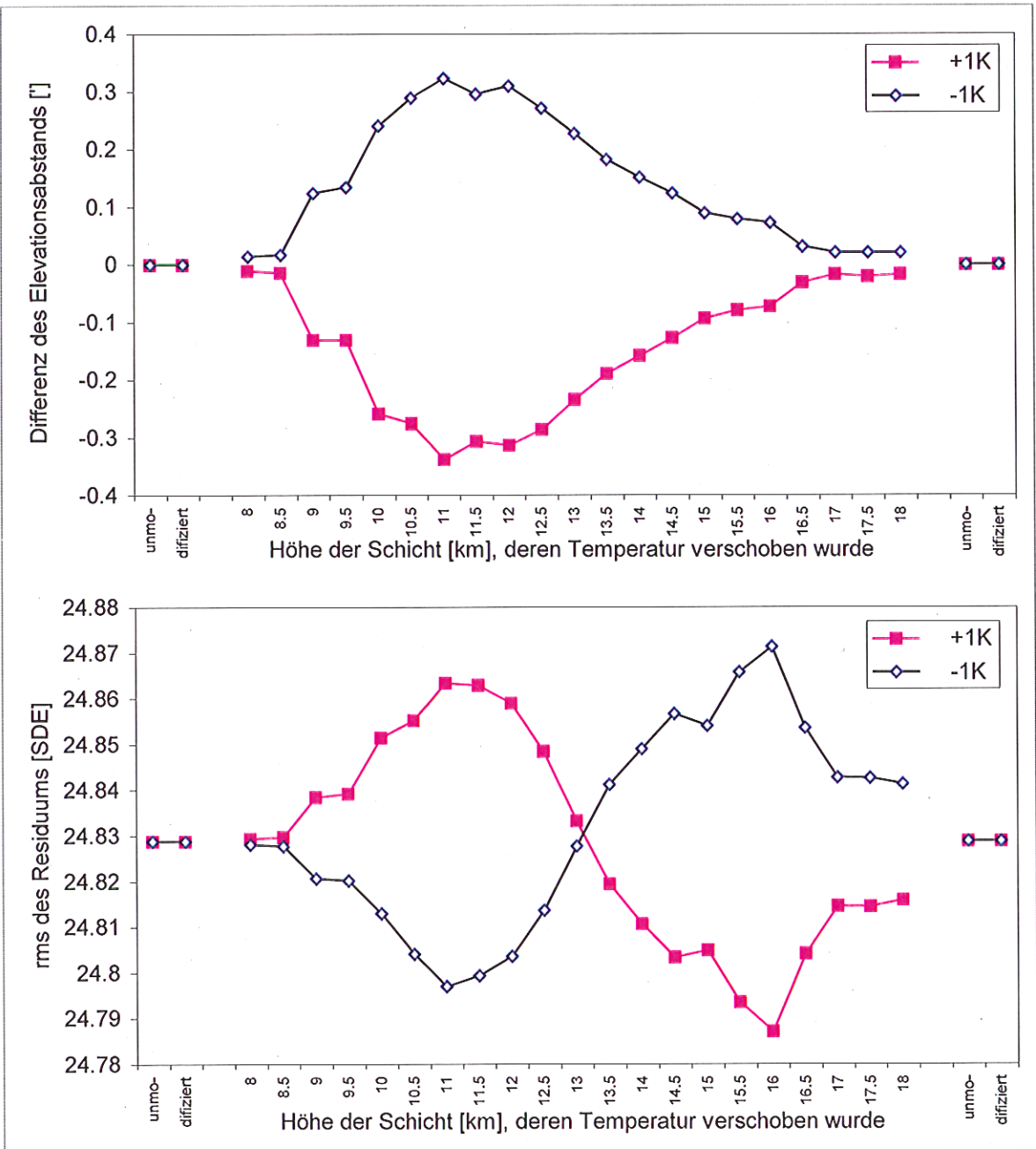


Abb. 5.34 Fehler im Elevationsabstand δ durch Fehler im Temperaturprofil, exemplarisch für die Sequenz 03_00179
 Das dem Retrieval zugrundeliegende Temperaturprofil wurde modifiziert, indem auf jeweils einer Höhenstufe ± 1 K dazugegeben wurde. Die Abbildung zeigt den Effekt sowohl auf den Elevationsabstand als auch auf das rms des Residuums.

5.11.3 Einfluss von Kalibrierung, Temperatur-Gradienten und Flughöhe

Außer dem Temperaturprofil gibt es weitere Parameter, die den Elevationsabstand beeinflussen und deshalb bei der Fehlerbetrachtung berücksichtigt werden müssen. In Abb. 5.35 ist der Vergleich der Ergebnisse des unmodifizierten Laufs mit drei Testläufen, bei denen jeweils ein Parameter variiert wurde, dargestellt.

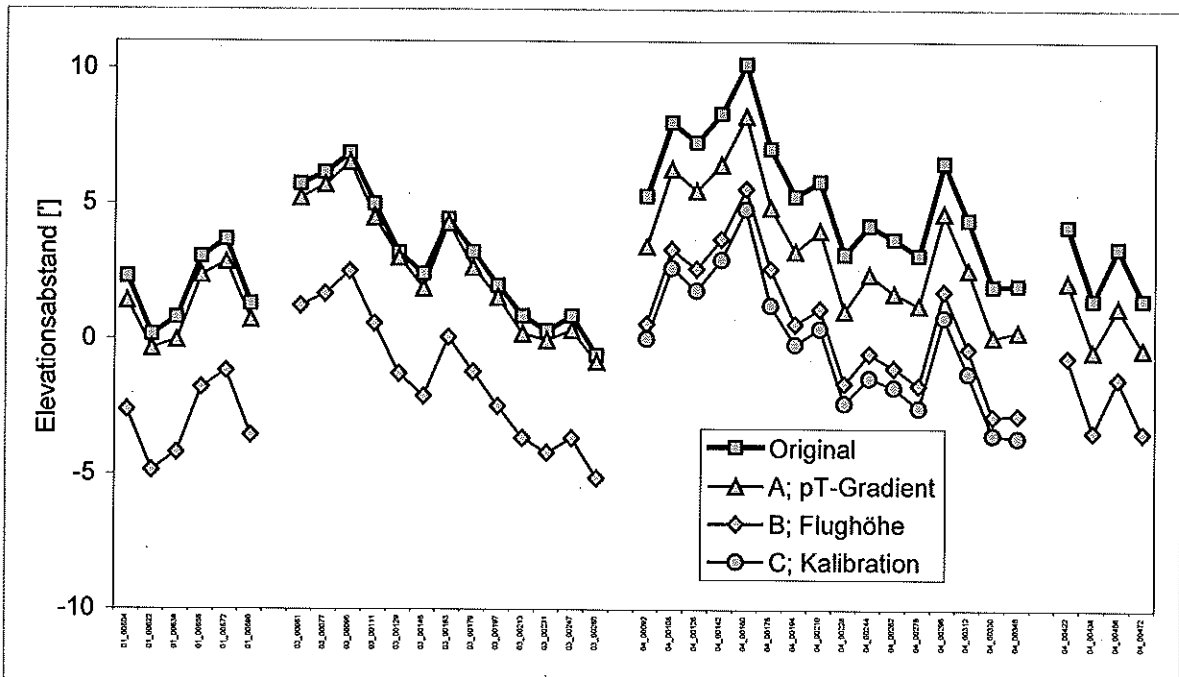


Abb. 5.35 Verschiedene Einflüsse im Vergleich:

- Original: wie Abb. 5.10: mit ECMWF-Temperatur nur Elevationsabstand bestimmt, ohne Streulichtkorrektur
- A: im Gegensatz zu Original: Berücksichtigung von Temperaturgradienten
- B: im Gegensatz zu Original: Flughöhenbestimmung anhand des Drucks anstatt GPS-Höhe, Differenz ca. 350m
- C: im Gegensatz zu Original: Kalibrierung des dritten Bereiches mit der Funktion des zweiten Bereiches

In dem mit 'Original' bezeichneten Lauf wurden eindimensionale Temperatur- und Druckprofile verwendet, die durch Interpolation das ECMWF-Feld an den Tangentenpunkten abgeleitet wurden. Im Fall A wurde stattdessen die neueste KOPRA-Version verwendet, die für jedes Volumenpaket entlang des Sehstrahls das ECMWF-Feld am Ort des Paketes interpoliert. So können nun horizontale Gradienten des Temperatur- und Druckfeldes berücksichtigt werden. Aus dem ECMWF-Feld zum Messzeitpunkt (s. Abb. 5.13) entnimmt man, dass nur östlich der Flugroute ein Temperaturgradient entlang des Sehstrahls vorlag. In den Bereichen '01' und '03' wurde nach Westen gemessen, deshalb ist der Effekt durch Nichtberücksichtigung des Temperaturgradienten vernachlässigbar. Im Bereich '04', wo nach Osten gemessen wurde, ist der Einfluss des Temperaturgradienten auf den Elevationsabstand mit im Mittel 1,9' deutlich sichtbar.

Fall B untersucht den Einfluss der exakten Flughöhe. Im betrachteten Flug unterscheidet sich die aus dem gemessenen Druck und dem Druckprofil bestimmte Flughöhe von der mit den beiden GPS gemessenen Höhe um ca. 350 m. Die Strahldichte in den gemessenen Spektren wird hauptsächlich durch den Tangentenpunkt festgelegt. Rein geometrisch ergibt sich dadurch, dass eine Änderung der angenommenen Flughöhe die Elevation ändert.

Aus $\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial H} \Delta H$ und $\frac{\partial\eta}{\partial H} = \frac{\cot\eta}{H+R}$ (H = Flughöhe, R = Erdradius) ergibt sich mit $\Delta H=350$ m

für den tiefsten (die Elevationsabstandsbestimmung dominierenden) Elevationswinkel $\eta = -2,44^\circ$ eine Änderung von $\Delta\eta = -4,4'$. Vergleicht man diesen Wert mit dem durch KOPRAFIT bestimmten Unterschied in Abb. 5.35 (im Mittel in '03' 4,5' in '04' 4,7'), so fehlt weniger als eine Bogenminute. Diese Differenz lässt sich leicht dadurch erklären, dass die Temperatur nicht konstant mit der Höhe ist.

Hier nicht abgebildet ist der Fall, dass statt der Flughöhe das Druckprofil so verschoben wurde, dass der vom Flugzeug gemessene Außendruck mit dem zur GPS-Höhe gehörenden Wert des Druckprofils übereinstimmt. Das Ergebnis ist identisch zu Fall B. Geometrisch ist das leicht einsichtig, weil die Größe der Verschiebung (350 m) gegenüber der Flughöhe (16,5 km) klein ist, und gegenüber dem Erdradius (6378 km) verschwindet.

Beiden Einflüssen gemeinsam ist, dass sich der Effekt in jedem Flugabschnitt auf jede Sequenz ähnlich auswirkt. Der bestimmte Elevationsabstand wird somit nur entlang der Ordinate verschoben. Der relative Unterschied zwischen den Sequenzen bleibt quasi gleich. Durch keinen dieser Einflüsse kann der tendenzielle Abfall des Elevationsabstands während eines Flugabschnitts erklärt werden. Nach Absatz 5.11.2 gilt dies ebenso für die lineare Modifikation $T \rightarrow a \cdot T + b$ des Temperaturprofils. Für einen absoluten mittleren Elevationsabstand müsste man also jeden dieser Parameter exakt kennen und in dem Modell (KOPRA) richtig beschreiben. Deshalb ist es nicht möglich, mit den heute verfügbaren Zusatzinformationen aus Spektren den absoluten Elevationsfehler zu bestimmen. Dennoch ist es gut möglich, den relativen Verlauf über die Zeit aus den Spektren zu entnehmen.

Um die Auswirkung einer falschen Kalibrierung zu bestimmen, wurde der Bereich '04' mit der Kalibrierungsfunktion von Bereich '03' kalibriert. Aus diesen Spektren wurde wieder der Elevationsabstand bestimmt (Fall C in Abb. 5.35). Die Kalibrierungsfunktionen unterscheiden sich in der Steigung um ca. 10%, dadurch werden die Strahldichten um 10% zu klein. Zur Kompensation wird die Elevation im Mittel um 5,5' nach oben geschoben. Dies entspricht der theoretischen Berechnung. Wird in Gleichung (5.21) für α 10% eingesetzt, ergeben sich im '04a' Bereich 5' Elevationsfehler.

5.12 Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieses Kapitels

Mithilfe des Strahlungsübertragungsprogramms KOPRA und der Inversion KOPRAFIT sollte aus den Spektren die Elevation bestimmt werden, unter der sie aufgenommen wurden. In diesem Kapitel wurden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt.

Aus einer Sequenz von Spektren, die unter verschiedenen Elevationswinkeln aufgenommen wurden, kann ein gemeinsamer Elevationsabstand bestimmt werden. Es wurde gezeigt, dass simultan mit dem Elevationsabstand auch das Temperaturprofil bestimmt werden kann. Es wurde untersucht, welchen Informationsgehalt die Spektren aufweisen. Der Elevationsabstand wird maßgeblich von den Messungen bei den drei tiefsten Tangentenhöhen bestimmt.

Wird das Temperaturfeld festgehalten, kann der Elevationsabstand aus jedem Einzelspektrum bestimmt werden. Dabei stellte sich heraus, dass alle Spektren noch einen ungefähr gleich großen, unerwarteten Beitrag enthalten. Da dieser Beitrag aus Spektrallinien besteht, muss er aus der Atmosphäre stammen. Es wird angenommen, dass durch kristalline Ablagerungen auf dem Scanspiegel atmosphärische Emissionsstrahlung aus einem weiten Winkelbereich in die Blickrichtung eingestreut wird. Um die Elevation der Spektren zu bestimmen, muss dieser Beitrag aus den Spektren eliminiert werden. Dazu wurden mehrere Methoden vorgestellt. Aus

den einzelnen Elevationsabständen kann pro Sequenz ein gemeinsamer Elevationsabstand berechnet werden.

Es wurde gezeigt, dass der relative Verlauf des Elevationsabstands der Sequenzen unabhängig von der Methode ist, mit der er gewonnen wurde. Durch Vergleich mit der in Kapitel 3 bestimmten Rollwinkeldifferenz zeigte sich, dass der relative Verlauf des Elevationsabstands dem relativen Verlauf des Elevationsfehlers entspricht und dass der Elevationsfehler durch Lagewinkelfehler des AHRS verursacht wurde.

Der absolute Wert des Elevationsfehlers lässt sich nur mit einer Genauigkeit bestimmen, die von der Genauigkeit der verwendeten Daten dominiert wird. Der Temperatur-Fehler im ECMWF-Feld, ca. 2 K, entspricht 8' Fehler im Elevationsabstand. Die Kalibrierungsungenauigkeit von 10% ergibt 5', und die Unsicherheit der wahren Flughöhe von 350 m entspricht ebenfalls 5'. Die Ungenauigkeit in Folge dieser Fehler macht es in der Praxis unmöglich, den absoluten Elevationsfehler mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. In der Zukunft muss die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert werden und die Ursache für die, je nach Messgerät, unterschiedlichen Flughöhen geklärt werden.

