

Technische Universität Berlin
Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Luft- und Raumfahrt

Michael Krocka
geboren am 15. Juni 1962 in Bratislava

**Optimierung und Erweiterung eines flugzeuggetragenen
FIR Heterodyn-Spektrometers im Hinblick auf Emissions-
und Absorptionsmessung**

Von
Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.rer.nat. V. Schindler

Berichter: Prof. Dr.rer.nat. H.-P. Röser

Berichter: Dr. H.-W. Hübers (DLR Adlershof)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 04.09.2002

Berlin 2002
D 83

Überblick (deutsch)

Ende des 19. Jahrhunderts wurde Ozon als natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre identifiziert. Die sogenannte Ozonschicht befindet sich in der Stratosphäre in einer Höhe zwischen 15 km und 30 km. Sie absorbiert beinahe die gesamte ultraviolette Strahlung der Sonne. Die Abnahme des Ozongehalts in der Stratosphäre wird durch den katalytischen Ozonabbau verursacht. Bei diesem Prozess spielen OH-Radikale als Katalysatoren eine wichtige Rolle. Diese können durch Fernerkundung im fernen Infrarot (FIR, Terahertz-Bereich) nachgewiesen werden.

Zu diesem Zweck wurde beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein ursprünglich für die Astronomie konzipiertes Heterodynspektrometer (THOMAS = Tera Hertz OH Measurement Airborne Sounder) weiterentwickelt, mit dem zu erstem mal die Emissionsstrahlung des Rotationsstripletts von OH bei 2513,2 GHz hochaufgelöst gemessen werden konnte.

Aufgrund der starken Absorption von troposphärischem Wasserdampf in diesem Spektralbereich wird das Instrument mit einem Flugzeug auf eine Messhöhe oberhalb der Tropopause gebracht, von wo aus in Vertikalsondierung gemessen wird. Dabei wird aus der Linienform der gemessenen spektralen Strahldichten durch ein Inversionsverfahren die räumliche Konzentrationsverteilung der OH-Radikale gewonnen.

Das ungünstige Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Emissionsmessungen erfordert jedoch eine lange Messzeit (über 20 min), so dass aufgrund der damit verbundenen großen Flugstrecke keine räumlich aufgelösten Aussagen über die Konzentrationsverteilung der OH-Radikale getroffen werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei neue Verfahren entwickelt:

Bei Emissionsmessungen innerhalb eines Messzyklus wurden mehrere Spektren unter verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen. Die dabei zusätzlich gewonnene Information kann bei der Inversion genutzt werden.

Die wesentliche Innovation liegt jedoch in der Entwicklung einer gänzlich neuen Anwendung des Instrumentes. Dabei wird die Absorption von Sonnenstrahlung durch OH gemessen. Zu diesem Zweck wurde die Optik des Spektrometers erweitert und eine Nachführeinheit entwickelt, die die Bewegung des Flugzeugs nahezu in Echtzeit ausgleicht. Zudem macht die hohe Temperatur der Sonne von ca. 4200 K (FIR-Bereich) den Einsatz einer heißen Kalibrierquelle erforderlich, die in das Messsystem integriert wurde. Die ersten Absorptionsmessungen führten gegenüber den bisherigen Emissionsmessungen bereits zu einer deutlichen Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Das neue Verfahren bewirkt sowohl eine höhere Genauigkeit der resultierenden OH-Verteilung als auch eine bessere räumliche Auflösung durch die kürzere Messzeit.



Abbildung 1: FALCON (D-CMET) - das Forschungsflugzeug des DLR

Abstract (english)

Ozone was identified as a natural constituent of the atmosphere at the end of the 19th century. The so-called ozone layer is located in the stratosphere between 15 km and 30 km altitude. It absorbs almost the entire ultra violet radiation of the Sun. The depletion of ozone in the stratosphere is the result of catalytic ozone destruction. In this process the OH radical is an important catalyst and thus plays a major role. OH can be detected by remote sensing in the far infrared (FIR, terahertz frequency range).

For this purpose, the heterodyne spectrometer THOMAS (Tera Hertz OH Measurement Airborne Sounder) was developed at the German Aerospace Center (DLR). The emission of the OH rotational triplet at 2513.2 GHz was measured by THOMAS.

Due to the significant absorption of tropospheric water vapor in this frequency range, the measurement is conducted above the troposphere using a vertical sounding geometry from an aircraft. The vertical distribution of OH is inferred by an inversion algorithm using the line shape of the observed spectral densities.

However, the low signal to noise ratio of the emission measurement requires long integration times (more than 20 min) and as a consequence long flight paths. Therefore, high horizontal resolution of the OH densities cannot be obtained.

In this work two new observation methods have been developed:

Multiple viewing angles within one observation cycle have been introduced. This provides additional information for the inversion.

The primary innovation is the development of an entirely new application of the instrument measuring the absorption of sunlight by OH. To accomplish this a Sun tracker has been added to the optics of the instrument to compensate the aircraft motion in near real time. The high temperature of the Sun (approximately 4200K in the far infrared) also requires a hot calibration source. The first absorption measurements already showed a significant improvement in signal to noise ratio compared with the previous emission measurements. The new method results in a higher precision of the retrieved OH distribution as well as an improved horizontal resolution due to a shorter measurement time.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
I	Physikalischer Hintergrund	11
2	Die Atmosphäre der Erde	13
2.1	Der Aufbau der Atmosphäre der Erde	13
2.1.1	Troposphäre	13
2.1.2	Stratosphäre	13
2.1.3	Mesosphäre und Thermosphäre	14
2.2	Ozonchemie	14
2.2.1	Das Hydroxyl-Radikal (<i>OH</i>)	15
2.2.2	Spektroskopische Eigenschaften von <i>OH</i> im fernen Infrarot (FIR)	15
3	Methoden zur Untersuchung der Atmosphäre	19
3.1	In-Situ-Messverfahren	19
3.2	Fernerkundung der Erdatmosphäre	19
3.3	Emission und Absorption	21
3.3.1	Resonante Absorption	21
3.3.2	Nichtresonante Kontinuumsabsorption	21
II	Der experimentelle Aufbau	23
4	Heterodynspektrometer	25
4.1	Aufbau und Funktionsweise des Heterodynspektrometers THOMAS	25
4.2	Das akustooptische Spektrometer	28
4.3	Messprinzip	30
4.3.1	Radiometrische Kalibrierung	31
4.3.2	Systemrauschtemperatur	33

5	Optimierung und Erweiterung des Heterodynsystems	35
5.1	Das Flugzeugfenster	35
5.2	Ablenkspiegel	38
5.3	Zusätzliche Kalibrierquelle	38
5.4	Diplexer	40
5.5	Mechanische Stabilisierung des CO_2 -Lasers	41
5.6	Das Akustooptische Spektrometer (AOS)	43
5.6.1	Laserdiode	43
5.6.2	Ausleseelektronik	43
5.6.3	Steuerprogramm	44
5.6.4	Leistungsverstärker	44
5.7	Kontaktierung von Schottkydioden	44
5.8	Winkelsondierung	46
5.9	Umbau des Heterodynsystems auf „ <i>sun tracking</i> “	46
5.9.1	Technische Realisierung	47
5.9.2	Erfassung der Sonnenposition	47
5.9.3	Motorsteuerung	50
5.9.4	Kopplung Sonne- und Spiegelposition	50
5.9.5	Messsequenz, Kalibrierung und Auswahlkriterien	55
5.9.6	Die Arbeitsweise des Programms	56
5.9.7	Flugbahnrechnung	59
III	Messungen	63
6	Hilfsmessungen	65
6.1	Testmessungen - Funktion des Systems	65
6.2	Messungen zur Charakterisierung des Spektrometers	69
7	OH - Emissionsmessungen	77
7.1	Beispiele der OH-Emissionsmessungen	77
8	OH - Absorptionsmessungen	81
8.1	Beispiel der OH-Absorptionsmessung	81
9	Fazit und Ausblick	87
A	AOS	99
B	Diplexer	103

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	7
C Schaltpläne	107
D Flugmessungen 1999	111
E Flugmessungen 2000	115

Kapitel 1

Einleitung

Beschäftigt man sich mit Atmosphärenchemie und insbesondere mit der sogenannten Ozonschicht in der Stratosphäre, stößt man auf chemische Prozesse, bei denen dem Hydroxylradikal OH , einem Mitglied der HO_x Familie, eine wesentliche Bedeutung zukommt.