Kapitel 6

Offene Fragen und Ausblick

Das Fernerkundungsexperiment MIPAS-STR erfasst Emissionsspektren der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Es bildet einen Teil der Nutzlast auf dem Stratosphärenflugzeug M55-Geophysica. Aufgrund der Auswirkungen einer schlecht stabilisierten Sichtlinie auf die Spektren muss der Einfluss, den die Bewegungen des Flugzeugs auf die Sichtlinie nehmen, durch einen drehbaren Scanspiegel präzise ausgeglichen werden. Dazu wurde ein auf einem Lagereferenzsystem basierendes Konzept entwickelt. Es wurde untersucht, inwieweit seine Leistungsfähigkeit anhand der gemessenen Atmosphärenspektren beurteilt werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind am Ende der betreffenden Kapitel (s. Abschnitt 3.5 und Abschnitt 5.12) zusammengefasst.

Die Stabilisierung der Elevation der Sichtlinie basiert auf drei Grundpfeilern: (1) der mathematischen Beschreibung, wie die Elevation von der Lage des Experiments, den Einbauwinkeln und der Scanspiegelstellung abhängt, (2) dem Regelkreis, der die Drehung des Scanspiegels realisiert und (3) der Messung der Lage des Experiments mit dem Navigationssystem AHRS. Zusätzlich müssen auch die Einbauwinkel und der Scanwinkel vermessen werden.

Bei der Bestimmung der Einbauwinkel wird der Fehler der Lagewinkelmessung auf die Einbauwinkel und dadurch auf die resultierende Elevation übertragen. Die Messung jedes einzelnen Wertepaares war sehr zeitaufwendig, so dass der Fehler nicht durch sehr viele Messungen ausreichend verkleinert werden konnte. Derzeit werden Teile des Interferometers neu ausgelegt. Die Strahlung des LMI-Lasers wird über einen Strahlteiler in das Teleskop und nach außen geleitet. Dieser Laserstrahl soll in Zukunft die Sichtlinie definieren. Ihre Richtung kann mit dem Theodoliten schneller und genauer gemessen werden als mit der bisherigen Methode, so dass die Statistik verbessert werden kann.

Der Vergleich von Rollwinkeldifferenz zwischen AHRS und GNS und Elevationsabstand für den Flug am 23.9.1999 zeigte auf, dass die Nickwinkelmessung des AHRS die spezifizierte Genauigkeit nicht einhält. Es bleibt zu untersuchen, ob das nur in dem betrachteten Flug der Fall ist und ob die Schwankungen durch die "selective availability" des GPS hervorgerufen werden. Dazu soll der Elevationsabstand auch aus den Spektren der restlichen Flüge in Ushuaia bestimmt werden.

Die Genauigkeit, mit der der Elevationsabstand aus den Spektren bestimmt werden kann, wird neben den Fehlern in den verwendeten Zusatzdaten (Temperatur- und Druckfelder von ECMWF, Liniendaten von HITRAN) auch von MIPAS-internen Fehlern begrenzt, die erheblich zum Rauschen in den Interferogrammen beitragen. Das Rauschen in den

Interferogrammen bleibt nach der Fouriertransformation und anschließenden Kalibrierung in den Spektren erhalten und trägt zum Fehler des Elevationsabstands bei.

Durch die im Flug starken Vibrationen des Instruments entstehen großen Geschwindigkeitsschwankungen des Pendelvorschubs. Dadurch wird die Genauigkeit der Interferogrammabtastung und -interpolation reduziert. Die Hauptstörfrequenzen sind die in Grenzen variablen Drehzahlen der Turbinen. Nach der APE-GAIA-Kampagne wurden große Anstrengungen unternommen, die Eigenmoden des MIPAS-Optikmoduls durch Modifikation der Rahmenstruktur aus dem Bereich der Turbinendrehzahlen heraus zu verschieben. In zukünftigen Messkampagnen sollten die Interferogramme daher mit größerer Genauigkeit abgetastet werden.

Ein weiteres Problem stellt das Rauschen in den Interferogrammen dar, das im Flug deutlich höher ist als am Boden und im Labor. Es kann nicht durch Abtastfehler erklärt werden und ist Gegenstand gegenwärtiger Untersuchungen.

Die Strahldichte der Linien in den von MIPAS-STR gemessenen Spektren ist eindeutig zu groß, wodurch die Bestimmung des Elevationsabstands komplizierter und ungenauer wird. Es gibt starke Indizien dafür, dass der zusätzliche Beitrag durch Strahlung aus der gesamten Atmosphäre hervorgerufen wird, die durch Streuzentren auf dem Scanspiegel in Richtung der optischen Achse gestreut wird. Die Linien in der Strahldichtedifferenz sind schmal, entsprechend einer Druckverbreiterung in der Stratosphäre. Die Bewölkung am 23.9.1999 bedeckte das Messgebiet vollständig, so dass das Fehlen eines troposphärischen Beitrags plausibel ist. Mit einem Flug ohne Bewölkung, z.B. dem ersten Teil des Transferfluges, kann die Streulichtannahme weiter untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Beer, Reinhard, Remote Sensing by Fourier Transform Spectroscopy, Chemical Analysis Vol. 120, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- Blom, Cornelis E., T. Gulde, C. Keim, W. Kimmig, C. Piesch, C. Sartorius, H. Fischer, MIPAS-STR: Entwicklung eines Instrumentes für Stratosphärenflugzeuge, Poster, Statusseminar des Ozonforschungsprogramms, Juni 1998.
- Brault, James W., New approach to high-precision Fourier transform spectrometer design, Applied Optics, Vol. 35, No. 16, 2891-2896, 1996.
- Broxmeyer, Charles, Inertial Navigation Systems, McGraw-Hill, New York, 1964.
- Burkert, P., F. Fergg and H. Fischer, A Compact High Resolution Michelson interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS), IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-21, No. 3, 345-349, 1983.
- Delbouille, Luc, Source Noise: Origins, Effects and Remedies, Proceedings of the 7th International Workshop on Atmospheric Science from Space Using Fourier Transform Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May 1997.
- Carli, Bruno, P.A.R. Ade, U. Cortesi, P. Dickinson, M. Epifani, F.C. Gannaway, A. Gignoli, C. Keim, C. Lee, C. Meny, J. Leotin, F. Mencaraglia, A.G. Murray, I.G. Nolt, M. Ridolfi, SAFIRE-A: Spectroscopy of the Atmosphere Using Far-Infrared Emission/Airborne, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 16, No. 10, 1313-1328, 1999.
- Carli, Bruno, 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, 21-24, 2000.
- Clarmann, Thomas v. and G. Echle, Selection of Optimized Microwindows for Atmospheric Spectroscopy, Appl. Opt. Vol. 37, No. 33, 7661-7669, 1998.
- Clarmann, Thomas v., RAT: A computational tool for retrieval of atmospheric trace gas profiles from infrared spectra, KfK-Rep. 5423, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1994.
- Cortesi, Ugo, G. Bianchini, B. Carli, A. Gignoli, L. Palchetti, B. Dinelli, C. Lee, P. Ade, C.E. Blom, M. Höpfner, K. Lessenich, Remote-sensing measurements of inorganic chlorine species during the APE-GAIA Campaign, poster ST091, EGS XXVI General Assembly, Nice, France, March 2001.
- Fiocco, Giorgio, P.G. Calisse, M. Cacciani, S. Casadio, G. Pace, D. Fua, ABLE: Development of an Airborne Lidar, J. Atmos. & Ocean. Tech., Vol. 16, 1337-1344, 1999.

- Fischer, Herbert, Remote Sensing of Atmospheric Trace Constituents using Fourier Transform Spectroscopy, Berichte der Bunsen-Gesellschaft f. phys. Chemie, Vol. 96, No. 3, 306-314. 1992.
- Funke, Bernd, Ein Modell für die Zustandsverteilung von NO bei nichtvorhandenem lokalem thermodynamischem Gleichgewicht und dessen Nutzung zur Ableitung atmosphärischer Parameter aus 5.3 μm Emissionsspektren, Dissertation im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe FZKA 6413, 2000.
- Glatthor, Norbert, M. Höpfner, G.P. Stiller, T. v. Clarmann, A. Dudhia, G. Echle, B. Funke, and F. Hase, Intercomparison of the KOPRA and the RFM radiative transfer codes, Satellite Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere IV, J.E. Russell, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 3867, 348-364, 1999.
- Höpfner, Michael, C.E. Blom, G. Echle, N. Glatthor, F. Hase, G.P. Stiller, Retrieval simulations for MIPAS-STR measurements, IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, Proceedings of International Radiation Symposium 2000, St. Petersburg, Russia, 24-29 July 2000. William L. Smith and Yuriy M. Timofeyev, Editors. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 1121-1124, 2001.
- Höpfner, Michael, C.E. Blom, T. v. Clarmann, H. Fischer, N. Glatthor, T. Gulde, F. Hase, C. Keim, W. Kimmig, K. Lessenich, C. Piesch, C. Sartorius, G.P. Stiller, MIPAS-STR data analysis of APE-GAIA measurements, IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, Proceedings of International Radiation Symposium 2000, St. Petersburg, Russia, 24-29 July 2000. William L. Smith and Yuriy M. Timofeyev, Editors. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 1136-1139, 2001.
- Höpfner, Michael, private Mitteilung, 2002.
- Keim, Corneli, Sichtlinienstabilisierung des MIPAS-B2 Experiments, Diplomarbeit im Fach Physik, Institut für experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe und Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1995.
- Kimmig, Wolfgang, Das Abtastverfahren der Interferogramme des flugzeuggetragenen Fourierspektrometers MIPAS-STR, Dissertation im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe FZKA 6665, 2001.
- Kleinert, Anne, Charakterisierung des IR-Detektorsystems der MIPAS-Emissions-experimente, Diplomarbeit im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, März 1998.
- Lessenich, Katrin, Ableitung von zweidimensionalen Verteilungen atmosphärischer Parameter aus MIPAS-STR-Spektren der APE-GAIA-Messkampagne, Diplomarbeit im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, Dezember 2000.

- Maucher, Guido, Das Sternreferenzsystem von MIPAS-B2: Sichtlinien-Bestimmung für ein ballongetragenes Spektrometer zur Fernerkundung atmosphärischer Spurengase, Dissertation im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe FZKA 6227, 1999.
- MDB, High-altitude M55 Geophysica aircraft: Investigators Handbook, Myasishchev Design Bureau, Russia, 1996.
- Phillips, D., A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind, *J. Ass. Comput. Math.*, Vol. 9, 84-97, 1962.
- Piesch, Christof, T. Gulde, C. Sartorius, F. Friedl-Vallon, M. Seefeldner, 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, 199-208, 1996.
- Press, William H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1988.
- Riediger, Oliver, Entwicklung und Einsatz eines flugzeuggetragenen Instrumentes zur in-situ-Messung langlebiger Spurengase in der Stratosphäre, Dissertation im Fach Physik, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 2000.
- Schimpf, Birger and F. Schreier, Robust and efficient inversion of vertical sounding atmospheric high-resolution spectra by means of regularization. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, 16037-16055, 1997.
- Stefanutti, Leopoldo, A.R. MacKenzie, S. Balestri, V. Khatatov, G. Fiocco, E. Kyrö and T. Peter, Airborne Polar Experiment - Polar Ozon, Leewaves, Chemistry and Transport (APE-POLCAT): Rational, road map and summary of measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, 23941-23959, 1999.
- Stiller, Gabriele P. (Editor) with contributions from T. v. Clarmann, A. Dudhia, G. Echle, B. Funke, N. Glatthor, F. Hase, M. Höpfner, S. Kellmann, H. Kemnitzer, M. Kuntz, A. Linden, M. Linder, G. P. Stiller, S. Zorn, The Karlsruhe Optimized and Precise Radiative transfer Algorithm (KOPRA), Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe FZKA 6487, 2000.
- Tihkonov, A., On the solution of incorrectly stated problems and a method of regularisation, *Dokl. Acad. Nauk SSSR*, Vol. 151, 501, 1963.
- Tjemkes, S.A., T. Patterson, R. Rizzi, M.W. Shephard, S.A. Clough, M. Matricardi, J. Haigh, M. Höpfner, S. Payan, A. Trotsenko, N. Scott, P. Rayer, J.P. Taylor, C. Clerbaux, L.L. Strow, S. DeSouza-Machado, D. Tobin, R. Knuteson, ISSWG Line-by-line Intercomparison Experiment, EUMETSAT Technical Memorandum No. 8, EUM TM 08, 2001.
- Trieschmann, Olaf, Phasenkorrektur und Radiometrie gekühlter Fourierspektrometer: Charakterisierung des Instruments MIPAS-B2, Dissertation im Fach Physik, IMK, Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe FZKA 6411, 2000.

WWW-Adressen

ECMWF	http://www.ecmwf.com/
HITRAN	http://www.hitran.com/
NOAA	http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/

Anhang A

Interferogramm-Kontrolle

Vor der Auswertung der kalibrierten Spektren ist es wichtig, zu kontrollieren, dass alle Spektren fehlerfrei sind. Bei der Erzeugung kalibrierter Spektren aus den gemessenen Interferogrammen gibt es mehrere Stellen, an denen die verschiedenen Fehlerquellen sichtbar werden.

Eine während der APE-GAIA-Kampagne leider häufiger aufgetretene Fehlerquelle war, dass die Regelung der Vorschubgeschwindigkeit des Pendels die Störungen durch die starken Vibrationen des Flugzeugs nicht ausregeln konnte, und das Pendel kurzzeitig in die falsche Richtung lief. Weißt das Referenzinterferogramm auf dem dabei zurückgelegten Weg einen Nulldurchgang auf, so wird ein Interpolationspunkt zusätzlich erzeugt. Da dies nicht vorgesehen war, wird es bei der Interpolation nicht berücksichtigt. Auf ähnliche Weise können Spikes in der Elektronik einen Nulldurchgang des Laser-Interferogramms vortäuschen und so einen Interpolationspunkt zuviel erzeugen. Dies wurde in der geflogenen Interferometerelektronik ebenfalls nicht abgefangen. Die Gründe, warum Punkte verloren gehen, sollen hier nicht erläutert werden. Das Problem tritt auf, wenn der Vorschub des Pendels zu schnell ist. Die Grenze, ab der Punkte verloren gehen können, ist ungefähr die doppelte nominelle Vorschubgeschwindigkeit.

In der Interferometerelektronik existiert parallel zur Interferogrammabtastung eine Wegverwaltung. Zum einen kommt hier ein Quadraturverfahren zum Einsatz, und zum anderen werden Spikes erkannt. Die Wegverwaltung weiß so in jedem Fall, wo sich das Pendel befindet. Interferogramme werden so aufgenommen, dass alle den gleichen maximalen optischen Gangunterschied aufweisen. Dadurch werden im Fehlerfall zu viele bzw. auch zu wenige Punkte aufgenommen. Fehlerfreie Interferogramme haben alle die gleiche Punktezahl. Durch die Datenreduktion (mathematischer Filter) führt nicht jeder zusätzliche Punkt im ursprünglichen Interferogramm zu einem zusätzlichen Punkt im reduzierten Interferogramm. Erst wenn die Filterlänge von 22 Punkten erreicht wird, entsteht ein weiterer Punkt im reduzierten Interferogramm.

Die erste Kontrolle gilt dennoch der Punkteanzahl des reduzierten Interferogramms, da Interferogramme, die schon hier aussortiert werden, nicht weiter betrachtet werden müssen.

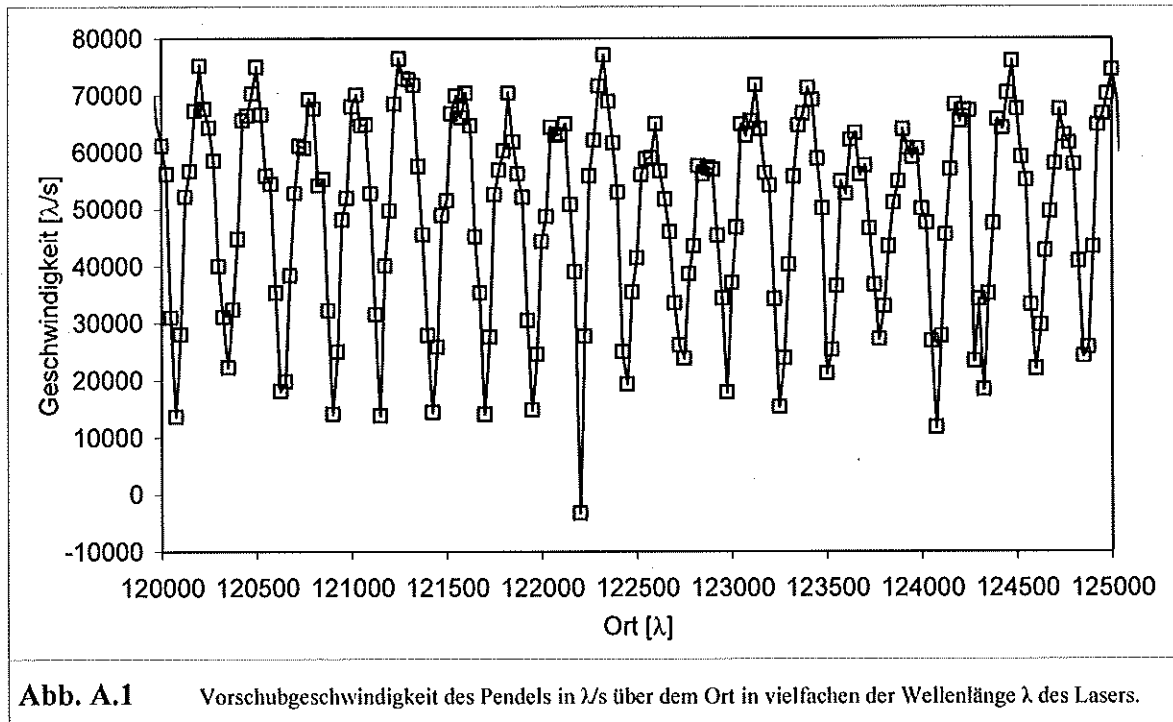


Abb. A.1 Vorschubgeschwindigkeit des Pendels in λ/s über dem Ort in vielfachen der Wellenlänge λ des Lasers.

Ein weiterer Blick gilt der Vorschubgeschwindigkeit. Diese wird als Mittelwert über 5λ ($\lambda = 633 \text{ nm}$: Wellenlänge des LMI-Lasers) gebildet, und nur jeder fünfte Mittelwert (also ein Wert alle 25λ) wird aufgezeichnet. Daraus resultiert bei einer Nominalgeschwindigkeit von $48800 \lambda/s$ eine Abtastfrequenz von ca. 2000 Hz. Die Vorschubgeschwindigkeit zeigt große Abweichungen von der Nominalgeschwindigkeit. Die dominierende Störungsfrequenz liegt ungefähr bei 150 Hz. Das ortsäquidistant aufgenommene Geschwindigkeitssignal wird Fourier-interpoliert, da sonst nicht garantiert ist, dass alle Nulldurchgänge der Geschwindigkeit sichtbar sind. Interferogramme, bei denen die interpolierte Vorschubgeschwindigkeit im Datenaufnahmebereich Nulldurchgänge aufweist, werden verworfen. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. A.1.

Interferogramme, die diese beiden Kontrollen erfolgreich durchlaufen haben, werden auf die Phasenlage einer starken Linie hin untersucht (s. Abb. A.2). Für den ersten Kanal wird der Q-Zweig der CO_2 -Bande bei 781 cm^{-1} verwendet. Die Phase ist der Winkel zwischen Imaginärteil und Realteil im komplexen Spektrum $\tan \varphi(\nu) = \frac{\text{Im}[S(\nu)]}{\text{Re}[S(\nu)]}$. Liegt der

Abtastpunkt, der $x = 0$ (x : optischer Gangunterschied) im Interferogramm zugeordnet wird, um ε gegenüber dem wirklichen ZOPD (zero optical path difference) der IR-Strahlung versetzt, so entsteht ein linearer Phasenfehler [Trieschmann 2000]. Setzt man in Gleichung (5.1) IFG($x+\varepsilon$) statt IFG(x) ein, entsteht ein zusätzlicher Faktor $e^{i2\pi\nu\varepsilon}$, der eine Drehung des Spektrums um den Winkel $\varphi(\nu) = 2\pi\nu\varepsilon$ darstellt.

Dieser lineare Phasenfehler ist eine Geräteeigenschaft, die sich durch thermischen Verzug langsam ändern kann. Werden vor ZOPD Punkte zusätzlich erzeugt, so ist der Versatz nicht ε sondern $\varepsilon+n\lambda$ ($n = 1,2,\dots$), die Phasenlage des Spektrums ändert sich sprunghaft und ist von der langsamen Änderung durch Verzug leicht unterscheidbar. Bei einem zusätzlichen Punkt ergibt sich ein Phasensprung $\Delta\varphi(\nu) = 2\pi\nu\lambda$, bei $\nu = 781 \text{ cm}^{-1}$ wird $\Delta\varphi(\nu) = 0,3 \text{ rad}$.

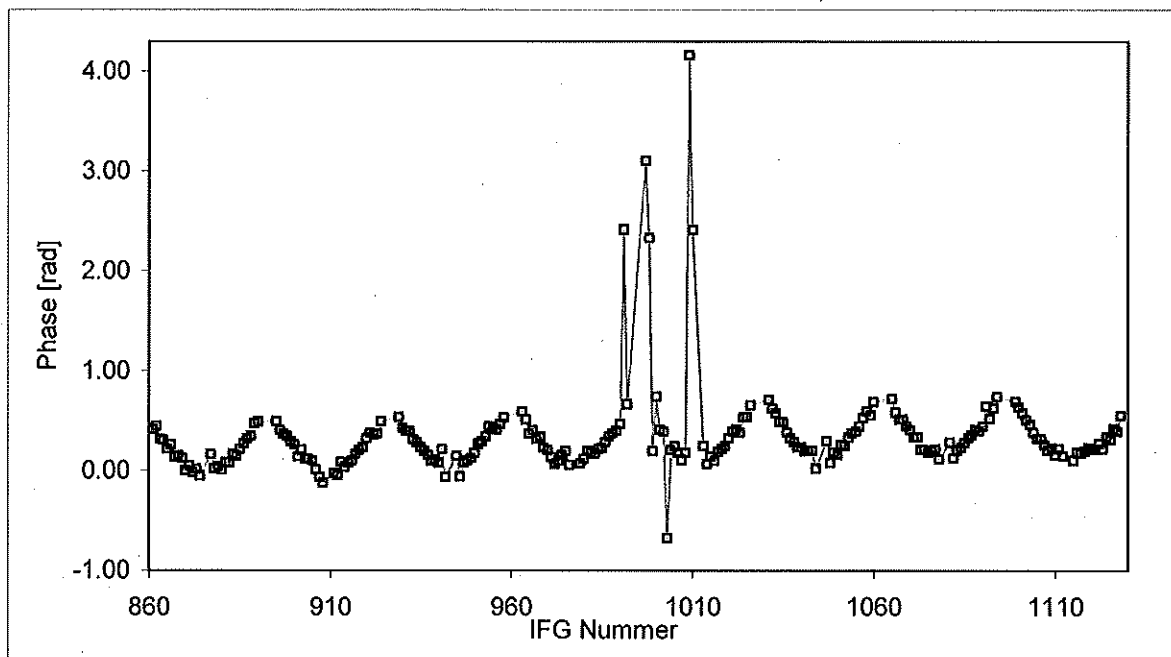


Abb. A.2 Phase des CO₂ Q-Zweigs bei 781 cm⁻¹.
Die wellenartige Struktur zeigt die Abhängigkeit der Phase vom Elevationswinkel. Im Bereich um IFG 1000 sind Phasensprünge durch Abtastfehler ersichtlich.

Ein weiterer Kontrollblick gilt dem Wellenzahlversatz. Beim Retrieval der Spurengase werden simulierte Spektren mit den gemessenen Spektren in bestmögliche Übereinstimmung gebracht. Wurde bei der Vermessung der Liniendaten ein kleiner Wellenzahlfehler gemacht, so können die Spektren durch Variation des Spurengasprofils nicht zur Deckung gebracht werden. Deshalb wird beim Retrieval grundsätzlich der Wellenzahlversatz mitbestimmt (s. Abb. A.3). Dies geschieht für jedes Spektrum getrennt. Zusätzliche und übersprungene Punkte im unreduzierten Interferogramm erzeugen ebenfalls einen Wellenzahlversatz. Durch Simulation kann gezeigt werden, dass der Betrag des Versatzes außer von der Anzahl der zusätzlichen/verlorenen Punkte auch stark von deren Position im Interferogramm abhängt. Die Wellenzahlverschiebung der einzelnen Spektren in Abb. A.3 ist symmetrisch zu einem Wert, der dem spektroskopischen Versatz entspricht, da bei 100% Geschwindigkeitschwankung vergleichbar oft die Nulllinie wie die 200%-Marke überschritten wird.

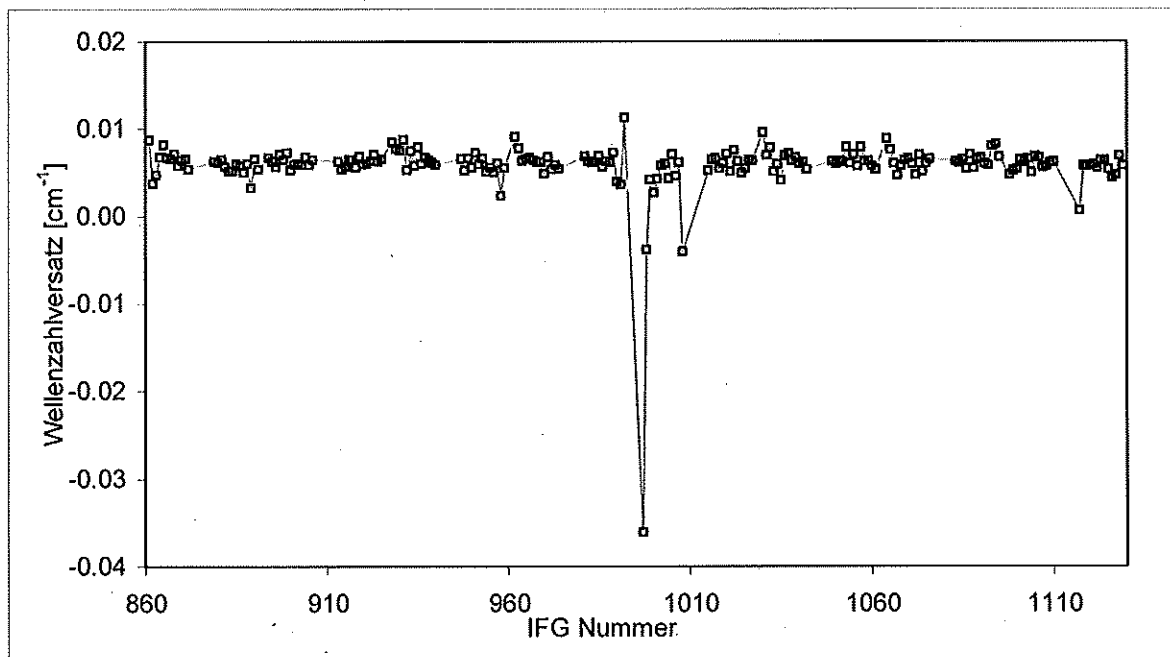


Abb. A.3. Wellenzahlversatz der Laserbande (936..960) cm^{-1} .
 Wie bei der Phase sind Störungen um IFG 1000 zu erkennen. Es ist aber deutlich, dass die betroffenen IFG nicht die selben sind.

Anhang B

Nichtlinearität des Detektors, Abschätzung des Fehlerbeitrags

Das idealisierte Modell eines Halbleiter-Detektors geht davon aus, dass die Responsivität, das Verhältnis zwischen gemessener Spannung und einfallendem Photonenstrom, konstant ist. Dazu muss der Quantenwirkungsgrad, das Verhältnis von einfallenden Photonen zu ins Leitungsband gehobenen Ladungsträgern, unabhängig von der Anzahl und Energie der Photonen und der Umgebungsbedingung sein. Außerdem müssen alle freien Ladungsträger durch Photonenabsorption erzeugt werden, nicht durch z.B. thermische Stöße. Des weiteren müssen alle freien Ladungsträger nachweisbar bleiben, es darf keine Rekombinationsverluste geben.

Der reale Detektor zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Responsivität von der Detektortemperatur und dem einfallenden Photonenstrom. Für die Detektoren des MIPAS-B2 wurde dies ausführlich nachgewiesen [Kleinert 1998].

Aus nicht datenreduzierten Schwarzkörperinterferogrammen kann die Abhängigkeit der gemessenen Spannung vom einfallenden Photonenstrom bestimmen werden. In Abb. B.1 ist diese Nichtlinearitätskurve für den Flug am 23.9.1999 für den ersten Kanal dargestellt. Man kann aus dieser Kurve den Fehler abschätzen, der dadurch entsteht, dass bei der Zwei-Punkt-Kalibrierung (Abschnitt 5.2) von einem linearen Zusammenhang ausgegangen wird. In Abb. B.2 ist für zwei Sequenzen, eine zu Beginn und eine am Ende des Fluges, der Fehler abhängig von der Detektorausgangsspannung aufgetragen. Bei der Zwei-Punkt-Kalibrierung werden die Roh-Spektren mit einer Kalibrierungskurve multipliziert, deren Steigung von der Detektor-Responsivität des Schwarzkörperspektrums dominiert wird. Deshalb verschwindet der Kalibrierungsfehler der Schwarzkörperspektren. Je kleiner jedoch die Strahldichte wird, desto größer wird der Fehler. Am größten ist er für die Weltraumspektren.

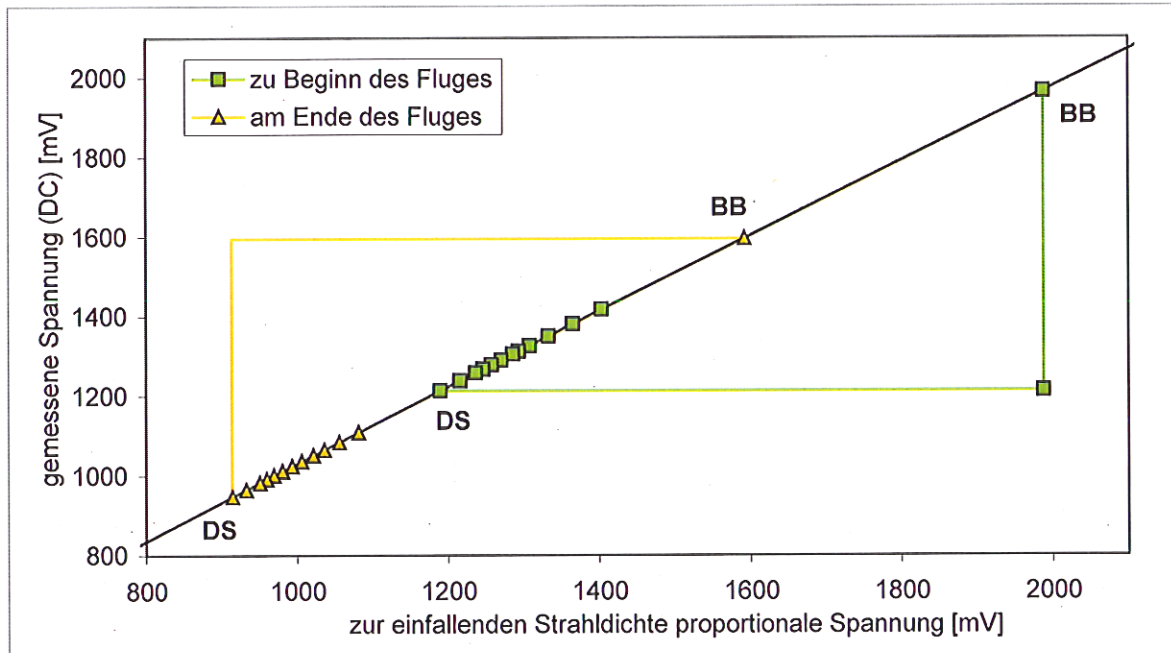


Abb. B.1

Nichtlinearität des Detektors von Kanal 1 im Flug am 23.9.1999.