Diese Arbeit widmet sich den Messmethoden der Fernerkundung des OH in der mittleren Stratosphäre bis zur Mesosphäre. Die OH -Konzentrationen werden aus Messungen der thermischen Emission und Absorption von OH im fernen Infrarot (FIR-Bereich) mit dem flugzeuggetragenen 2,5 THz Heterodyn Spektrometer THOMAS (Tera Hertz OH Measurement Airborne Sounder) abgeleitet. Aufgrund der starken Absorption von Wasserdampf in diesem Frequenzbereich ist eine Beobachterhöhe oberhalb der Tropopause notwendig. Daher wurden alle atmosphärischen OH -Messungen mit THOMAS vom Forschungsflugzeug FALCON des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) aus durchgeführt. THOMAS zeigte seine Flugtauglichkeit bereits während der ersten Einsätze in den Jahren 1994/95 im Rahmen der Messkampagne SESAME [31].

Im August 1997 wurde die bislang aufwändigste Messkampagne gemeinsam mit dem weltraumgestützten Instrument MAHRSI (Middle Atmosphere High Resolution Spectrograph Investigation) durchgeführt. Dabei wurden zeitlich und örtlich übereinstimmende OH Messungen in der mittleren Atmosphäre ermöglicht, die sich über den OH -Tagesgang erstreckten.

Im Herbst 1999 und 2000 wurden weitere Messkampagnen durchgeführt, bei der die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messmethoden angewendet wurden. Zuerst wurde die „klassische“ Emissionsmethode um die sogenannte Winkelsondierung erweitert, die das gleichzeitige Messen der OH -Strahlung aus der Atmosphäre unter verschiedenen vertikalen Winkeln ermöglicht.

Die wesentliche Innovation liegt jedoch in der Entwicklung einer gänzlich neuen Anwendung des Instrumentes. Diese ermöglicht die Messung der Absorption von Sonnenstrahlung durch OH .

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Hauptteile. Der erste Teil beschreibt den physikalischen Hintergrund der Problematik. Nach einer Einführung in die Chemie und in die Zusammensetzung der Atmosphäre der Erde werden hier Verfahren zur Untersuchung der Atmosphäre erläutert.

Der zweite Teil der Arbeit beschreibt den experimentellen Aufbau des Heterodynspektrometers THOMAS. Zunächst werden alle Optimierungsarbeiten, die an dem Spektrometer durchgeführt wurden, um Winkelsondierung zu integrieren, beschrieben. Der wesentliche Teil widmet sich dem Umbau des Heterodynenempfängers, der auch Absorptionsmessungen von OH gegen die Sonne ermöglicht.

Der dritte Teil der Arbeit stellt Testmessungen am Heterodynsystem und spektrale Messungen vor. Dabei wird auch eine Datenanalyse durchgeführt.

Das letzte Kapitel enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit und einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und Verbesserungen des Heterodynspektrometers.

Teil I

Physikalischer Hintergrund

Kapitel 2

Die Atmosphäre der Erde

Der Planet Erde ist von einer dünnen Gasschicht, der Atmosphäre, umgeben. Obwohl die Masse der Atmosphäre nur einen geringen Bruchteil der Gesamtmasse der Erde beträgt, spielt sie für die Erhaltung des Lebens eine wichtige Rolle. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre, wie z. B. die Temperatur, haben sich in der Geschichte der Erde mehrmals auf natürliche Weise geändert. Ein Beispiel für die natürlichen Ursachen dieser Änderungen sind Vulkanausbrüche. Allerdings treten seit dem Beginn der technischen Revolution Änderungen auf, die eindeutig von Menschen hervorgerufen werden. Die Folgen dieser Änderungen könnten auf das Leben, wie man es heute kennt, fatale Auswirkungen haben. Besonders die Zunahme der Erderwärmung aufgrund des Treibhauseffekts und das stratosphärische Ozonloch werden in den kommenden Jahren ständig an Bedeutung gewinnen.

2.1 Der Aufbau der Atmosphäre der Erde

Die Erdatmosphäre lässt sich in Bezug auf ihre Höhe in verschiedene Schichten unterteilen. Das Kriterium für diese Einteilung ist der Verlauf der Temperatur in der Atmosphäre (Abbildung 2.1). Aufgrund der Temperaturverteilung findet nur eine geringe vertikale Durchmischung zwischen den einzelnen Schichten statt.

2.1.1 Troposphäre

Die *Troposphäre* ist die unterste Schicht der Atmosphäre. Sie erstreckt sich vom Boden je nach geographischer Breite und Jahreszeit bis in eine Höhe von ca. 8 bis 17 km. Die Strahlung der Sonne erwärmt die Erdoberfläche und somit die angrenzende Atmosphärenschicht. Die warme Luft steigt auf, dehnt sich aus und kühlt sich dabei näherungsweise adiabatisch ab. Diese starke vertikale Durchmischung der Luftmassen ist am Wetter beteiligt. Aus dem Gleichgewicht zwischen der von der Erdoberfläche absorbierten Strahlungsleistung der Sonne und der von ihr emittierten thermischen Strahlung ergibt sich eine Temperatur von 255 K. Der tatsächliche Wert liegt um etwa 33 K höher, was dem sogenannten „*Treibhauseffekt*“ zugeschrieben wird. Einige Spurengase wie H_2O und CO_2 absorbieren nämlich diese thermische Strahlung, was zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre führt.

2.1.2 Stratosphäre

Die Schicht über der Troposphäre, die bis zu einer Höhe von etwa 50 km reicht, wird *Stratosphäre* genannt. Die Trennschicht zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre nennt man *Tropopause*.

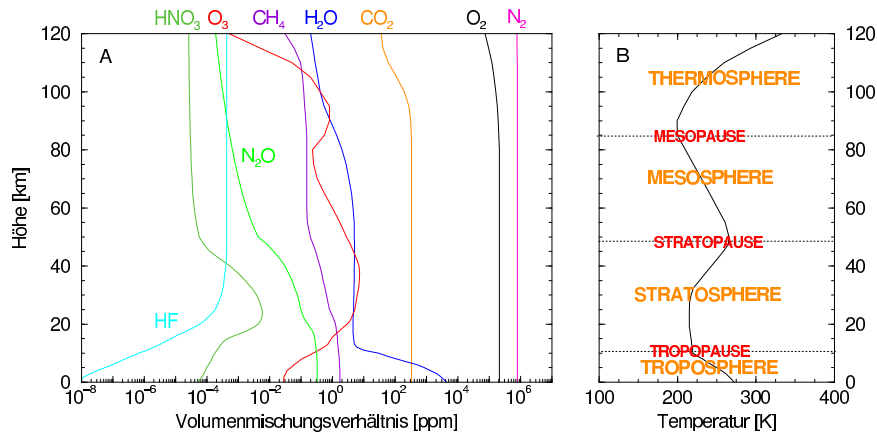


Abbildung 2.1: A) Höhenverteilung der Volumenmischungsverhältnisse einiger atmosphärischer Gase (midlatitude winter) [2]; B) Temperaturprofil in der Atmosphäre (midlatitude winter) [2]

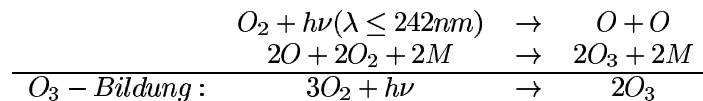
Die Temperatur der oberen Stratosphäre steigt mit zunehmender Höhe an. Das hier vorhandene Spurengas Ozon (O_3) absorbiert einen wesentlichen Teil der ultravioletten Strahlung der Sonne, was zu einer Erwärmung dieser Atmosphärenschicht führt.

2.1.3 Mesosphäre und Thermosphäre

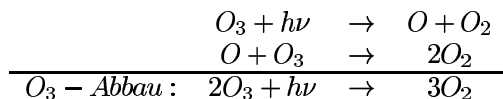
Die Konzentration von Ozon nimmt in der über der Stratosphäre liegenden *Mesosphäre* stark ab. Dies hat eine Temperaturabnahme mit steigender Höhe zur Folge. Die Temperatur steigt jedoch in der nächsten Schicht der Atmosphäre, der *Thermosphäre*, wieder an. Hier findet eine Absorption von kurzwelliger Strahlung ($\lambda < 200 \text{ nm}$) durch Sauerstoff und Stickstoff statt.

2.2 Ozonchemie

Ozon O_3 wird durch die Spaltung von O_2 unter Einwirkung von UV-Strahlung der Sonne gebildet. Die O-Radikale reagieren bei einem gleichzeitigen Stoß mit einem dritten Stoßpartner M mit O_2 -Molekülen und bilden O_3 -Moleküle. Der dritte Partner (M) ist nötig, um den überschüssigen Impuls abzuführen.