Zusätzlich zur Nichtlinearitätskurve sind gemessenen DC-Werte markiert, für die Interferogramme aus zwei Sequenzen, eine zu Beginn und eine am Ende des Fluges. Die starke Abkühlung des Instruments führt zu einer Abnahme der am Detektor ankommenden Strahldichte.

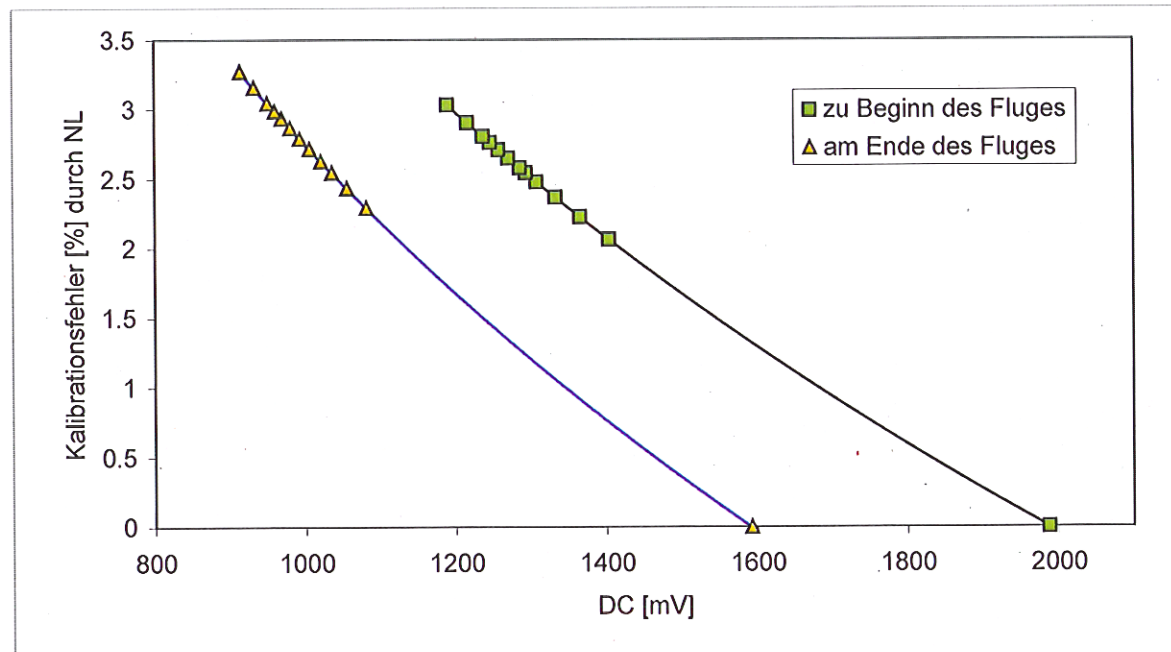


Abb. B.2

Kalibrierungsfehler durch Nichtlinearität.

Wird der nichtlineare Verlauf der Responsivität des Detektors nicht bei der Kalibrierung der Spektren berücksichtigt, entsteht ein Fehler in der Strahldichte der Spektren. Der Fehler entspricht einer Multiplikation mit einer Konstanten.

Dargestellt sind die relativen Fehler in der kalibrierten Strahldichte, für die beiden Sequenzen in Abb. B.1. Da diese über den Flug die größte bzw. kleinste Strahldichte des Gleichlichts aufweisen, liegen die Fehler für alle Sequenzen des Fluges zwischen diesen beiden Begrenzungen.

Anhang C

Gewichtete Mittelung der Einzel-Elevationsabstände

Aus zwei oder mehr Werten mit unterschiedlichem statistischem Fehler kann man einen gewichteten Mittelwert so bestimmen, dass der statistische Fehler des Mittelwerts minimal wird. Dazu wird jeder Wert mit seiner normierten inversen Varianz gewichtet. Die Normierung ist so, dass die Summe der Gewichte eins ergibt.

Seien die einzelnen Elevationsabstände δ_i , mit der Standardabweichung σ_i .

Dann berechnet sich der mittlere Elevationsabstand $\bar{\delta}$ und die dazugehörige Standardabweichung $\sigma_{\bar{\delta}}$ zu: $\bar{\delta} = (\sum_i \delta_i / \sigma_i^2) / (\sum_i 1 / \sigma_i^2)$ und $\sigma_{\bar{\delta}}^2 = 1 / (\sum_i 1 / \sigma_i^2)$

Bestimmt man aus einem einzelnen Spektrum den Elevationsabstand, so weicht dieser vor allem für positive Elevationswinkel stark von Null ab (s. Abb. 5.16). Der statistische Fehler, der durch das Rauschen im Spektrum entsteht, berechnet sich als:

$$\sigma_{\eta} = \text{rms}(S) : \left. \frac{\partial S(\eta, \dots)}{\partial \eta} \right|_{\eta_0}, \quad \begin{array}{l} \text{mit } S(\eta, \dots) = \text{Strahldichte in Abhängigkeit vom Elevationswinkel} \\ \text{rms}(S) = \text{Rauschen im Spektrum} = \text{rms des Residuums} \end{array}$$

Ist die Strahldichte stark vom Elevationswinkel abhängig, so ist es nicht egal, ob die Ableitung an der Stelle der nominellen Elevation, oder an der Stelle der bestimmten Elevation berechnet wird. Gerade für positive Elevationswinkel, für die die Elevation durch die Streulichtproblematik viel zu klein bestimmt wird, wird die Ableitung der Strahldichte nach dem Elevationswinkel an der Stelle der bestimmten Elevation um viele Größenordnungen größer, als an der Stelle der nominellen Elevation. Bildet man die Standardabweichung mit der Ableitung an der Stelle der bestimmten Elevation, so verschwindet sie fast.

Würde man gleichzeitig aus allen Spektren der Sequenz den Elevationsabstand bestimmen, so würden die Spektren zu negativen Elevationswinkeln mit ihrer stärkeren Elevationswinkelabhängigkeit der Strahldichte dafür sorgen, dass der Elevationsabstand nicht zu sehr von Null abweicht (s. Abb. 5.10). Deshalb weichen nun die Standardabweichungen des einzelnen Elevationsabstandes nicht mehr sehr voneinander ab, wenn sie mit der nominellen oder der um den Elevationsabstand korrigierte Elevation berechnet werden.

Wird aus den aus einzelnen Spektren bestimmten Elevationsabständen ein gemeinsamer Mittelwert gebildet, so muss die zur Gewichtung verwendete Standardabweichung mit der Ableitung der Strahldichte *an der Stelle der nominellen Elevation* gebildet werden.

Dies wurde bei den Berechnungen in Abschnitt 5.9 berücksichtigt.

Anhang D

Ergebnis der Temperaturbestimmung

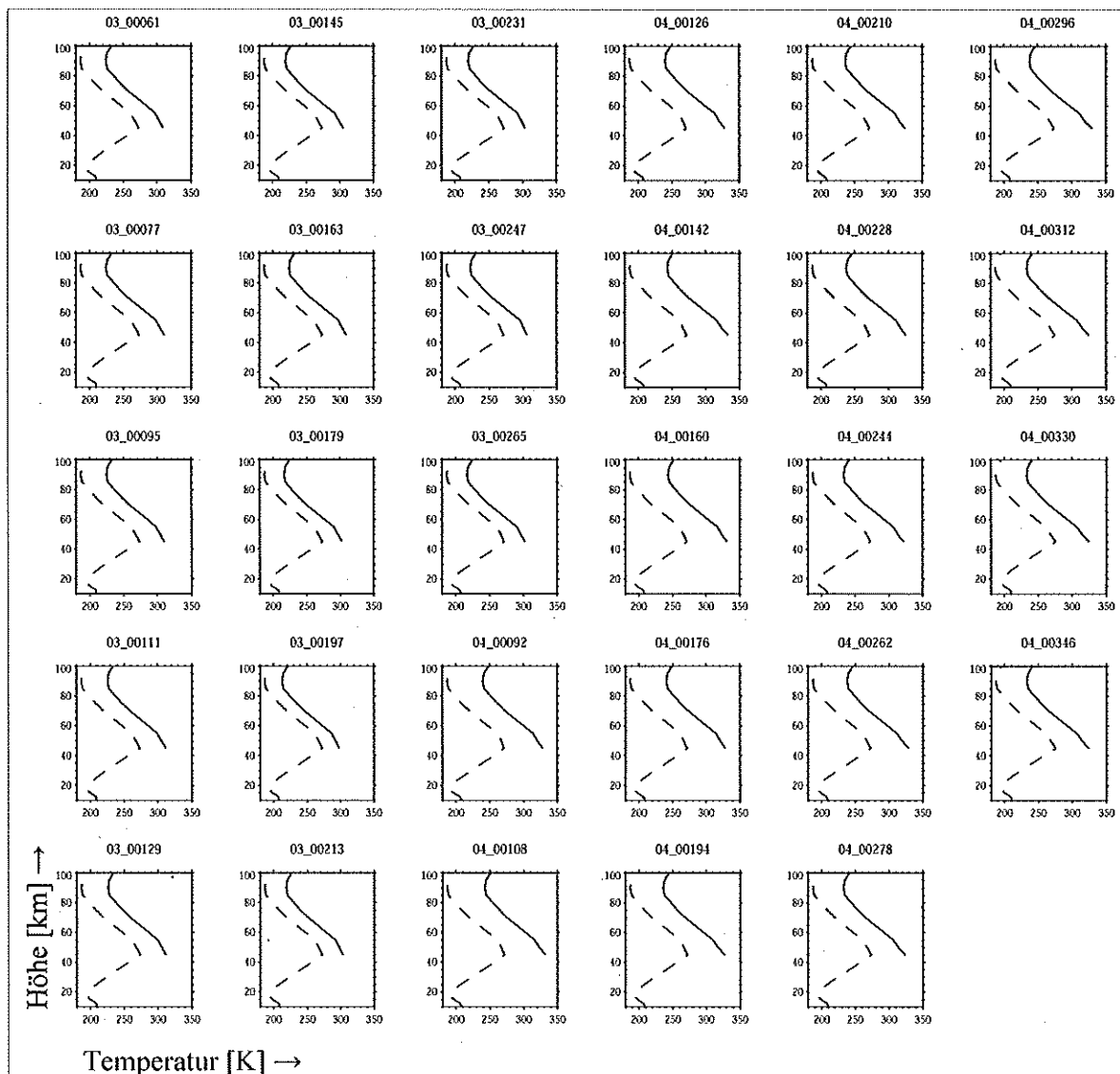


Abb. D.1 Temperatur oberhalb von 45km mit KOPRA/KOPRAFIT gefittet.

Das Ergebnis des Temperaturfits ist hier für alle Sequenzen dargestellt (vergleiche Abb. 5.18). Durchgezogen das Fitergebnis, gestrichelt zum Vergleich das aus ECMWF und dem Standardprofil für mittlere Breiten zusammengesetzte Start- und Regularisierungs-Profil.

Anhang E

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Das russische Höhenforschungsflugzeug Geophysica.	3
Abb. 2.2	Horizontsondierung unter verschiedenen Winkeln.	5
Abb. 2.3	Messflüge, die während der APE-GAIA Kampagne 1999 durchgeführt wurden.	5
Abb. 2.4	Ein O ₃ -Schnitt am 23.9.1999, der aus den Daten von MIPAS-STR bestimmt wurde [Lessenich 2000].	6
Abb. 2.5	Ein O ₃ -Schnitt am 23.9.1999, der aus den Daten von SAFIRE-A bestimmt wurde [Cortesi et al. 2001].	6
Abb. 2.6	Der Standard-Beobachtungsmodus des MIPAS-STR.	8
Abb. 2.7	Schematische Darstellung des Doppelpendelinterferometers, das bei MIPAS-STR verwendet wird	10
Abb. 2.8	3D-Ansicht des gekühlten Bereichs des Optikmoduls des MIPAS-STR.	11
Abb. 2.9	Lineare Darstellung des optischen Strahlengangs des MIPAS-STR.	12
Abb. 2.10	Die Struktur des MIPAS-STR.	13
Abb. 3.1	Vergleich der Rollwinkel, gemessen von GNS und AHRS, am 7.1.1997 in Rovaniemi	20
Abb. 3.2	Kurzskaliger Vergleich des Rollwinkels zwischen GNS und AHRS	22
Abb. 3.3	Vergleich des Rollwinkels, gemessen von GNS und AHRS, am 23.9.1999 in Ushuaia	24
Abb. 3.4	Vergleich des Rollwinkels, gemessen von GNS und AHRS, am 2.10.1999 in Ushuaia	25
Abb. 3.5	Frequenzspektren der Rollwinkel, sowohl vom GNS als auch vom AHRS	26
Abb. 3.6	Frequenzspektrum des vom AHRS gemessenen Rollwinkels der Geophysica	27
Abb. 4.1	Abhängigkeit der Elevation η vom Scanwinkel ζ	35
Abb. 4.2	Winkelabhängigkeit des Drehmoments der Motoren bei maximaler Stromstärke	37
Abb. 4.3	Die Verschachtelung der beiden Scanspiegelregelkreise	38
Abb. 4.4	Die Elektronik des inneren PD-Regelkreises	39
Abb. 4.5	Sprünge im Nickwinkel des AHRS, aufgezeichnet am 23.9.1999	41
Abb. 4.6	Laufzeit des Triggerkommandos	44
Abb. 4.7	LOSE-Algorithmus: der strukturelle Aufbau	45
Abb. 4.8	Kalibrierung der Einbauwinkel	46
Abb. 4.9	Die Dauer der Datenaufnahme der einzelnen Interferogramme	47
Abb. 4.10	Differenz zwischen Ende der Datenaufnahme eines Interferogramms und Beginn der Elevationsänderung	48
Abb. 4.11	Vermessung der unteren Begrenzung der Schieberöffnung	50
Abb. 4.12	Vermessung der oberen Begrenzung der Schieberöffnung	51
Abb. 4.13	Gesamtübersicht über alle Interferogramme vom Messflug am 23.9.1999	52
Abb. 4.14	Die geometrische Flughöhe während des Messfluges am 23.9.1999	53

Abb. 4.15 Die Standardabweichung der Ist-Elevation pro IFG, während des Messfluges am 23.9.1999	54
Abb. 4.16 exemplarische Einschwingssituationen vom Messflug	56
Abb. 5.1 CO ₂ -Profil, von HAGAR innerhalb des Wirbels gemessen und verglichen mit dem Eingangsprofil für KOPRA	64
Abb. 5.2 Auswahl des zur Auswertung verwendeten Spektralbereichs (Auswertefenster).	65
Abb. 5.3 Ableitung der Strahldichte nach der Elevation in Abhängigkeit von der Elevation.	68
Abb. 5.4 Standardabweichung des aus einem Spektrum bestimmten Elevationsabstands δ .	69
Abb. 5.5 Fehler bei der Bestimmung des gemeinsamen Elevationsabstands δ aus mehreren Spektren einer Sequenz.	70
Abb. 5.6 Der gemeinsame Elevationsabstand δ , wenn der Elevationsfehler linear von der Elevation abhängig ist.	71
Abb. 5.7 Detektion von 'Wolkenspektren' an Hand des Offset in den Spektren.	72
Abb. 5.8 L-Kurven zur Bestimmung des optimalen Regularisierungsparameters.	73
Abb. 5.9 Einfluss des Regularisierungsparameters γ_T der Temperatur auf den Fehler des Elevationsabstands δ	75
Abb. 5.10 Elevationsabstand δ für ganze Sequenzen	77
Abb. 5.11 Einfluss der zeitlichen Interpolation des ECMWF-Temperaturfeldes auf den Elevationsabstand δ .	78
Abb. 5.12 Vergleich der ECMWF-Temperatur mit der am Flugzeug gemessenen Außentemperatur.	79
Abb. 5.13 geografische Zuordnung der Limbsequenzen und Flugabschnitte.	79
Abb. 5.14 Modulationseffizienz im Verlauf des Fluges am 23.9.1999.	80
Abb. 5.15 Elevationsabstand δ unter Berücksichtigung der abnehmenden Modulationseffizienz.	80
Abb. 5.16 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.	84
Abb. 5.17 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.	85
Abb. 5.18 Temperatur oberhalb von 45km mit KOPRA/KOPRAFIT gefittet.	85
Abb. 5.19 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.	86
Abb. 5.20 Abhängig des Elevationsabstands δ von der angenommenen Flughöhe.	87
Abb. 5.21 Strahldichtedifferenz zwischen NLTE und LTE	87
Abb. 5.22 Vergleich von Modell und Messung.	90
Abb. 5.23 Unterschied zwischen Modell und Messung.	90
Abb. 5.24 Abhängigkeit der Strahldichtedifferenz vom Elevationswinkel	91
Abb. 5.25 Simulation des Streulichts, verglichen mit dem Strahldichteüberschuss in den Messungen	91
Abb. 5.26 Differenzieller Elevationsabstand.	94
Abb. 5.27 Differenzieller Elevationsabstand über der Messzeit.	95
Abb. 5.28 streulichtkorrigierter Elevationsabstand δ pro Sequenz.	95
Abb. 5.29 Elevationsabstand δ für jedes Spektrum einzeln gefittet.	96
Abb. 5.30 Vergleich der Methoden.	97
Abb. 5.31 Vergleich zwischen Elevationsabstand δ und Rollwinkeldifferenz.	98
Abb. 5.32 Systematischer Fehler im Elevationsabstand δ durch eine systematisch falsche Skalierung der Strahldichte	100
Abb. 5.33 Einfluss des Temperaturprofils auf den Elevationsabstand δ	101
Abb. 5.34 Fehler im Elevationsabstand δ durch Fehler im Temperaturprofil, exemplarisch für die Sequenz 03_00179	102
Abb. 5.35 Verschiedene Einflüsse im Vergleich:	103
Abb. A.1 Vorschubgeschwindigkeit des Pendels in λ 's über dem Ort in vielfachen der Wellenlänge λ des Lasers.	114
Abb. A.2 Phase des CO ₂ Q-Zweigs bei 781 cm ⁻¹ .	115

Abb. A.3 Wellenzahlversatz der Laserbande (936..960) cm^{-1} .	116
Abb. B.1 Nichtlinearität des Detektors von Kanal 1 im Flug am 23.9.1999.	118
Abb. B.2 Kalibrierungsfehler durch Nichtlinearität.	118
Abb. D.1 Temperatur oberhalb von 45km mit KOPRA/KOPRAFIT gefittet.	120

Anhang F

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Die von MIPAS-STR und SAFIRE-A erfassbaren atmosphärischen Spurengase [Blom 1998].	4
Tabelle 3.1	Die Spezifikationen des AHRS laut Hersteller SEG	17
Tabelle 3.2	Die Spezifikationen des GNS laut Angaben im Investigators Handbook [MDB 1996]	17
Tabelle 3.3	Mittelwerte vor und nach Richtungsänderung, Flug am 7.1.1999	19
Tabelle 3.4	Mittelwerte vor und nach Richtungsänderung, Flug am 23.9.1999	23
Tabelle 4.1	realistische Bereiche für Einbau- und Lagewinkel	34
Tabelle 4.2	sich aus Tabelle 4.1 ergebende realistische Bereiche für die Parameter der Elevationsfunktion	34

Anhang G

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen und Eigennamen

a.u.	arbitrary units
ABLE	Airborne LIDAR Experiment
AC	Alternating Current, gemeint ist: Wechsellichtanteil des IFG
ADC	Analog/Digital-Wandler
AHRS	Attitude and Heading Reference System
APE-GAIA	Airborne Polar Experiment - Geophysica Aircraft In Antarctica
BB	Schwarzkörpermessung (Black Body)
BFGS	Minimierungsverfahren nach Broyden, Fletcher, Goldfarb und Shanno
CORE	Core Electronics
CPU	Central Processing Unit
Data-MUX	Data Multiplex
DC	Direct Current, gemeint ist: Gleichlichtanteil des IFG
DPI	Doppelpendelinterferometer
DS	Weltraummessung (Deep Space)
DSP	Digitaler Signal-Prozessor
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecast
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FOV	Field of View
FPGA	Field Programmable Gate Array
FT	Fourier-Transformation
FZKA	Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt
GNS	Geophysica Navigationssystem
GPS	Global Positioning System
HAGAR	High Altitude Gas Analyser
Hctl	Reglerbaustein Hctl-1100 von Hewlett-Packart
HITRAN	high-resolution transmission molecular absorption database
HK	Housekeeping
IFG	Interferogramm
IFME	Interferometer Electronics
IMK	Institut für Meteorologie und Klimaforschung im FZKA
IPE	Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik im FZKA
IR	Infrarot
KO	Koordinatensystem
KOPRA	Karlsruhe optimized and precise radiative transfer algorithm

KOPRAFIT	Inversionsprogramm zu KOPRA
LIDAR	Light Detection and Ranging
LMI	Längenmess Interferogramm
LOS	Line of Sight
LOSE	LOS Electronics
LTE	lokales thermodynamisches Gleichgewicht (local thermodynamic equilibrium)
M55	Flugzeugtyp der Geophysica
MDB	Myasishchev Design Bureau (Betreiber der Geophysica)
MIPAS	Michelson Interferometer für Passive atmosphärische Sondierung
-B2	Ballonversion Modell 2
-STR	Version für das Stratosphärenflugzeug Geophysica
NL	Nichtlinearität
NLTE	Non-LTE
PC	Personal Computer
PD-Regler	Regler mit proportionalem und differenzierendem Glied
PI-Regler	Regler mit proportionalem und integrierendem Glied
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RMS	root mean square
S/N	Signal to Noise ratio
SAFIRE	Spectroscopy of the Atmosphere using Far-InfraRed Emission
-A	-Airborne
SBS-or	SBS-or Industrial Computers GmbH & Co. KG, Augsburg (Hersteller Flugrechner)
SDE	Strahldichteinheit ($\text{nW}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{cm}^2)$)
SEG	System Entwicklungs GmbH, Riegel a.K. (Hersteller AHRS)
STMicroelectronics	STMicroelectronics GmbH, Grasbrunn b. München (Hersteller Transputer)
TC	TeleCommand
TC-MUX	TC-Multiplexer
TRACK	Prozess, der die Triggerbedingung ermittelt
UTC	Universal Time, coordinated
vmr	volume mixing ratio
ZOPD	Zero Optical Path Difference

Formelzeichen

H	Flughöhe
i	imaginäre Einheit = $\sqrt{-1}$
L	maximaler optischer Gangunterschied
t	Zeit
T	Temperatur
x	optischer Gangunterschied
α	ein Einbauwinkel
β	ein Einbauwinkel
γ	ein Einbauwinkel
γ	Regularisierungsparameter
δ	Elevationsabstand (Unterschied zwischen dem Sollwert und dem durch KOPRAFIT bestimmten Wert)

η	Elevationswinkel
Θ	Nickwinkel (Pitch), einer der Lagewinkel
Θ_0	ein Einbauwinkel
λ	Wellenlänge
ν	Wellenzahl
π	Kreiszahl
ρ	Dichte
ζ	Winkel des Scanspiegels
σ	Standardabweichung
$\sigma_{a,\text{total}}^{\text{Vol}}(\nu, l)$	Absorptionsquerschnitt
$\tau(\nu, l_{\text{obs}}, l)$	Transmissionskoeffizient
Φ	Rollwinkel, einer der Lagewinkel
Φ_0	ein Einbauwinkel
φ	Phase
Ψ	Azimutwinkel (Yaw)
Ψ_0	ein Einbauwinkel

Funktionen

$\text{FT}()$	Fouriertransformation
$\text{FT}^{-1}()$	inverse Fouriertransformation
$P(\nu, T)$	Planckfunktion
$S(\nu)$	spektrale Strahldichte

Anhang H

Tabelle der Interferogramme

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(Ist-)Elevation [Grad]	markiert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markiert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt ->Punkteditf	Geschwindigkeit geht durch Null	Wolken in der Sichtlinie	markiert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markiert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markiert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------------------------------------	--------------------------	---	---	---

144	01_00144.ch1	X								
145	01_00145.ch1		10,00							23
146	01_00146.ch1		3,00							
147	01_00147.ch1		0,99							28
148	01_00148.ch1		0,44							
149	01_00149.ch1		0,00							
150	01_00150.ch1		-0,45							
151	01_00151.ch1		-0,85							
152	01_00152.ch1		-1,22							
153	01_00153.ch1		-1,57							
154	01_00154.ch1		-1,88							
155	01_00155.ch1		-2,18							
156	01_00156.ch1		-2,44							
157	01_00157.ch1		-2,69							
158	01_00158.ch1		-2,92							
159	01_00159.ch1		-3,13							
160	01_00160.ch1	X								
161	01_00161.ch1	X								
162	01_00162.ch1		-3,13							
163	01_00163.ch1		-2,92							
164	01_00164.ch1		-2,69							
165	01_00165.ch1		-2,44							
166	01_00166.ch1		-2,18							
167	01_00167.ch1		-1,88		-1000					
168	01_00168.ch1		-1,57							
169	01_00169.ch1		-1,22							
170	01_00170.ch1		-0,85							
171	01_00171.ch1		-0,44							
172	01_00172.ch1		0,00							
173	01_00173.ch1		0,44							
174	01_00174.ch1		1,00							
175	01_00175.ch1		3,00							28
176	01_00176.ch1		10,00							
177	01_00177.ch1	X								
178	01_00178.ch1	X								
179	01_00179.ch1		10,00							
180	01_00180.ch1		3,00							
181	01_00181.ch1		0,99							29
182	01_00182.ch1		0,44							
183	01_00183.ch1		0,00							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanalt nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	--	------	--------------------------	--	--	--

304	01 00304.ch1		-1,67							30	51
305	01 00305.ch1		-1,22							31	31
306	01 00306.ch1		-0,85								
307	01 00307.ch1		-0,44								
308	01 00308.ch1		0,00								
309	01 00309.ch1		0,44								
310	01 00310.ch1		1,00								
311	01 00311.ch1		3,00								27
312	01 00312.ch1		10,00								25
313	01 00313.ch1	X									
314	01 00314.ch1	X									
315	01 00315.ch1		10,00						33	53	
316	01 00316.ch1		2,98						67	114	
317	01 00317.ch1		1,08						158	182	
318	01 00318.ch1		0,40						70	80	
319	01 00319.ch1		-0,02						128	152	
320	01 00320.ch1		-0,45						145	141	
321	01 00321.ch1		-0,78						299	273	
322	01 00322.ch1		-1,04						289	321	
323	01 00323.ch1		-1,62						214	241	
324	01 00324.ch1		-1,94						243	221	
325	01 00325.ch1		-2,06						205	305	
326	01 00326.ch1		-2,32						210	240	
327	01 00327.ch1		-2,69						74	76	
328	01 00328.ch1		-2,92								
329	01 00329.ch1		-3,13								
330	01 00330.ch1	X									
331	01 00331.ch1	X									
332	01 00332.ch1		-3,16						141	150	
333	01 00333.ch1		-2,92						16	16	
334	01 00334.ch1		-2,74						208	209	
335	01 00335.ch1		-2,49						212	211	
336	01 00336.ch1		-2,12						91	84	
337	01 00337.ch1		-1,97						74	100	
338	01 00338.ch1		-0,74	-2349	7838	X			2426	2471	
339	01 00339.ch1		-1,50		4	X			33	36	
340	01 00340.ch1		-0,81						32	63	
341	01 00341.ch1		-0,47		10	X		1	47	46	
342	01 00342.ch1		-0,01	-150	264	X		1	41	159	
343	01 00343.ch1		0,42						45	62	

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanalt nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	--	------	--------------------------	--	--	--

264	01 00264.ch1		-3,13							
265	01 00265.ch1		-2,92						84	90
266	01 00266.ch1		-2,69						114	114
267	01 00267.ch1		-2,44							
268	01 00268.ch1		-2,18							
269	01 00269.ch1		-1,88							
270	01 00270.ch1		-1,57							
271	01 00271.ch1		-1,22							
272	01 00272.ch1		-0,85							
273	01 00273.ch1		-0,44							
274	01 00274.ch1		0,00							
275	01 00275.ch1		0,44							
276	01 00276.ch1		1,00							
277	01 00277.ch1		3,00							25
278	01 00278.ch1		10,00							25
279	01 00279.ch1	X								
280	01 00280.ch1	X								
281	01 00281.ch1		10,00						110	108
282	01 00282.ch1		3,00							
283	01 00283.ch1		0,99							26
284	01 00284.ch1		0,44							
285	01 00285.ch1		0,00							21
286	01 00286.ch1		-0,44							
287	01 00287.ch1		-0,85							
288	01 00288.ch1		-1,22						125	124
289	01 00289.ch1		-1,57						114	109
290	01 00290.ch1		-1,88						78	84
291	01 00291.ch1		-2,18						117	116
292	01 00292.ch1		-2,44							
293	01 00293.ch1		-2,69							
294	01 00294.ch1		-2,92							
295	01 00295.ch1		-3,13							
296	01 00296.ch1	X								
297	01 00297.ch1	X								
298	01 00298.ch1		-3,13							22
299	01 00299.ch1		-2,92							15
300	01 00300.ch1		-2,69						55	57
301	01 00301.ch1		-2,44						89	108
302	01 00302.ch1		-2,17						118	210
303	01 00303.ch1		-1,82						143	153

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiffms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt ->Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	--	--