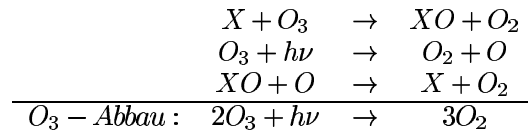
Der Abbau von Ozon erfolgt in mehreren komplexen Prozessen. Ein Teil des gebildeten Ozons wird durch die Sonneneinstrahlung mit Wellenlängen zwischen 240 nm und 320 nm zerstört. Dieser Abbaumechanismus ist jedoch zu langsam, um den Ozongehalt in der Atmosphäre zu erklären.



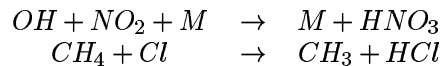
Für einen zusätzlichen Ozonabbau sorgen sog. *katalytische Abbauzyklen*. Bei diesen Reaktionen bleibt der Katalysator X , der ein Ozonmolekül zerstört, erhalten und kann weitere Ozonmoleküle abbauen. Dies wird durch die folgenden Reaktionen beschrieben:

Katalysator X	Zyklusname	maximaler Beitrag im Höhenbereich
H, OH	HO_x	untere Stratosphäre und höher als 45 km
NO	NO_x	35 km bis 40 km
Cl, Br	ClO_x	unter 35 km

Tabelle 2.1: Bezeichnung der katalytischen Zyklen und Höhenbereiche, in denen ihr Beitrag maximal ist



Als Katalysatoren X treten dabei die in Tabelle 2.1 aufgeführten Gase auf. Die Katalysatoren können den Ozon-Zersetzungszyklen durch Speicherung in *Reservoirgasen* wie HNO_3 , HCl , $ClONO_2$, HNO_4 , und $HOCl$ vorübergehend entzogen werden. Typische Reaktionen dafür sind:

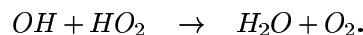


Da die Reservoirgase, in denen zum Teil weit über 50 % der Katalysatoren gespeichert werden, einerseits wieder zu Katalysatoren photodissoziieren, andererseits aber auch in die Troposphäre absinken und durch Regen ausgewaschen werden können, sind sie besonders für die stratosphärische Ozonchemie von großer Bedeutung.

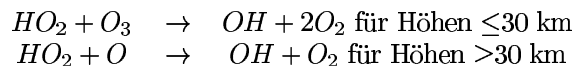
2.2.1 Das Hydroxyl-Radikal (OH)

OH als Reaktionspartner des HO_x -Abbauzyklus dominiert in der unteren Stratosphäre und in Höhen über 45 km. Eine detaillierte HO_x -Chemie zusammen mit bisher durchgeführten Messungen und den daraus resultierenden Chemiemodellen findet man in [5].

Ein Quellgas für die Bildung von OH ist unter anderem H_2O . Wasser dient auch als Reservoirgas für OH . Eine wichtige Reaktion, die zum Abbau von OH beiträgt, ist die Umwandlung mit HO_2 zu Wasser



Das Verhältnis der Radikale OH und HO_2 ist durch die schnelle Umwandlung zwischen HO_2 und OH bestimmt



Die Lebensdauer von OH in der mittleren Atmosphäre liegt dadurch im Sekundenbereich, so dass Transportprozesse keine Auswirkungen haben. Durch die kurze Lebensdauer der OH -Radikale ist der OH -Gehalt vorwiegend durch den Sonnenzenitwinkel bestimmt, das heißt insbesondere, dass um die Mittagszeit die höchsten OH -Konzentrationen zu finden sind.

2.2.2 Spektroskopische Eigenschaften von OH im fernen Infrarot (FIR)

OH ist eine zweiatomige Verbindung, bei der der Sauerstoff und der Wasserstoff über ein ungepaartes Elektron gebunden sind. Durch dieses Elektron ist OH stark reaktiv (Radikal). Für die

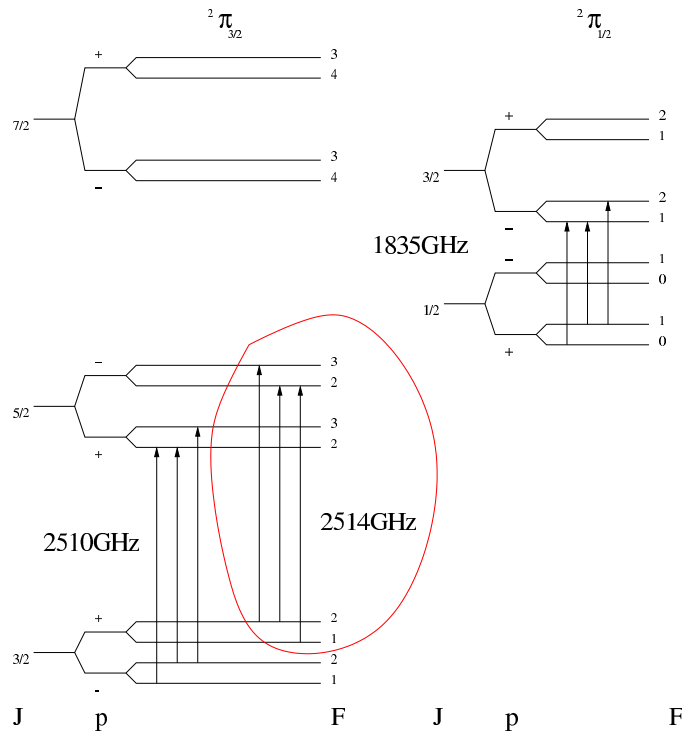


Abbildung 2.2: Energieniveau-Diagramm der niedrigsten Rotationszustände bei OH (die angekreisten Übergänge werden mit THOMAS beobachtet)

Beobachtung von OH in der mittleren Erdatmosphäre eignet sich besonders das FIR. OH zeigt in diesem Spektralbereich starke Rotationsübergänge und eine mögliche Interferenz mit Linien von anderen atmosphärischen Bestandteilen ist sehr gering.

Der Gesamtdrehimpuls des OH -Radikales ist im Grundzustand durch den Bahndrehimpuls und den Spin des ungepaarten Elektrons bestimmt. Die Kopplung des Drehimpulses des Moleküls mit dem Bahn- und dem Spindrehimpuls des Elektrons zu einem Gesamtdrehimpuls J führt zur sog. Λ -Dopplung, der Aufspaltung der Energieniveaus des starren Rotators in zwei Energieniveaus. Durch das magnetische Moment des Wasserstoffatoms ist jedes dieser Niveaus wiederum zweifach aufgespalten (Hyperfeinstruktur). Die erlaubten Übergänge der Dipolwechselwirkung führen zu jeweils zwei Linien-Triplets im Spektrum von OH (Abbildung 2.2 und 2.3).

Da im FIR die H_2O -Absorption sehr stark ist, kann das OH nur in Höhenbereichen mit geringem H_2O -Gehalt, wie zum Beispiel oberhalb der Tropopause, beobachtet werden. Man benötigt daher für die Beobachtung von OH im FIR hochfliegende Flugzeuge, Ballons oder Satelliten.

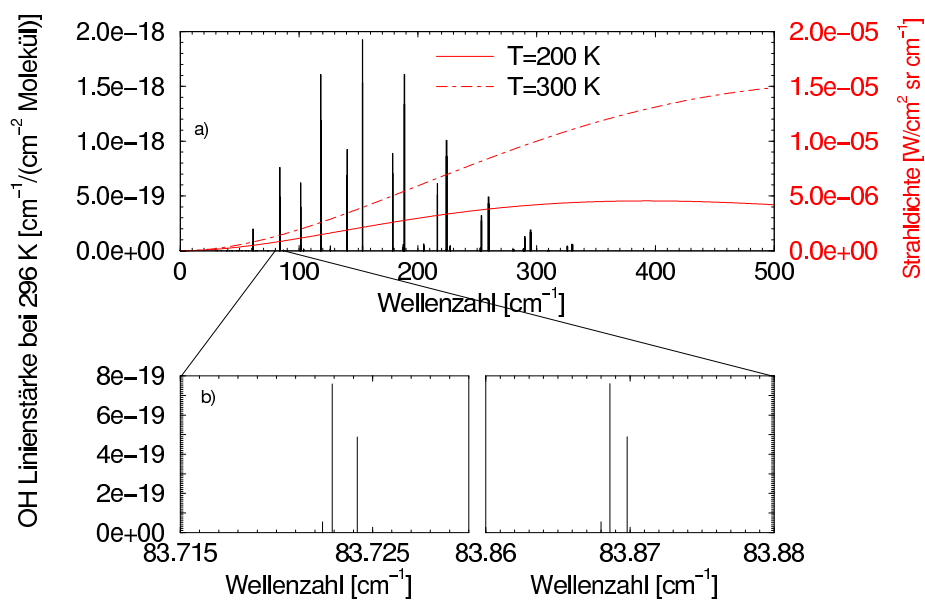


Abbildung 2.3: a) Die Linienstärken der OH -Übergänge im FIR (links), nichtresonanter Kontinuumsbeitrag (rechts); b) Aufspaltung der OH -Übergänge in zwei Triplets