384	01_00384.ch1		3.00							18
385	01_00385.ch1		0.99							27
386	01_00386.ch1		0.43						93	88
387	01_00387.ch1		-0.01							
388	01_00388.ch1		-0.45						104	98
389	01_00389.ch1		-0.85							
390	01_00390.ch1		-1.23							
391	01_00391.ch1		-1.57						26	26
392	01_00392.ch1		-1.89						88	93
393	01_00393.ch1		-2.18						120	118
394	01_00394.ch1		-2.45							
395	01_00395.ch1		-2.69							
396	01_00396.ch1		-2.92						102	100
397	01_00397.ch1		-3.13							26
398	01_00398.ch1	X								
399	01_00399.ch1	X								
400	01_00400.ch1		-3.13							15
401	01_00401.ch1		-2.92							
402	01_00402.ch1		-2.69						66	76
403	01_00403.ch1		-2.45							
404	01_00404.ch1		-2.18							
405	01_00405.ch1		-1.89							
406	01_00406.ch1		-1.57							
407	01_00407.ch1		-1.23							
408	01_00408.ch1		-0.85							
409	01_00409.ch1		-0.45							
410	01_00410.ch1		-0.01							
411	01_00411.ch1		0.43							
412	01_00412.ch1		0.99							23
413	01_00413.ch1		3.00							27
414	01_00414.ch1		10.00							
415	01_00415.ch1	X								
416	01_00416.ch1	X								
417	01_00417.ch1		10.00						156	152
418	01_00418.ch1		2.99							23
419	01_00419.ch1		0.99							28
420	01_00420.ch1		0.43							
421	01_00421.ch1		-0.01							
422	01_00422.ch1		-0.45							
423	01_00423.ch1		-0.85							17

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiffms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt ->Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	--	--

344	01_00344.ch1		0.98					1	65	77
345	01_00345.ch1		2.99						31	33
346	01_00346.ch1		10.01						19	20
347	01_00347.ch1	X								
348	01_00348.ch1	X							119	136
349	01_00349.ch1		10.04							
350	01_00350.ch1		2.99							
351	01_00351.ch1		1.02						85	92
352	01_00352.ch1		0.43							
353	01_00353.ch1		0.01						56	58
354	01_00354.ch1		-0.45	-9		X				
355	01_00355.ch1		-0.86	-24	4	X				
356	01_00356.ch1		-1.24	-137	188	X				110
357	01_00357.ch1		-1.58	-95	184	X				85
358	01_00358.ch1		-1.89	-298	534	X				158
359	01_00359.ch1		-2.20	-1730	6220	X			240	331
360	01_00360.ch1		-2.48	-1944	6460	X			244	314
361	01_00361.ch1		-2.70	-566	1942	X				169
362	01_00362.ch1		-2.93	-337	364	X				123
363	01_00363.ch1		-3.14	-320	658	X		1		14296
364	01_00364.ch1	X			440	X				
365	01_00365.ch1	X			246	X				
366	01_00366.ch1		-3.14	-23	62	X				17
367	01_00367.ch1		-2.93	-81	52	X				57
368	01_00368.ch1		-2.70	-11	2	X			128	122
369	01_00369.ch1		-2.45		18	X			59	65
370	01_00370.ch1		-2.18							
371	01_00371.ch1		-1.89							
372	01_00372.ch1		-1.57						68	73
373	01_00373.ch1		-1.23							
374	01_00374.ch1		-0.85							
375	01_00375.ch1		-0.45							
376	01_00376.ch1		-0.01							
377	01_00377.ch1		0.43							
378	01_00378.ch1		0.99							
379	01_00379.ch1		2.99							20
380	01_00380.ch1		10.01							
381	01_00381.ch1	X								
382	01_00382.ch1	X								
383	01_00383.ch1		10.00							16

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	--	------	--------------------------	--	--	--

464	01 00464.ch1		-2,92							
465	01 00465.ch1		-3,13							
466	01 00466.ch1	X								
467	01 00467.ch1	X								19
468	01 00468.ch1		-3,13							
469	01 00469.ch1		-2,92							
470	01 00470.ch1		-2,69			X				
471	01 00471.ch1		-2,45							
472	01 00472.ch1		-2,18							
473	01 00473.ch1		-1,89							
474	01 00474.ch1		-1,57						50	62
475	01 00475.ch1		-1,23							
476	01 00476.ch1		-0,85							
477	01 00477.ch1		-0,45							
478	01 00478.ch1		-0,01						71	74
479	01 00479.ch1		0,43							
480	01 00480.ch1		0,99							
481	01 00481.ch1		3,00							27
482	01 00482.ch1		10,00							
483	01 00483.ch1	X								
484	01 00484.ch1	X								
485	01 00485.ch1		10,00							33
486	01 00486.ch1		3,00							25
487	01 00487.ch1		0,99							25
488	01 00488.ch1		0,43							
489	01 00489.ch1		-0,01							
490	01 00490.ch1		-0,45							
491	01 00491.ch1		-0,85							
492	01 00492.ch1		-1,22							
493	01 00493.ch1		-1,57							
494	01 00494.ch1		-1,89							
495	01 00495.ch1		-2,18							
496	01 00496.ch1		-2,45							
497	01 00497.ch1		-2,69							
498	01 00498.ch1		-2,92							39
499	01 00499.ch1		-3,13							
500	01 00500.ch1	X								
501	01 00501.ch1	X								
502	01 00502.ch1		-3,13							18
503	01 00503.ch1		-2,92						26	43

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	--	------	--------------------------	--	--	--

424	01 00424.ch1		-1,23							
425	01 00425.ch1		-1,57							
426	01 00426.ch1		-1,89							
427	01 00427.ch1		-2,18							
428	01 00428.ch1		-2,45							
429	01 00429.ch1		-2,69							
430	01 00430.ch1		-2,92							
431	01 00431.ch1		-3,13							
432	01 00432.ch1	X								
433	01 00433.ch1	X								
434	01 00434.ch1		-3,13							
435	01 00435.ch1		-2,92						102	98
436	01 00436.ch1		-2,70							
437	01 00437.ch1		-2,45						89	86
438	01 00438.ch1		-2,18							
439	01 00439.ch1		-1,89						114	108
440	01 00440.ch1		-1,57							
441	01 00441.ch1		-1,23							
442	01 00442.ch1		-0,85							
443	01 00443.ch1		-0,45							
444	01 00444.ch1		-0,01						125	126
445	01 00445.ch1		0,43							
446	01 00446.ch1		0,99		24	X				
447	01 00447.ch1		3,00							25
448	01 00448.ch1		10,00							23
449	01 00449.ch1	X								
450	01 00450.ch1	X								
451	01 00451.ch1		10,00							30
452	01 00452.ch1		2,99						16	21
453	01 00453.ch1		0,99						78	84
454	01 00454.ch1		0,44				1			
455	01 00455.ch1		-0,01							
456	01 00456.ch1		-0,45							
457	01 00457.ch1		-0,85							
458	01 00458.ch1		-1,23							
459	01 00459.ch1		-1,57						71	77
460	01 00460.ch1		-1,89							
461	01 00461.ch1		-2,18							
462	01 00462.ch1		-2,45							
463	01 00463.ch1		-2,69							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist- Elevation [Grad]	markert, weil zu fröh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punkteditf	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

544	01_00544.ch1		-0,85							
545	01_00545.ch1		-0,44							
546	01_00546.ch1		0,00							
547	01_00547.ch1		0,44							
548	01_00548.ch1		0,99							16
549	01_00549.ch1		3,00							17
550	01_00550.ch1		10,00							
551	01_00551.ch1	X								
552	01_00552.ch1	X								
553	01_00553.ch1		10,01						41	49
554	01_00554.ch1		2,99							17
555	01_00555.ch1		0,99							25
556	01_00556.ch1		0,43							
557	01_00557.ch1		-0,01							
558	01_00558.ch1		-0,45							
559	01_00559.ch1		-0,85							
560	01_00560.ch1		-1,22							
561	01_00561.ch1		-1,57							
562	01_00562.ch1		-1,88							
563	01_00563.ch1		-2,18							
564	01_00564.ch1		-2,43				1		63	71
565	01_00565.ch1		-2,70				1		52	52
566	01_00566.ch1		-2,92							
567	01_00567.ch1		-3,13							
568	01_00568.ch1	X								
569	01_00569.ch1	X								
570	01_00570.ch1		-3,13							
571	01_00571.ch1		-2,92							
572	01_00572.ch1		-2,69							
573	01_00573.ch1		-2,44							28
574	01_00574.ch1		-2,18							
575	01_00575.ch1		-1,89							24
576	01_00576.ch1		-1,57							
577	01_00577.ch1		-1,22							
578	01_00578.ch1		-0,85							
579	01_00579.ch1		-0,45							33
580	01_00580.ch1		0,00							
581	01_00581.ch1		0,43						37	51
582	01_00582.ch1		1,00							
583	01_00583.ch1		3,00							25

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist- Elevation [Grad]	markert, weil zu fröh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punkteditf	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

504	01_00504.ch1		-2,69							
505	01_00505.ch1		-2,45							
506	01_00506.ch1		-2,18							
507	01_00507.ch1		-1,88							
508	01_00508.ch1		-1,57						30	51
509	01_00509.ch1		-1,22							
510	01_00510.ch1		-0,85							
511	01_00511.ch1		-0,45							
512	01_00512.ch1		-0,01							
513	01_00513.ch1		0,43							
514	01_00514.ch1		0,99							
515	01_00515.ch1		3,00							22
516	01_00516.ch1		10,00							18
517	01_00517.ch1	X								
518	01_00518.ch1	X								
519	01_00519.ch1		10,00							38
520	01_00520.ch1		2,99							27
521	01_00521.ch1		0,99							20
522	01_00522.ch1		0,43						52	56
523	01_00523.ch1		-0,01							
524	01_00524.ch1		-0,45							
525	01_00525.ch1		-0,85							
526	01_00526.ch1		-1,22							
527	01_00527.ch1		-1,57							
528	01_00528.ch1		-1,88							
529	01_00529.ch1		-2,18							
530	01_00530.ch1		-2,45							
531	01_00531.ch1		-2,69							
532	01_00532.ch1		-2,92						71	76
533	01_00533.ch1		-3,13							
534	01_00534.ch1	X								
535	01_00535.ch1	X								
536	01_00536.ch1		-3,13							17
537	01_00537.ch1		-2,92				1		34	32
538	01_00538.ch1		-2,69							
539	01_00539.ch1		-2,44						34	55
540	01_00540.ch1		-2,18							
541	01_00541.ch1		-1,88							
542	01_00542.ch1		-1,57							
543	01_00543.ch1		-1,22							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

624	01_00624.ch1		0.44							
625	01_00625.ch1		-0.01							
626	01_00626.ch1		-0.45							
627	01_00627.ch1		-0.85							
628	01_00628.ch1		-1.22							
629	01_00629.ch1		-1.57							
630	01_00630.ch1		-1.88							
631	01_00631.ch1		-2.18							
632	01_00632.ch1		-2.44							
633	01_00633.ch1		-2.69							
634	01_00634.ch1		-2.92							
635	01_00635.ch1		-3.13							
636	01_00636.ch1	X								
637	01_00637.ch1	X								17
638	01_00638.ch1		-3.13							
639	01_00639.ch1		-2.92							
640	01_00640.ch1		-2.69							21
641	01_00641.ch1		-2.44							
642	01_00642.ch1		-2.18							
643	01_00643.ch1		-1.88							
644	01_00644.ch1		-1.57							
645	01_00645.ch1		-1.22							
646	01_00646.ch1		-0.85							
647	01_00647.ch1		-0.44							
648	01_00648.ch1		-0.01							
649	01_00649.ch1		0.44							
650	01_00650.ch1		1.00							23
651	01_00651.ch1		3.00							21
652	01_00652.ch1		10.00							
653	01_00653.ch1	X								
654	01_00654.ch1	X								
655	01_00655.ch1		10.00							17
656	01_00656.ch1		3.00							17
657	01_00657.ch1		0.99							25
658	01_00658.ch1		0.43							35
659	01_00659.ch1		-0.01							
660	01_00660.ch1		-0.45							
661	01_00661.ch1		-0.85							
662	01_00662.ch1		-1.22							
663	01_00663.ch1		-1.57							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

584	01_00584.ch1		10.00							20
585	01_00585.ch1	X								
586	01_00586.ch1	X								
587	01_00587.ch1		10.00							31
588	01_00588.ch1		3.00							17
589	01_00589.ch1		0.99							23
590	01_00590.ch1		0.43							
591	01_00591.ch1		0.00							
592	01_00592.ch1		-0.45							
593	01_00593.ch1		-0.85		-1000					
594	01_00594.ch1		-1.22							
595	01_00595.ch1		-1.57							
596	01_00596.ch1		-1.88							
597	01_00597.ch1		-2.18							
598	01_00598.ch1		-2.44							
599	01_00599.ch1		-2.69							
600	01_00600.ch1		-2.92							
601	01_00601.ch1		-3.13							
602	01_00602.ch1	X								
603	01_00603.ch1	X								
604	01_00604.ch1		-3.13							
605	01_00605.ch1		-2.92							
606	01_00606.ch1		-2.69							
607	01_00607.ch1		-2.44							
608	01_00608.ch1		-2.18							
609	01_00609.ch1		-1.88							
610	01_00610.ch1		-1.57							
611	01_00611.ch1		-1.22							
612	01_00612.ch1		-0.85							
613	01_00613.ch1		-0.44							
614	01_00614.ch1		0.00							
615	01_00615.ch1		0.44							
616	01_00616.ch1		1.00							24
617	01_00617.ch1		3.00							
618	01_00618.ch1		10.00							
619	01_00619.ch1	X								
620	01_00620.ch1	X								
621	01_00621.ch1		10.00							
622	01_00622.ch1		3.00							21
623	01_00623.ch1		0.99						15	26

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
704	01_00704.ch1	X								
705	01_00705.ch1	X								
706	01_00706.ch1		-3.13							
707	01_00707.ch1		-2.92							
708	01_00708.ch1		-2.69							
709	01_00709.ch1		-2.44							
710	01_00710.ch1		-2.18							
711	01_00711.ch1		-1.88							
712	01_00712.ch1		-1.57							
713	01_00713.ch1		-1.22							
714	01_00714.ch1		-0.85							
715	01_00715.ch1		-0.45							
716	01_00716.ch1		0.00							
717	01_00717.ch1		0.43							

704	01_00704.ch1	X								
705	01_00705.ch1	X								
706	01_00706.ch1		-3.13							
707	01_00707.ch1		-2.92							
708	01_00708.ch1		-2.69							
709	01_00709.ch1		-2.44							
710	01_00710.ch1		-2.18							
711	01_00711.ch1		-1.88							
712	01_00712.ch1		-1.57							
713	01_00713.ch1		-1.22							
714	01_00714.ch1		-0.85							
715	01_00715.ch1		-0.45							
716	01_00716.ch1		0.00							
717	01_00717.ch1		0.43							

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
664	01_00664.ch1		-1.88							
665	01_00665.ch1		-2.17							
666	01_00666.ch1		-2.44							
667	01_00667.ch1		-2.69			X				
668	01_00668.ch1		-2.92							
669	01_00669.ch1		-3.13							
670	01_00670.ch1	X								
671	01_00671.ch1	X								
672	01_00672.ch1		-3.13							
673	01_00673.ch1		-2.92							
674	01_00674.ch1		-2.69							
675	01_00675.ch1		-2.44							
676	01_00676.ch1		-2.18							
677	01_00677.ch1		-1.88							
678	01_00678.ch1		-1.57							
679	01_00679.ch1		-1.22							
680	01_00680.ch1		-0.85							
681	01_00681.ch1		-0.45							
682	01_00682.ch1		0.00							
683	01_00683.ch1		0.44							
684	01_00684.ch1		1.00							
685	01_00685.ch1		3.00							27
686	01_00686.ch1		10.00							22
687	01_00687.ch1	X								
688	01_00688.ch1	X								
689	01_00689.ch1		10.00							26
690	01_00690.ch1		3.00							24
691	01_00691.ch1		0.99							25
692	01_00692.ch1		0.43							45
693	01_00693.ch1		-0.01							
694	01_00694.ch1		-0.45							
695	01_00695.ch1		-0.85							
696	01_00696.ch1		-1.22					22		20
697	01_00697.ch1		-1.57							
698	01_00698.ch1		-1.88					50		53
699	01_00699.ch1		-2.18							
700	01_00700.ch1		-2.44							
701	01_00701.ch1		-2.69							
702	01_00702.ch1		-2.92							
703	01_00703.ch1		-3.13							

664	01_00664.ch1		-1.88							
665	01_00665.ch1		-2.17							
666	01_00666.ch1		-2.44							
667	01_00667.ch1		-2.69			X				
668	01_00668.ch1		-2.92							
669	01_00669.ch1		-3.13							
670	01_00670.ch1	X								
671	01_00671.ch1	X								
672	01_00672.ch1		-3.13							
673	01_00673.ch1		-2.92							
674	01_00674.ch1		-2.69							
675	01_00675.ch1		-2.44							
676	01_00676.ch1		-2.18							
677	01_00677.ch1		-1.88							
678	01_00678.ch1		-1.57							
679	01_00679.ch1		-1.22							
680	01_00680.ch1		-0.85							
681	01_00681.ch1		-0.45							
682	01_00682.ch1		0.00							
683	01_00683.ch1		0.44							
684	01_00684.ch1		1.00							
685	01_00685.ch1		3.00							27
686	01_00686.ch1		10.00							22
687	01_00687.ch1	X								
688	01_00688.ch1	X								
689	01_00689.ch1		10.00							26
690	01_00690.ch1		3.00							24
691	01_00691.ch1		0.99							25
692	01_00692.ch1		0.43							45
693	01_00693.ch1		-0.01							
694	01_00694.ch1		-0.45							
695	01_00695.ch1		-0.85							
696	01_00696.ch1		-1.22					22		20
697	01_00697.ch1		-1.57							
698	01_00698.ch1		-1.88					50		53
699	01_00699.ch1		-2.18							
700	01_00700.ch1		-2.44							
701	01_00701.ch1		-2.69							
702	01_00702.ch1		-2.92							
703	01_00703.ch1		-3.13							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren < Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß <-sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß <-sigma[°]
99	03_00099.ch1		-0,45							
100	03_00100.ch1		-0,85							
101	03_00101.ch1		-1,22							
102	03_00102.ch1		-1,57							
103	03_00103.ch1		-1,88							
104	03_00104.ch1		-2,18							
105	03_00105.ch1		-2,44							
106	03_00106.ch1		-2,69							
107	03_00107.ch1		-2,92							
108	03_00108.ch1		-3,13							
109	03_00109.ch1	X								
110	03_00110.ch1	X								
111	03_00111.ch1		-3,13							
112	03_00112.ch1		-2,92							
113	03_00113.ch1		-2,70						32	38
114	03_00114.ch1		-2,45							
115	03_00115.ch1		-2,18							
116	03_00116.ch1		-1,88							
117	03_00117.ch1		-1,57							
118	03_00118.ch1		-1,22							
119	03_00119.ch1		-0,85							
120	03_00120.ch1		-0,45							
121	03_00121.ch1		-0,01							
122	03_00122.ch1		0,44							
123	03_00123.ch1		1,00							21
124	03_00124.ch1		3,00							
125	03_00125.ch1		10,00							
126	03_00126.ch1	X								
127	03_00127.ch1	X								
128	03_00128.ch1		10,00							22
129	03_00129.ch1		3,00						17	26
130	03_00130.ch1		1,00							32
131	03_00131.ch1		0,44							
132	03_00132.ch1		0,00							
133	03_00133.ch1		-0,45							
134	03_00134.ch1		-0,85							
135	03_00135.ch1		-1,22							
136	03_00136.ch1		-1,57							
137	03_00137.ch1		-1,88							
138	03_00138.ch1		-2,18							22

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren < Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß <-sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß <-sigma[°]
59	03_00059.ch1	X								
60	03_00060.ch1		10,00							
61	03_00061.ch1		3,00							18
62	03_00062.ch1		0,99							24
63	03_00063.ch1		0,43							
64	03_00064.ch1		-0,01							
65	03_00065.ch1		-0,44							
66	03_00066.ch1		-0,85							
67	03_00067.ch1		-1,22							
68	03_00068.ch1		-1,57							
69	03_00069.ch1		-1,88							
70	03_00070.ch1		-2,18							
71	03_00071.ch1		-2,45							
72	03_00072.ch1		-2,69							
73	03_00073.ch1		-2,92						28	52
74	03_00074.ch1		-3,13							
75	03_00075.ch1	X								
76	03_00076.ch1	X								
77	03_00077.ch1		-3,13							17
78	03_00078.ch1		-2,92							
79	03_00079.ch1		-2,69							
80	03_00080.ch1		-2,44							
81	03_00081.ch1		-2,18							
82	03_00082.ch1		-1,88							
83	03_00083.ch1		-1,57							
84	03_00084.ch1		-1,22							
85	03_00085.ch1		-0,85							
86	03_00086.ch1		-0,44							
87	03_00087.ch1		-0,01							
88	03_00088.ch1		0,44							
89	03_00089.ch1		1,00							
90	03_00090.ch1		3,00							25
91	03_00091.ch1		10,00							17
92	03_00092.ch1	X								
93	03_00093.ch1	X								
94	03_00094.ch1		10,00							
95	03_00095.ch1		2,99							25
96	03_00096.ch1		0,99							25
97	03_00097.ch1		0,43							
98	03_00098.ch1		0,00							

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, well zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, well Punkteanzahl des IFG von Kanalt nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, well Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, well Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, well Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
139	03 00139.ch1		-2,45							
140	03 00140.ch1		-2,69							
141	03 00141.ch1		-2,92							
142	03 00142.ch1		-3,13							
143	03 00143.ch1	X								
144	03 00144.ch1	X								
145	03 00145.ch1		-3,13							16
146	03 00146.ch1		-2,92							
147	03 00147.ch1		-2,69							
148	03 00148.ch1		-2,44							
149	03 00149.ch1		-2,18							
150	03 00150.ch1		-1,88							
151	03 00151.ch1		-1,57							
152	03 00152.ch1		-1,22							
153	03 00153.ch1		-0,85							
154	03 00154.ch1		-0,44	-5						
155	03 00155.ch1		-0,01							
156	03 00156.ch1		0,44							
157	03 00157.ch1		1,00							
158	03 00158.ch1		3,00							23
159	03 00159.ch1		10,00							16
160	03 00160.ch1	X								
161	03 00161.ch1	X								
162	03 00162.ch1		10,00							43
163	03 00163.ch1		2,99							27
164	03 00164.ch1		0,99							22
165	03 00165.ch1		0,44							
166	03 00166.ch1		-0,01							
167	03 00167.ch1		-0,44							
168	03 00168.ch1		-0,85							
169	03 00169.ch1		-1,22							
170	03 00170.ch1		-1,57							
171	03 00171.ch1		-1,88							
172	03 00172.ch1		-2,18							
173	03 00173.ch1		-2,45							
174	03 00174.ch1		-2,69							
175	03 00175.ch1		-2,92							
176	03 00176.ch1		-3,13							
177	03 00177.ch1	X								
178	03 00178.ch1	X								

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, well zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, well Punkteanzahl des IFG von Kanalt nicht stimmt ->Punktendiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, well Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, well Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, well Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
179	03 00179.ch1		-3,13							20
180	03 00180.ch1		-2,92							22
181	03 00181.ch1		-2,69							75
182	03 00182.ch1		-2,45							
183	03 00183.ch1		-2,18							
184	03 00184.ch1		-1,88							
185	03 00185.ch1		-1,57							
186	03 00186.ch1		-1,23							
187	03 00187.ch1		-0,85							
188	03 00188.ch1		-0,45							
189	03 00189.ch1		-0,01							
190	03 00190.ch1		0,43	-114						157
191	03 00191.ch1		0,99	-36	2	X				
192	03 00192.ch1		3,00	-221	20	X				2770
193	03 00193.ch1		10,01	-2	16	X				
194	03 00194.ch1	X				X				
195	03 00195.ch1	X				X				
196	03 00196.ch1		10,00	-110	2	X				1227
197	03 00197.ch1		3,00	-85	2	X				140
198	03 00198.ch1		0,99			X				17
199	03 00199.ch1		0,43	-21						
200	03 00200.ch1		-0,01	-88	2	X				99
201	03 00201.ch1		-0,45	-39						
202	03 00202.ch1		-0,85	-48						31
203	03 00203.ch1		-1,22	-40						
204	03 00204.ch1		-1,57	-3						
205	03 00205.ch1		-1,88	-33						
206	03 00206.ch1		-2,18	-73						57
207	03 00207.ch1		-2,45							
208	03 00208.ch1		-2,69	-153	4	X				88
209	03 00209.ch1		-2,92	-99		X				54
210	03 00210.ch1		-3,13	-74		X		1		520
211	03 00211.ch1	X				X				
212	03 00212.ch1	X								
213	03 00213.ch1		-3,13							
214	03 00214.ch1		-2,92							
215	03 00215.ch1		-2,69							
216	03 00216.ch1		-2,45							
217	03 00217.ch1		-2,18							
218	03 00218.ch1		-1,88							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiffms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punkteditf	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	--	--

259	03_00259.ch1		1,00							
260	03_00260.ch1		3,00							23
261	03_00261.ch1		10,00							
262	03_00262.ch1	X								
263	03_00263.ch1	X								
264	03_00264.ch1		10,00							23
265	03_00265.ch1		3,00							
266	03_00266.ch1		0,99							28
267	03_00267.ch1		0,44							
268	03_00268.ch1		0,00							
269	03_00269.ch1		-0,44							
270	03_00270.ch1		-0,85							
271	03_00271.ch1		-1,22							
272	03_00272.ch1		-1,57							
273	03_00273.ch1		-1,88							
274	03_00274.ch1		-2,18						15	
275	03_00275.ch1		-2,44							
276	03_00276.ch1		-2,69							
277	03_00277.ch1		-2,92							
278	03_00278.ch1		-3,13							
279	03_00279.ch1	X								
280	03_00280.ch1	X								
281	03_00281.ch1		-3,13							33
282	03_00282.ch1		-2,92							
283	03_00283.ch1		-2,69							
284	03_00284.ch1		-2,44							
285	03_00285.ch1		-2,18							
286	03_00286.ch1		-1,88							
287	03_00287.ch1		-1,57							
288	03_00288.ch1		-1,23							
289	03_00289.ch1		-0,85							
290	03_00290.ch1		-0,45							
291	03_00291.ch1		-0,01							
292	03_00292.ch1		0,43	-6						
293	03_00293.ch1		0,99	-14					15	
294	03_00294.ch1		2,99							22
295	03_00295.ch1		10,00							21
296	03_00296.ch1	X								
297	03_00297.ch1	X								
298	03_00298.ch1		10,00						20	55

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiffms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punkteditf	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	--	--

219	03_00219.ch1		-1,57							
220	03_00220.ch1		-1,22							
221	03_00221.ch1		-0,85							
222	03_00222.ch1		-0,44							
223	03_00223.ch1		-0,01							
224	03_00224.ch1		0,43							
225	03_00225.ch1		0,99							
226	03_00226.ch1		3,00							24
227	03_00227.ch1		10,00							16
228	03_00228.ch1	X								
229	03_00229.ch1	X								
230	03_00230.ch1		10,00							27
231	03_00231.ch1		2,99							19
232	03_00232.ch1		0,99							22
233	03_00233.ch1		0,43							
234	03_00234.ch1		-0,01							
235	03_00235.ch1		-0,45							
236	03_00236.ch1		-0,85							
237	03_00237.ch1		-1,22							
238	03_00238.ch1		-1,57							
239	03_00239.ch1		-1,88							
240	03_00240.ch1		-2,18							
241	03_00241.ch1		-2,44							
242	03_00242.ch1		-2,69							
243	03_00243.ch1		-2,92							
244	03_00244.ch1		-3,13							
245	03_00245.ch1	X								
246	03_00246.ch1	X								
247	03_00247.ch1		-3,13							21
248	03_00248.ch1		-2,92							
249	03_00249.ch1		-2,69							
250	03_00250.ch1		-2,45							
251	03_00251.ch1		-2,18							
252	03_00252.ch1		-1,88							
253	03_00253.ch1		-1,57							
254	03_00254.ch1		-1,22							
255	03_00255.ch1		-0,85							
256	03_00256.ch1		-0,44							
257	03_00257.ch1		-0,01							
258	03_00258.ch1		0,44							

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktediff	Geschwindigkeit geht durch Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
56	04 00056.ch1	x	10,00							17
57	04 00057.ch1		2,99							
58	04 00058.ch1		0,99							24
59	04 00059.ch1		0,44							
60	04 00060.ch1		-0,01							
61	04 00061.ch1		-0,45							
62	04 00062.ch1		-0,85							
63	04 00063.ch1		-1,23							
64	04 00064.ch1		-1,57							
65	04 00065.ch1		-1,89							
66	04 00066.ch1		-2,18							
67	04 00067.ch1		-2,45							
68	04 00068.ch1		-2,69							
69	04 00069.ch1		-2,91							
70	04 00070.ch1		-3,12							
71	04 00071.ch1									
72	04 00072.ch1	x								
73	04 00073.ch1	x								
74	04 00074.ch1		-3,12							23
75	04 00075.ch1		-2,91							
76	04 00076.ch1		-2,68							
77	04 00077.ch1		-2,44							
78	04 00078.ch1		-2,17							
79	04 00079.ch1		-1,88							
80	04 00080.ch1		-1,56							
81	04 00081.ch1		-1,22							
82	04 00082.ch1		-0,85							
83	04 00083.ch1		-0,44							
84	04 00084.ch1		0,00							
85	04 00085.ch1		0,44							
86	04 00086.ch1		1,00							
87	04 00087.ch1		3,00							24
88	04 00088.ch1		9,99							22
89	04 00089.ch1	x								
90	04 00090.ch1	x								
91	04 00091.ch1		10,00							20
92	04 00092.ch1		2,99							15
93	04 00093.ch1		0,99						X	24
94	04 00094.ch1		0,43	-8	2				X	
95	04 00095.ch1		-0,01							

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->Punktediff	Geschwindigkeit geht durch Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
299	03 00299.ch1		2,99							
300	03 00300.ch1		0,99							27
301	03 00301.ch1		0,44							
302	03 00302.ch1		0,00							
303	03 00303.ch1		-0,44							
304	03 00304.ch1		-0,85							
305	03 00305.ch1		-1,22							
306	03 00306.ch1		-1,57							
307	03 00307.ch1		-1,88							
308	03 00308.ch1		-2,18							
309	03 00309.ch1		-2,44							
310	03 00310.ch1		-2,69							
311	03 00311.ch1		-2,92				X			
312	03 00312.ch1		-3,13							
313	03 00313.ch1	x								
314	03 00314.ch1	x								
315	03 00315.ch1		-3,12						19	27
316	03 00316.ch1		-2,92							
317	03 00317.ch1		-2,69				X			
318	03 00318.ch1		-2,44				X			
319	03 00319.ch1		-2,17							
320	03 00320.ch1		-1,88							
321	03 00321.ch1		-1,57							
322	03 00322.ch1		-1,22							
323	03 00323.ch1		-0,85							
324	03 00324.ch1		-0,44							
325	03 00325.ch1		0,00							
326	03 00326.ch1		0,44							
327	03 00327.ch1		1,00							
328	03 00328.ch1		3,00							23
329	03 00329.ch1		10,00							18
330	03 00330.ch1	x								
331	03 00331.ch1	x								
332	03 00332.ch1		10,00							15
333	03 00333.ch1		3,00							19
334	03 00334.ch1		1,00							25
335	03 00335.ch1		0,43							17