Kapitel 3

Methoden zur Untersuchung der Atmosphäre

Die quantitative Beschreibung der Entwicklung der Erdatmosphäre erfordert Modelle, die die Chemie und die Dynamik der Atmosphäre berücksichtigen. Voraussetzung für den Entwurf und die Validierung dieser Modelle ist eine möglichst genaue Kenntnis des Zustands der Atmosphäre. Für die Dynamik ist es wichtig, diesen Zustand über gewisse Zeiträume zu messen. Dies beinhaltet genaues Wissen über die räumliche Verteilung von einzelnen chemischen Komponenten der Atmosphäre und die Kenntnis der Temperatur und des Drucks in der jeweiligen Atmosphärenschicht. Zur Bestimmung dieser Größen existieren zahlreiche Methoden, die sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilen lassen: Zum einen in die sogenannten *In-Situ-Messverfahren*, bei denen die Messung direkt an dem Ort durchgeführt wird, an dem die jeweilige Größe bestimmt werden soll, zum anderen in die *Fernerkundungsverfahren*, bei denen die zu untersuchende Messgröße aus jeder Entfernung durch Analyse der von ihr transmittierten, emittierten oder gestreuten Strahlung gemessen wird.

3.1 In-Situ-Messverfahren

Die Techniken, die die Messgrößen direkt an der Stelle des Messinstruments bestimmen, werden In-Situ-Messverfahren genannt. Es wurden z. B. zahlreiche Messinstrumente entwickelt, die sich die von der Sonne [1] oder von einem Laser [30, 25] angeregte UV-Fluoreszenz der Komponenten der Atmosphäre zu Nutze machen. Die Messinstrumente wurden von einem Ballon, einem hochfliegendem Flugzeug oder einer Rakete getragen. Größter Nachteil bei einem Flugzeugexperiment ist die relativ geringe Flughöhe, die mit einem Flugzeug erreicht werden kann; sie reicht maximal bis zur unteren Stratosphäre, was einer Höhe von etwa 20 km entspricht [23 und 34]. Die typische für einen Ballon erreichbare Flughöhe beträgt dagegen bereits 38 km. Bei einem Messinstrument, das mit einer Rakete transportiert wird, können Höhen bis zu 70 km erreicht werden.

In-Situ-Verfahren sind im Allgemeinen durch eine sehr gute Höhenauflösung gekennzeichnet.

Als Nachteile besitzen In-Situ-Messverfahren eine räumliche Limitierung. Bei Ballon- und Raketenexperimenten kommt dazu die Abhängigkeit von den Wetterbedingungen.

3.2 Fernerkundung der Erdatmosphäre

Die Fernerkundung beruht auf der Analyse der aus der Atmosphäre kommenden transmittierten, emittierten oder gestreuten elektromagnetischen Strahlung. Sie bietet den Vorteil, dass die zu

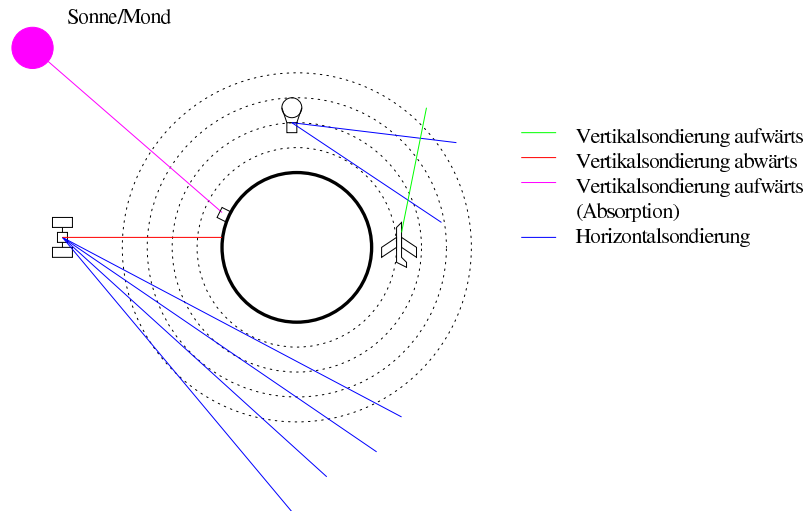


Abbildung 3.1: Sondierungsarten in der Atmosphäre

untersuchenden Höhenbereiche aus der Ferne, das heißt berührungslos, beobachtet werden können. Man unterscheidet *aktive* und *passive Fernerkundungsmethoden*. Bei aktiver Fernerkundung wird die Atmosphäre mit einer Quelle (z. B. Laser) beleuchtet und das aus der Beleuchtung resultierende Signal wird analysiert.

Bei passiver Fernerkundung beobachtet man die Strahlung, die von der Atmosphäre emittiert, transmittiert oder gestreut wird, wobei die Quellen für die Strahlung die thermische Emission der Atmosphäre, die Sonne, der Mond oder die Erdoberfläche sind. Ein weiterer Vorteil der passiven Methode ist, dass die Messung die Atmosphäre nicht beeinflusst. Die Strahlung wird in der Regel mit Hilfe von Spektrometern analysiert.

Je nach Beobachtungsgeometrie unterscheidet man verschiedene Methoden der Sondierung und zwar *Vertikalsondierung* und *Horizontalsondierung* (Abbildung 3.1). Bei *Vertikalsondierung aufwärts* misst man mit dem Spektrometer nach oben in Richtung Weltraum. *Vertikalsondierung abwärts* bedeutet, dass die Blickrichtung nach unten auf die Erde gerichtet ist. Bei *Horizontalsondierung* (*limb sounding*) wird an der Erde vorbei beobachtet. Für die Untersuchung der Stratosphäre benötigt man bei den letzten beiden Verfahren Satelliten oder hochfliegende Ballons, da sich der Beobachter oberhalb der zu untersuchenden Höhen befinden muss. Diese Methode ist dadurch charakterisiert, dass das Messsignal, bevor es das Spektrometer erreicht, mehrere Atmosphärenschichten durchläuft. Die im Signal erhaltene Höheninformation wird dann mit speziellen mathematischen Verfahren (*Inversionsrechnung* [27]) aus der Form den Spektren gewonnen.

Bei der Horizontalsondierung werden die einzelnen Schichten der Atmosphäre abgetastet, indem unter verschiedenen Beobachtungswinkeln an der Erde vorbei nach unten beobachtet wird. Zu jedem Blickwinkel gehört eine sog. *Tangentenhöhe*, die den Abstand desjenigen Punktes auf dem Sichtstrahl zur Erdoberfläche angibt, der dem Erdmittelpunkt am nächsten ist. Teilt man die Erdatmosphäre in Kugelschalen einer bestimmter Dicke ein, so gehört zu der Tangentenhöhe auch eine *Tangentenschicht*, das heißt, eine Schicht, in der der Tangentenpunkt liegt. Bei geeigneter Wahl der Schichten legt der Sichtstrahl in der Tangentenschicht den längsten Weg zurück. Der Vorteil der Horizontalsondierung gegenüber der Vertikalsondierung liegt darin, dass durch die langen Absorptions- bzw. Emissionswege in der Tangentenschicht sehr viel größere Signale gemessen werden können.

3.3 Emission und Absorption

In diesem Abschnitt wird auf die Besonderheiten der *Vertikalsondierung aufwärts*, speziell im Hinblick auf die Emissions- und Absorptionsmessungen, eingegangen. Beide Methoden werden in dieser Arbeit angewandt. Das von einem Spektrometer gemessene Signal besteht prinzipiell aus *resonanten* und *nichtresonanten* Beiträgen.

3.3.1 Resonante Absorption

Aus der Quantenmechanik ist bekannt, dass die Energiezustände eines Moleküls diskret sind. Die Absorption- bzw. Emissionslinien entsprechen den erlaubten Übergängen zwischen den Energiezuständen. Die natürliche Linienverbreiterung solcher Linien ist im Allgemeinen im Vergleich zu anderen Einflüssen in der Atmosphäre vernachlässigbar:

1. Druckverbreiterung

Die Linienprofilfunktion der Druckverbreiterung ist durch die Verkürzung der Lebensdauer eines angeregten Zustandes durch Stöße mit anderen Molekülen bedingt und hat die Form einer *Lorentz-Kurve*. Die Halbwertsbreite ist direkt proportional dem Druck.