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren > Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt > Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß >sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß >sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	---	---

136	04_00136.ch1		-2,44							46
137	04_00137.ch1		-2,69							
138	04_00138.ch1		-2,92							
139	04_00139.ch1		-3,13							
140	04_00140.ch1	x								
141	04_00141.ch1	x								
142	04_00142.ch1		-3,13							
143	04_00143.ch1		-2,92							
144	04_00144.ch1		-2,69							
145	04_00145.ch1		-2,44							
146	04_00146.ch1		-2,18						16	
147	04_00147.ch1		-1,88							
148	04_00148.ch1		-1,57	-104						103
149	04_00149.ch1		-1,22	-24						
150	04_00150.ch1		-0,85							
151	04_00151.ch1		-0,44							
152	04_00152.ch1		0,00							
153	04_00153.ch1		0,43							
154	04_00154.ch1		1,00							17
155	04_00155.ch1		3,00							25
156	04_00156.ch1		10,00							
157	04_00157.ch1	x								
158	04_00158.ch1	x								
159	04_00159.ch1		10,00							33
160	04_00160.ch1		2,99							
161	04_00161.ch1		0,99							23
162	04_00162.ch1		0,43	-93	2	X				101
163	04_00163.ch1		0,00		2	X				
164	04_00164.ch1		-0,45							
165	04_00165.ch1		-0,85							
166	04_00166.ch1		-1,22							
167	04_00167.ch1		-1,57						60	69
168	04_00168.ch1		-1,88	-5						
169	04_00169.ch1		-2,17	-38						
170	04_00170.ch1		-2,44	-18					19	40
171	04_00171.ch1		-2,69							47
172	04_00172.ch1		-2,92							
173	04_00173.ch1		-3,13							
174	04_00174.ch1	x								
175	04_00175.ch1	x								

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren > Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt > Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß >sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß >sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	--	---	------	--------------------------	--	---	---

96	04_00096.ch1		-0,44							
97	04_00097.ch1		-0,85							
98	04_00098.ch1		-1,23		6	X				
99	04_00099.ch1		-1,57							
100	04_00100.ch1		-1,89							38
101	04_00101.ch1		-2,18	-54						
102	04_00102.ch1		-2,44							
103	04_00103.ch1		-2,69							22
104	04_00104.ch1		-2,92							
105	04_00105.ch1		-3,13							23
106	04_00106.ch1	x			4	X				
107	04_00107.ch1	x								
108	04_00108.ch1		-3,13						16	41
109	04_00109.ch1		-2,92							
110	04_00110.ch1		-2,69						37	33
111	04_00111.ch1		-2,44							
112	04_00112.ch1		-2,18							
113	04_00113.ch1		-1,88							
114	04_00114.ch1		-1,57							
115	04_00115.ch1		-1,22							
116	04_00116.ch1		-0,85							
117	04_00117.ch1		-0,45						29	26
118	04_00118.ch1		0,00							
119	04_00119.ch1		0,43							
120	04_00120.ch1		1,00							
121	04_00121.ch1		3,00							22
122	04_00122.ch1		10,00							18
123	04_00123.ch1	x								
124	04_00124.ch1	x								
125	04_00125.ch1		10,00							27
126	04_00126.ch1		3,00	-39						27
127	04_00127.ch1		0,99							16
128	04_00128.ch1		0,43							
129	04_00129.ch1		-0,01							
130	04_00130.ch1		-0,45							
131	04_00131.ch1		-0,85							
132	04_00132.ch1		-1,22							
133	04_00133.ch1		-1,57							
134	04_00134.ch1		-1,89							
135	04_00135.ch1		-2,18							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Geräteward im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
176	04_00176.ch1		-3.13	-8						35
177	04_00177.ch1		-2.92							36
178	04_00178.ch1		-2.69	-6						
179	04_00179.ch1		-2.44	-28						
180	04_00180.ch1		-2.18	-92	2	X				73
181	04_00181.ch1		-1.88	-11	2	X				
182	04_00182.ch1		-1.57							
183	04_00183.ch1		-1.22							
184	04_00184.ch1		-0.85							
185	04_00185.ch1		-0.44							
186	04_00186.ch1		0.00							
187	04_00187.ch1		0.44	-17						
188	04_00188.ch1		0.99							
189	04_00189.ch1		3.00							
190	04_00190.ch1		10.01				1			21
191	04_00191.ch1	X								70
192	04_00192.ch1	X								
193	04_00193.ch1		10.00							33
194	04_00194.ch1		2.99							23
195	04_00195.ch1		0.99							26
196	04_00196.ch1		0.43	-30						
197	04_00197.ch1		-0.01							
198	04_00198.ch1		-0.45							
199	04_00199.ch1		-0.85							
200	04_00200.ch1		-1.22	-10						
201	04_00201.ch1		-1.57							
202	04_00202.ch1		-1.88							
203	04_00203.ch1		-2.18							
204	04_00204.ch1		-2.44							
205	04_00205.ch1		-2.69							
206	04_00206.ch1		-2.92							
207	04_00207.ch1		-3.13							
208	04_00208.ch1	X								
209	04_00209.ch1	X								
210	04_00210.ch1		-3.13	-19						28
211	04_00211.ch1		-2.92							
212	04_00212.ch1		-2.69							
213	04_00213.ch1		-2.44							
214	04_00214.ch1		-2.18							
215	04_00215.ch1		-1.88							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal1 nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Geräteward im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
216	04_00216.ch1		-1.57							
217	04_00217.ch1		-1.22							
218	04_00218.ch1		-0.85		2	X				
219	04_00219.ch1		-0.45	-22						
220	04_00220.ch1		0.00							
221	04_00221.ch1		0.43							72
222	04_00222.ch1		0.99							67
223	04_00223.ch1		3.00	-19						22
224	04_00224.ch1		10.00	-84						778
225	04_00225.ch1	X			2	X				
226	04_00226.ch1	X			6	X				
227	04_00227.ch1		10.00	-38	2					
228	04_00228.ch1		2.99	-52	26	X				52
229	04_00229.ch1		0.99	-38	4	X				20
230	04_00230.ch1		0.44							
231	04_00231.ch1		-0.01							
232	04_00232.ch1		-0.45	-33						
233	04_00233.ch1		-0.85							
234	04_00234.ch1		-1.22							
235	04_00235.ch1		-1.57							
236	04_00236.ch1		-1.88							
237	04_00237.ch1		-2.18							
238	04_00238.ch1		-2.44							
239	04_00239.ch1		-2.69							
240	04_00240.ch1		-2.92							
241	04_00241.ch1		-3.13							
242	04_00242.ch1	X								
243	04_00243.ch1	X								
244	04_00244.ch1		-3.13	-19						30
245	04_00245.ch1		-2.92							
246	04_00246.ch1		-2.69						X	
247	04_00247.ch1		-2.44							
248	04_00248.ch1		-2.18							
249	04_00249.ch1		-1.89							
250	04_00250.ch1		-1.57	-17						
251	04_00251.ch1		-1.22	-4						
252	04_00252.ch1		-0.85	-16						
253	04_00253.ch1		-0.45							
254	04_00254.ch1		0.00							
255	04_00255.ch1		0.44	-7						

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

296	04 00296.ch1		2.99							
297	04 00297.ch1		0.99							24
298	04 00298.ch1		0.43							35
299	04 00299.ch1		0.00							
300	04 00300.ch1		-0.44							
301	04 00301.ch1		-0.85							
302	04 00302.ch1		-1.22							
303	04 00303.ch1		-1.57							
304	04 00304.ch1		-1.88							
305	04 00305.ch1		-2.18	-4						
306	04 00306.ch1		-2.44							
307	04 00307.ch1		-2.69	-12						
308	04 00308.ch1		-2.92	-4						
309	04 00309.ch1		-3.13	-30						
310	04 00310.ch1	x								
311	04 00311.ch1	x								
312	04 00312.ch1		-3.13	-30	2					
313	04 00313.ch1		-2.92	-13						
314	04 00314.ch1		-2.69		2					
315	04 00315.ch1		-2.44							
316	04 00316.ch1		-2.18	-37						
317	04 00317.ch1		-1.88	-11						
318	04 00318.ch1		-1.57	-23						
319	04 00319.ch1		-1.22	-4						
320	04 00320.ch1		-0.85							
321	04 00321.ch1		-0.45							
322	04 00322.ch1		0.00							
323	04 00323.ch1		0.44	-48	2					37
324	04 00324.ch1		1.00	-22	2					21
325	04 00325.ch1		3.00	-19						
326	04 00326.ch1		10.00	-20						
327	04 00327.ch1	x								
328	04 00328.ch1	x								
329	04 00329.ch1		10.00	-21						17
330	04 00330.ch1		2.99							22
331	04 00331.ch1		0.99	-46						23
332	04 00332.ch1		0.43	-37						
333	04 00333.ch1		-0.01	-13						
334	04 00334.ch1		-0.45						X	
335	04 00335.ch1		-0.85							X

scannummer	ifg_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt -> Punktediff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

256	04 00256.ch1		1.00							
257	04 00257.ch1		3.00							25
258	04 00258.ch1		10.00							15
259	04 00259.ch1	x								
260	04 00260.ch1	x								
261	04 00261.ch1		10.00							16
262	04 00262.ch1		3.00							22
263	04 00263.ch1		0.99							20
264	04 00264.ch1		0.43							
265	04 00265.ch1		-0.01							
266	04 00266.ch1		-0.45							
267	04 00267.ch1		-0.85	-1						
268	04 00268.ch1		-1.22	-20		X				
269	04 00269.ch1		-1.57							
270	04 00270.ch1		-1.88							
271	04 00271.ch1		-2.18							
272	04 00272.ch1		-2.44							
273	04 00273.ch1		-2.69							26
274	04 00274.ch1		-2.92							
275	04 00275.ch1		-3.13							
276	04 00276.ch1	x								
277	04 00277.ch1	x								
278	04 00278.ch1		-3.13							18
279	04 00279.ch1		-2.92	-141	2	X				84
280	04 00280.ch1		-2.69							
281	04 00281.ch1		-2.45							
282	04 00282.ch1		-2.18							
283	04 00283.ch1		-1.88							
284	04 00284.ch1		-1.57							
285	04 00285.ch1		-1.22							
286	04 00286.ch1		-0.85							
287	04 00287.ch1		-0.45							
288	04 00288.ch1		0.00							38
289	04 00289.ch1		0.43							
290	04 00290.ch1		1.00							26
291	04 00291.ch1		3.00							24
292	04 00292.ch1		10.00							21
293	04 00293.ch1	x								
294	04 00294.ch1	x								
295	04 00295.ch1		10.00							22

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->PunkteDiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

433	04_00433.ch1		-2.69	-1						
434	04_00434.ch1		-2.92							
435	04_00435.ch1		-3.13							
436	04_00436.ch1	X								
437	04_00437.ch1	X								
438	04_00438.ch1		-3.13							
439	04_00439.ch1		-2.92							
440	04_00440.ch1		-2.69							
441	04_00441.ch1		-2.44							
442	04_00442.ch1		-2.18							
443	04_00443.ch1		-1.88							
444	04_00444.ch1		-1.57							
445	04_00445.ch1		-1.22	-1000						
446	04_00446.ch1		-0.85	-11						
447	04_00447.ch1		-0.45							
448	04_00448.ch1		-0.01							
449	04_00449.ch1		0.44							
450	04_00450.ch1		0.99							20
451	04_00451.ch1		3.00							18
452	04_00452.ch1		10.00							
453	04_00453.ch1	X								
454	04_00454.ch1	X								
455	04_00455.ch1		10.00							34
456	04_00456.ch1		3.00	-3						28
457	04_00457.ch1		0.99							20
458	04_00458.ch1		0.43	-3						
459	04_00459.ch1		-0.01							
460	04_00460.ch1		-0.45							
461	04_00461.ch1		-0.85							
462	04_00462.ch1		-1.22							
463	04_00463.ch1		-1.57							
464	04_00464.ch1		-1.88							
465	04_00465.ch1		-2.18							
466	04_00466.ch1		-2.45							
467	04_00467.ch1		-2.69							
468	04_00468.ch1		-2.92	-33						
469	04_00469.ch1		-3.13		X					
470	04_00470.ch1	X								
471	04_00471.ch1	X								
472	04_00472.ch1		-3.13							

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-IFG	(ist-)Elevation [Grad]	markert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiff[ms]	markert, weil Punkteanzahl des IFG von Kanal nicht stimmt ->PunkteDiff	Null	Wolken in der Sichtlinie	markert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[°]	markert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[°]
------------	----------	-----------------------	------------------------	---	---	------	--------------------------	--	--	--

336	04_00336.ch1		-1.22	-27						
337	04_00337.ch1		-1.57							
338	04_00338.ch1		-1.88							
339	04_00339.ch1		-2.18							
340	04_00340.ch1		-2.44							
341	04_00341.ch1		-2.69							
342	04_00342.ch1		-2.92							
343	04_00343.ch1		-3.13							
344	04_00344.ch1	X								
345	04_00345.ch1	X								28
346	04_00346.ch1		-3.13							
347	04_00347.ch1		-2.92							
348	04_00348.ch1		-2.69							
349	04_00349.ch1		-2.44							
350	04_00350.ch1		-2.18							
351	04_00351.ch1		-1.88							
352	04_00352.ch1		-1.57							
353	04_00353.ch1		-1.22							
354	04_00354.ch1		-0.85							
355	04_00355.ch1		-0.45							
356	04_00356.ch1		-0.01							
357	04_00357.ch1		0.44							
358	04_00358.ch1		0.99							
359	04_00359.ch1		3.00							22
360	04_00360.ch1		10.00							19

420	04_00420.ch1	X								
421	04_00421.ch1		10.00							31
422	04_00422.ch1		2.99							24
423	04_00423.ch1		0.99							21
424	04_00424.ch1		0.43							
425	04_00425.ch1		0.00							
426	04_00426.ch1		-0.45	-1						
427	04_00427.ch1		-0.85							
428	04_00428.ch1		-1.22							
429	04_00429.ch1		-1.57							
430	04_00430.ch1		-1.88							
431	04_00431.ch1		-2.18							
432	04_00432.ch1		-2.44	-1						

scannummer	fig_name	ist Schwarzkörper-FG	(ist-)Elevation [Grad]	markiert, weil zu früh gefahren -> Zeitdiffms]	markiert, weil Punkteanzahl des FG von Kanal nicht -> Punktediff	Geschwindigkeit geht durch Null	Wolken in der Sichtlinie	markiert, weil Scanwinkel außerhalb erlaubtem Bereich Gerätewand im FOV	markiert, weil Sigma(Elevation) über Mittelbereich zu groß ->sigma[markiert, weil Sigma(Elevation) über Gesamtbereich zu groß ->sigma[
473	04_00473.ch1		-2.92	-4						
474	04_00474.ch1		-2.69			X				
475	04_00475.ch1		-2.45							
476	04_00476.ch1		-2.18	-39						
477	04_00477.ch1		-1.89							
478	04_00478.ch1		-1.57	-24						
479	04_00479.ch1		-1.22							
480	04_00480.ch1		-0.85							
481	04_00481.ch1		-0.45	-91	2					94
482	04_00482.ch1		0.00							
483	04_00483.ch1		0.43							
484	04_00484.ch1		0.99							
485	04_00485.ch1		3.00							27
486	04_00486.ch1		10.00							20
487	04_00487.ch1	X								
488	04_00488.ch1	X								
489	04_00489.ch1		10.00							42
490	04_00490.ch1		2.99							22