2. Doppler-Verbreiterung

Der Doppler-Effekt bei der Bewegung der Moleküle bewirkt, dass die Absorptionslinie zusätzlich verbreitert wird. Die Linienprofilfunktion der Dopplerverbreiterung ist eine *Gauß-Funktion*. Die Halbwertsbreite ist direkt proportional zur Wurzel der Temperatur.

3. Voigt-Profil

Druck- und Dopplerverbreiterung treten im Allgemeinen gleichzeitig auf. Die Überlagerung beider Effekte lässt sich durch Faltung der beiden Profilkfunktionen beschreiben und resultiert im *Voigt-Linienprofil*.

3.3.2 Nichtresonante Kontinuumsabsorption

Die additiven nichtresonanten Beiträge zum Absorptionskoeffizienten nennt man die *Kontinuumsabsorption*. Diese ist im Gegensatz zu der resonanten Absorption durch eine nur schwache Frequenzabhängigkeit charakterisiert. Die einzelnen Beiträge lassen sich in der Erdatmosphäre in *H₂O*-, *N₂*-, *O₂*- und *CO₂*-*Kontinuum* einteilen. Sie hängen (abgesehen von der schwachen Frequenzabhängigkeit) nur von der Temperatur und dem Druck in der Atmosphäre ab. Das *H₂O*-Kontinuum ist zusätzlich direkt proportional zum Quadrat des Wassergehalts in der Atmosphäre. Die Beiträge von *O₂* und *CO₂* sind im FIR gegenüber dem Beitrag vom *N₂* vernachlässigbar klein [3].

Teil II

Der experimentelle Aufbau

Kapitel 4

Heterodynspektrometer

Wie in den vorherigen Abschnitten erwähnt, ist bei der Vertikalsondierung der Atmosphäre im FIR die gesamte Höheninformation in der Linienform des Spektrums kodiert. Für solche Messungen ist ein Spektrometer nötig, dessen Frequenzauflösung weit unter der Linienbreite liegt. Solche Anforderungen werden von einem Heterodynspektrometer sehr gut erfüllt.

In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise des 2,5 THz-Heterodynsystems *THOMAS* („Tera Hertz OH Measurement Airborne Sounder“) beschrieben, das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen im Forschungsflugzeug *FALCON* eingesetzt wird.

4.1 Aufbau und Funktionsweise des Heterodynspektrometers THOMAS

Das Funktionsprinzip eines Heterodynspektrometers ist prinzipiell vergleichbar mit dem eines konventionellen Radioempfängers. Da das Spektrometer im Gegensatz zum Radioempfänger elektromagnetische Strahlung in einem wesentlich höheren Frequenzbereich (THz-Bereich) detektieren soll, wird das untersuchte Signal gleich nach dem Empfang durch Mischung mit dem Signal eines sog. Lokaloszillators (LO) an einem nichtlinearen Bauelement in den GHz-Bereich transformiert und anschließend weiterbearbeitet.

In Abbildung 4.1 ist der Aufbau des Heterodynspektrometers schematisch dargestellt [21], [31]. Es handelt sich hierbei um ein zweifaches Heterodynsystem. Die Entwicklung der wesentlichen Komponenten, wie FIR-Laser, CO_2 -Laser und Diplexer geht auf Arbeiten des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn zurück.

Strahlung aus der Atmosphäre wird durch ein Fenster aus Silizium mit einer Antireflexionsschicht aus Polyethylenfolie in das Innere des Flugzeugs eingekoppelt [7]. Ein erster motorgetriebener Umlenkspiegel ermöglicht es, den Empfänger auf unterschiedliche Strahlungsquellen auszurichten. Zur Kalibrierung des Spektrometers werden zwei thermische Strahlungsquellen unterschiedlicher bekannter Temperatur benötigt, die als schwarze Strahler fungieren und bei Raumtemperatur bzw. 77 K abstrahlen. Als emittierende Oberfläche dient Ecosorb¹. Für Absorptionsmessungen gegen die Sonne ist eine dritte Quelle notwendig. Dabei handelt es sich um einen elektrisch auf 800 K aufgeheizten Körper (Metall). Der gleiche Spiegel ermöglicht außerdem den Empfang atmosphärischer Signale unter verschiedenen Vertikalwinkeln. Der zweite Umlenkspiegel wurde für den „*sun tracker*“ gebaut und variiert den Empfangswinkel in der Horizontalebene.

¹Ecosorb ist ein im FIR-Bereich hochabsorbierendes Material.

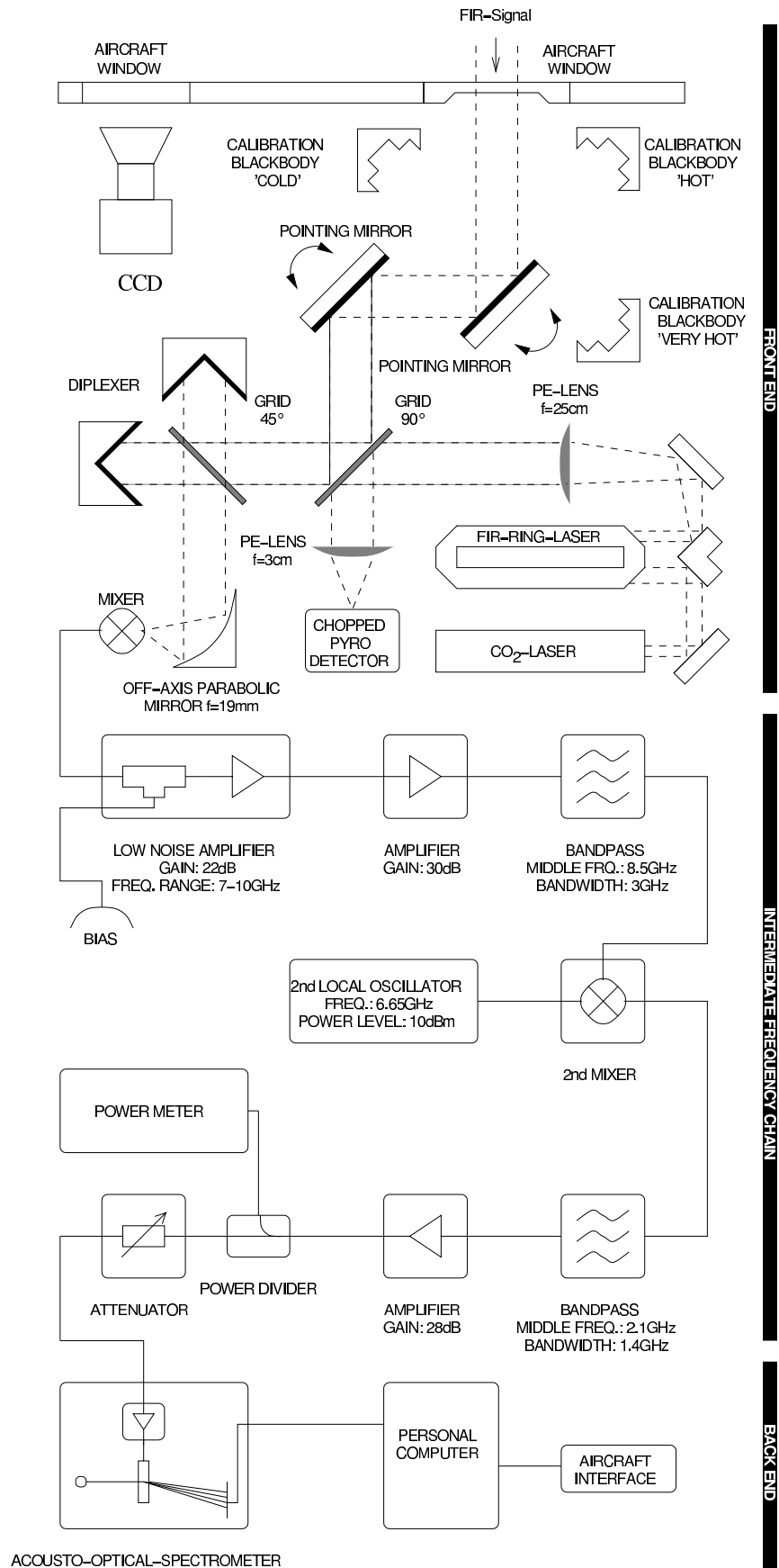


Abbildung 4.1: Aufbau des Heterodynspektrometers THOMAS

4.1. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES HETERODYNSPEKTROMETERS THOMAS27

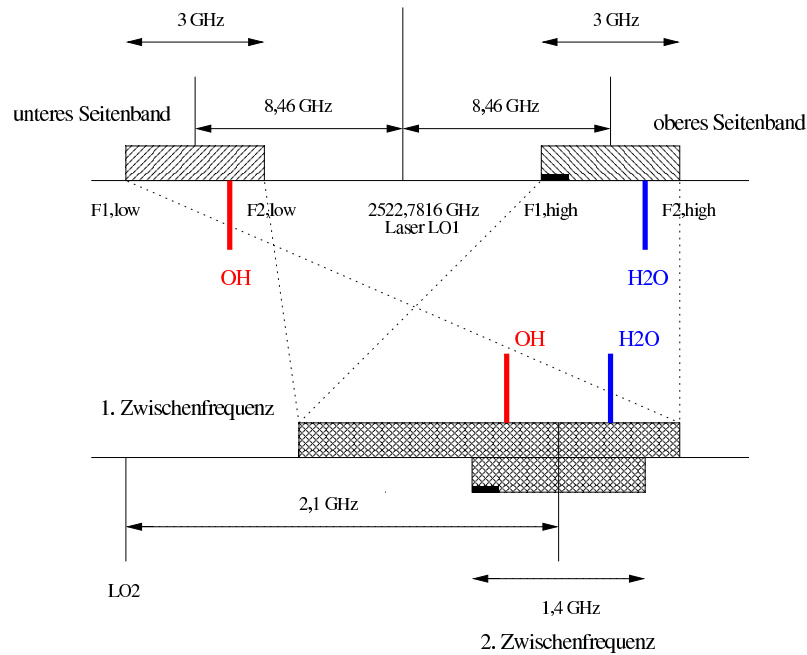


Abbildung 4.2: Die zweifache Frequenztransformation im Heterodynspektrometer THOMAS

Als Lokaloszillator dient ein Methanol-FIR-Ringlaser, der von einem CO_2 -Laser gepumpt wird. Der FIR-Laser liefert eine Ausgangsleistung von etwa 10 mW; der CO_2 -Laser liefert eine Leistung von bis zu 25 W. Die Strahlung des Lokaloszillators und das atmosphärische Signal werden in einem *Martin-Puplett-Interferometer*, welches als *Diplexer* arbeitet, räumlich kohärent und polarisiert überlagert (siehe Anhang B). Ein *Off-Axis-Parabolspiegel* fokussiert die Strahlung anschließend in den Mischer. Das hier verwendete Mischerelement ist eine Schottky-Diode, in die die Strahlung mit Hilfe einer 4λ -Whisker-Antenne eingekoppelt wird. Die Schottky-Diode ist ein nichtlineares Bauelement. Beim Mischen von zwei Signalen, dem Lokaloszillatorsignal der Frequenz f_{LO} und dem Atmosphärensignal der Frequenz f_S , entsteht ein Signal, das die Linearkombinationen von beiden Frequenzen enthält:

$$|n f_{LO} \pm m f_S| \quad (4.1)$$

$n, m = 0, 1, 2..$

Die Anteile mit $n, m > 1$ sind schwach. Mit Hilfe eines Filters werden nur die Signale mit der *Zwischenfrequenz*

$$f_{IF} = |f_{LO} - f_S| \quad (4.2)$$

weiterverarbeitet. Damit wird das Atmosphärensignal mit einer Frequenz im THz-Bereich auf das Signal mit Zwischenfrequenz im GHz-Bereich transformiert.

Bei dieser Methode empfängt man Signale sowohl aus dem oberen ($f_S - f_{LO}$) als auch dem unteren ($f_{LO} - f_S$) Seitenband. Man spricht im Gegensatz zu einem Einzelseitenband-Empfänger, bei dem eines der Seitenbänder (z. B. durch einen Seitenbandfilter) ausgeblendet wird, von einem Doppelseitenband-Empfänger.

Das frequenzumgesetzte Signal wird in einem rauscharmen *HEMT*²-Verstärker, der bei Raumtemperatur arbeitet, um ca. 20 dB im Pegel angehoben. Eine nachgeschaltete weitere Verstärkerstufe erhöht den Signalpegel des Zwischenfrequenzsignals (ZF) um weitere 30 dB. In der zweiten ZF-Stufe wird das Signal mittels eines Bandpassfilters mit einer Bandbreite von 3 GHz bei einer Mittenfrequenz von 8,5 GHz begrenzt. In einem handelsüblichen Mischer wird der Frequenzbereich der ersten ZF-Stufe auf die Bandmitte der nachfolgenden Signalverarbeitung angepasst. Der zweite Lokaloszillator ist ein kommerzieller Frequenzsynthesizer. Die Arbeitsfrequenz der zweiten ZF-Stufe von 2,1 GHz bei einer Bandbreite von 1,4 GHz wird durch einen weiteren Bandpass und den zweiten Lokaloszillator bestimmt. Nach einer weiteren Verstärkung des Signals um 28 dB steht das Signal zur spektralen Analyse zur Verfügung. Die Leistung des Signals in gesamtem Empfangsbereich wird mit einem „Powermeter“ gemessen. Die spektrale Untersuchung der empfangenen Strahlung aus der Atmosphäre erfolgt durch ein akustooptisches Spektrometer (AOS)[15].

Ein Heterodynsystem transformiert das Signal im Frequenzbereich, ohne die spektrale Information zu verändern. Die komplette Frequenztransformation einschließlich der AOS-Abbildung auf Frequenzkanäle ist dann:

$$i_{AOS}(f_s) = \begin{cases} \frac{f_s - f_{LO1} - f_{LO2} - q}{k} & \text{falls } f_s > f_{LO1}; \text{ oberes Seitenband} \\ \frac{f_{LO1} - f_s - f_{LO2} - q}{k} & \text{falls } f_s < f_{LO1}; \text{ unteres Seitenband} \end{cases} \quad (4.3)$$

i_{AOS}	AOS-Frequenzkanal
$f_{LO1} = 2522,7816 \text{ GHz}$	Frequenz des ersten Lokaloszillators
f_{LO2}	Frequenz des zweiten Lokaloszillators
$q = 2,8005 \text{ GHz}$	AOS-Parameter (siehe Anhang A)
$k = -693,539 \cdot 10^{-6} \text{ GHz}$	AOS-Parameter (siehe Anhang A)

In Abbildung 4.2 ist die spektrale Verteilung in Bezug auf das hier gemessene Atmosphärensignal gegeben. Die OH-Linien liegen im unteren Band (2512,8216 GHz - 2515,8216 GHz, siehe Abb. 4.2):

$$f_{\text{Triplet}} = 2514,3 \text{ GHz} = 83,8680 \text{ cm}^{-1}$$

Im oberen Band (2529,7416 GHz - 2532,7416 GHz) liegt eine Wasserlinie:

$$f_{\text{H}_2\text{O}} = 2531,9172 \text{ GHz} = 84,45567 \text{ cm}^{-1}$$

Da die Wasserlinie wesentlich breiter als die OH-Linien ist, kann man bei der Inversionsrechnung die Anteile aus dem oberen und dem unteren Band trennen.

4.2 Das akustooptische Spektrometer

Die spektrale Analyse eines Signals mit Hilfe eines AOS beruht auf dem Effekt der *akustooptischen Wechselwirkung* [14 und 32]. Damit wird die Wechselwirkung zwischen einer Schallwelle in einem Medium und kohärenter Lichtstrahlung bezeichnet. Das Signal erzeugt mittels eines *Piezoelements* eine fortschreitende Schallwelle in einem transparenten Kristall (*Braggzelle*). Diese Schallwelle induziert ein Brechungsindexgitter (*elastooptischer Effekt*). Um eine Reflexion der Schallwelle am Ende des Kristalls zu verhindern, befindet sich dort ein sogenannter akustischer *Sumpf*, der die mechanische Welle vollständig absorbiert.

²HEMT - High Electron Mobility Transistor

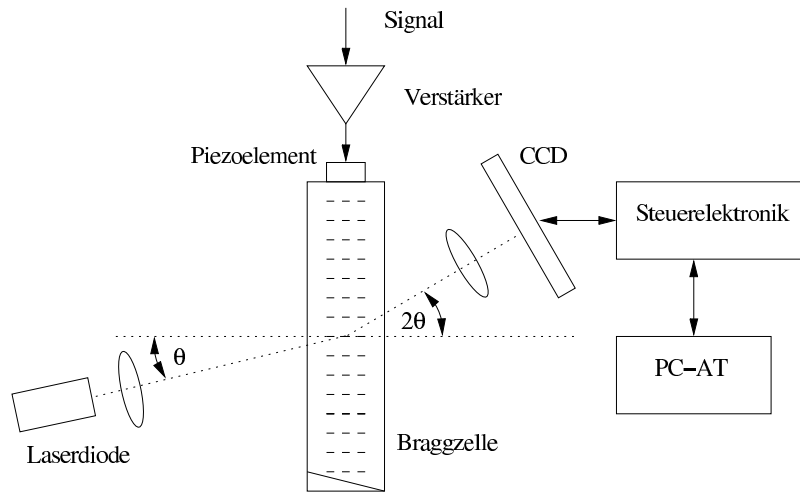


Abbildung 4.3: Braggzelle

Die Gitterkonstante des fortschreitenden Brechungsindex-Gitters kann aus der Schallgeschwindigkeit in der Braggzelle und der Signalfrequenz berechnet werden:

$$L = \frac{v}{f} \quad (4.4)$$

- L Gitterkonstante des Brechungsindexgitter = Wellenlänge der Schallwelle im Kristall
- v Schallgeschwindigkeit im Kristall
- f Frequenz des Signals

An dem so erzeugten Gitter ist die Beugung von kohärenter Lichtstrahlung (*Laserdiode*) nach *Bragg* möglich. Für die Beugung erster Ordnung gilt:

$$\sin(\Theta) = \frac{\lambda}{2L} \quad (4.5)$$

- Θ Braggwinkel
- λ Wellenlänge des Laserlichts

Für kleine Winkel Θ gilt:

$$\Theta \approx \frac{\lambda}{2L} = \frac{\lambda f}{2v} \quad (4.6)$$

Somit ist der Ablenkwinkel direkt proportional zur Frequenz des Signals.

Betrachtet man die Intensität der in erster Ordnung gebeugten Strahlung, so ergibt sich für niedrige Leistungen der Schallwelle und kleine Ablenkwinkel eine direkte Proportionalität zur Signalleistung [14, 28]:

$$B(f) \propto S(f) = S\left(\frac{2v}{\lambda}\Theta\right) \quad (4.7)$$

$B(f)$ spektrale Leistungsdichte des Eingangssignals
 $S(f)$ spektrale Leistungsdichte des gebeugten Strahls erster Ordnung

Eine Messung der Leistungsdichte S in Abhängigkeit von Θ entspricht einer spektralen Analyse des Eingangssignals $B(f)$. Dafür wird die gebeugte Strahlung mittels einer Linse auf eine Photodetektorzeile (CCD - „Charge Coupled Device“) fokussiert. Im Idealfall hat der gebeugte Strahl eines monochromatischen Signals ein *gaußförmiges* Intensitätsprofil, das maßgeblich die Frequenzauflösung des gesamten Heterodynspektrometers (*ILS - Instrumental Line Shape*) bestimmt.

4.3 Messprinzip

Das zu messende Signal setzt sich aus thermischer Rauschstrahlung und der Linienstrahlung des zu untersuchenden Moleküls zusammen. Zu dem empfangenen Signal addiert sich das Rauschen des Empfängers, das Rauschen der Mischdiode und der nachgeschalteten Verstärker sowie das Rauschen, das durch die thermische Eigenemission der optischen Komponenten verursacht wird. Diese zusätzlichen Rauschbeiträge kann man zusammenfassen in einen Beitrag von einem fiktivem schwarzem Strahler der Temperatur T_{sys} . Diese Temperatur wird als *Systemrauschtemperatur* bezeichnet.

Nach dem *Planckschen Strahlungsgesetz* ergibt sich für die spektrale Strahlungsleistungsdichte dP eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur T in einem Frequenzintervall df zu³:

$$dP(f, df, T) = \frac{hf}{\exp(\frac{hf}{kT}) - 1} df \quad (4.8)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$	Boltzmann-Konstante
$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Planck'sche Konstante
T	Temperatur
df	infinitesimales Frequenzintervall

Für die Rauschleistung einer thermischer Quelle mit der Temperatur T im Frequenzband B ergibt sich:

$$P(f, B, T) = \int_B \left(\frac{hf}{\exp(\frac{hf}{kT}) - 1} \right) df \quad (4.9)$$

Im FIR-Bereich kann man sowohl die *Rayleigh-Jeans Näherung*⁴ als auch das *Wien'sches Gesetz*⁵ nicht anwenden. Zu Lösung von Gleichung 4.9 betrachtet man die folgende Umformung:

$$\frac{hf}{\exp(\frac{hf}{kT}) - 1} = \frac{hf/kT}{\exp(\frac{hf}{kT}) - 1} kT = C_{pr} kT \quad (4.10)$$

$T' = C_{pr} T$ korrigierte Temperatur

Den Korrekturfaktor $C_{pr} = \frac{hf/kT}{\exp(\frac{hf}{kT}) - 1}$ kann man für hier betrachteten Frequenzband $B = f_{upper} - f_{lower}$ (ein Frequenzkanal vom AOS) als konstant annehmen:

³Der Empfang nur einer Polarisation wurde mit einem zusätzlichem Faktor 1/2 berücksichtigt.

⁴Rayleigh-Jeans: $\frac{hf}{kT} \ll 1 \Rightarrow \exp(\frac{hf}{kT}) \approx 1 + \frac{hf}{kT}$

⁵Wien'sches Gesetz: $\frac{hf}{kT} \gg 1 \Rightarrow \left\{ \exp(\frac{hf}{kT}) - 1 \right\}^{-1} \approx \exp(-\frac{hf}{kT})$

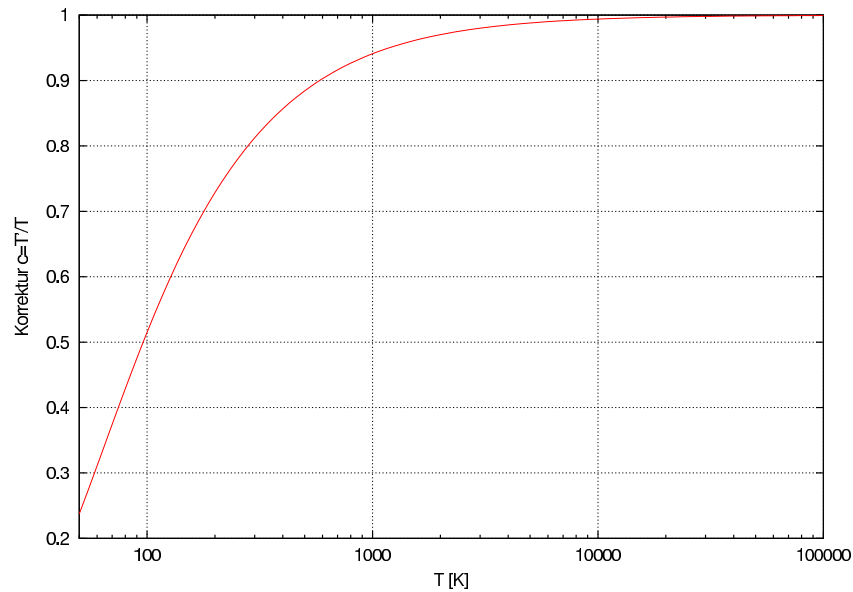


Abbildung 4.4: Der Korrekturfaktor C_{pr} als Funktion der Temperatur für die Frequenz $f_{Triplet} = 2514,3 \text{ GHz}$

$$P(f, B, T) = \int_{f_{lower}}^{f_{upper}} kT' df = kT' (f_{upper} - f_{lower}) = kT' B \quad (4.11)$$

Die vom Spektrometer detektierte Leistungsdichte S ergibt sich dann zu:

$$S = c \cdot kB(T'_{sys} + T'_{sig}) \quad (4.12)$$

- T_{sys} Rauschtemperatur des Systems
- T_{sig} Rauschtemperatur der von der Antenne detektierten Quelle
- c Proportionalitätskonstante, die den Einfluss des Spektrometers beinhaltet

4.3.1 Radiometrische Kalibrierung

Zur Kalibrierung der Messungen wird die sogenannte „HOT-COLD“-Methode angewendet. Bei dieser Methode werden Signale aus drei Quellen zyklisch gemessen. Die Eigenschaften von zwei Referenzquellen („HOT“ und „COLD“) werden als bekannt vorausgesetzt. In der Regel betrachtet man die Quellen als schwarze Strahler bei zwei verschiedenen Temperaturen. Die Temperaturen dieser Referenzstrahler werden gemessen. Die dritte Quelle ist das zu messende atmosphärische Signal („SIGNAL“).

Aus den Beziehungen

$$S_{sig} = c \cdot kB(T'_{sys} + T'_{sig}) = c \cdot P_{sig} \quad (4.13)$$

$$S_{hot} = c \cdot kB(T'_{sys} + T'_{hot}) = c \cdot P_{hot} \quad (4.14)$$

$$S_{cold} = c \cdot kB(T'_{sys} + T'_{cold}) = c \cdot P_{cold} \quad (4.15)$$

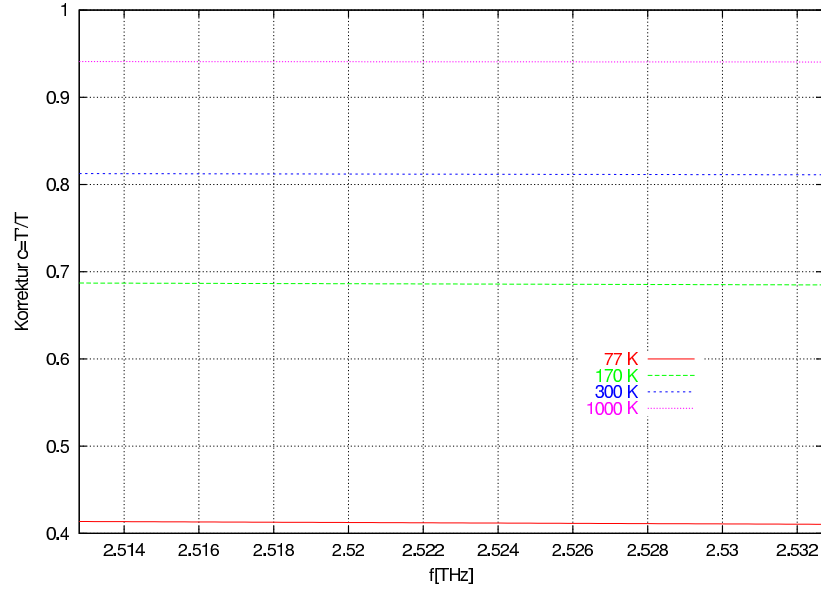


Abbildung 4.5: Der Korrekturfaktor C_{pr} als Funktion der Frequenz für verschiedene Temperaturen

kann man T_{sig} ermitteln:

$$T'_{sig} = \frac{T'_{hot} - T'_{cold}}{S_{hot} - S_{cold}} (S_{sig} - S_{cold}) + T'_{cold} \quad (4.16)$$

In [5] wurde eine genaue Analyse bezüglich der Fehlerfortpflanzung von Gleichung 4.16 durchgeführt. Nach dieser Analyse ergibt sich für den Messfehler:

$$\Delta T'_{sig} = \sqrt{\frac{1}{B} \left(\frac{x^2}{\tau_{sig}} + \frac{y^2}{\tau_{cold}} + \frac{z^2}{\tau_{hot}} \right)} \quad (4.17)$$

und für die Messzeiten τ der verschiedenen Quellen:

$$\tau_{sig}/\tau_{hot}/\tau_{cold} = x/y/z \quad (4.18)$$

mit

$$x^2 = (T'_{sys} + T'_{sig})^2 \quad (4.19)$$

$$y^2 = \left(\frac{T'_{sig} - T'_{hot}}{T'_{hot} - T'_{cold}} (T'_{sys} + T'_{cold}) \right)^2 \quad (4.20)$$

$$z^2 = \left(\frac{T'_{sig} - T'_{cold}}{T'_{hot} - T'_{cold}} (T'_{sys} + T'_{hot}) \right)^2 \quad (4.21)$$

Für optimale Messzeiten und für den Fall, dass die Temperatur des gemessenen Signals zwischen den Temperaturen beider Kalibrierquellen liegt (*Interpolation*, Abbildung 4.6), ist die Messgenauigkeit gegeben durch [5]:

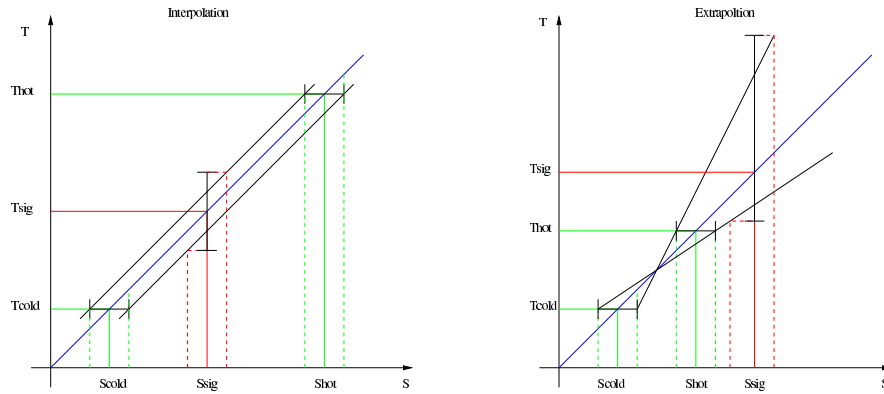


Abbildung 4.6: Symbolische Darstellung der Fehlerfortpflanzung bei Interpolation und Extrapolation

$$\Delta T'_{sig} = \sqrt{2} (T'_{sig} + T'_{sys}) \sqrt{\frac{1}{B \tau_{sig}}} \quad (4.22)$$

$$\tau_{sig} = \tau_{cold} + \tau_{hot} \quad (4.23)$$

Eine wichtige Schlussfolgerung für Absorptionsmessungen (falls T_{sig} nicht zwischen T_{hot} und T_{cold} liegt, *Extrapolation*, Abbildung 4.6) ist:

$$\Delta T'_{sig} = 2z \sqrt{\frac{1}{B \tau_t}}; T'_{cold} < T'_{hot} < T'_{sig} \quad (4.24)$$

$$\Delta T'_{sig} = 2y \sqrt{\frac{1}{B \tau_t}}; T'_{sig} < T'_{cold} < T'_{hot} \quad (4.25)$$

$$\tau_t = \tau_{sig} + \tau_{cold} + \tau_{hot} \quad (4.26)$$

In den letztgenannten Fällen ist die Unsicherheit der Temperatur des kalibrierten Spektrums größer als im Optimalfall (Gleichung 4.22).

In der Praxis werden die Messungen in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

„HOT-SIGNAL-COLD-SIGNAL-HOT“

Mit dieser Sequenz werden die Kalibrierquellen doppelt verwendet, und für die optimalen Messzeiten gilt dann die Beziehung:

$$\tau_{sig} / \tau_{hot} / \tau_{cold} = x / 2y / 2z \quad (4.27)$$

4.3.2 Systemrauschtemperatur

Die Qualität des Empfängers wird durch die Angabe der Systemrauschtemperatur, beschrieben. Sie drückt die Empfindlichkeit des Systems aus. Man kann sie durch das Messen der beiden Kalibrierquellen „HOT“ und „COLD“ bestimmen. Aus der Gleichungen 4.14 und 4.15 kann die Rauschtemperatur des Systems berechnet werden:

$$T'_{sys} = \frac{T'_{hot} P_{cold} - T'_{cold} P_{hot}}{P_{hot} - P_{cold}} \quad (4.28)$$

Für die Temperatur $T_{sys} > 10000 K$ ist der Korrektur Faktor $C_{pr} \approx 1$ und damit $T'_{sys} \approx T_{sys}$.

Mit der so definierten Systemrauschtemperatur, kann man die Gleichung 4.16 umschreiben:

$$T'_{sig} = \frac{T'_{hot} - T'_{cold}}{P_{hot} - P_{cold}} P_{sig} - T_{sys} = R P_{sig} - T_{sys} \quad (4.29)$$

$$R = \frac{T'_{hot} - T'_{cold}}{P_{hot} - P_{cold}} \quad \text{Responsivität des Systems}$$

Kapitel 5

Optimierung und Erweiterung des Heterodynsystems

Als Grundlage für die Optimierung des Heterodynspektrometers THOMAS diente eine Fehleranalyse [5, 27], die im Rahmen der Flugkampagne *MAHRSI* durchgeführt wurde. Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Optimierungsmaßnahmen am Heterodynspektrometer beschrieben und die Folgen analysiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Heterodynsystem um zwei neue Messmethoden erweitert. Bei der ersten Methode werden gleichzeitig mehrere Emissionsspektren unter verschiedenen Vertikalwinkeln gemessen. Die so gewonnene zusätzliche Information soll die Inversionsrechnung erleichtern. Bei der zweiten Methode wird die von der Atmosphäre absorbierte Strahlung der Sonne gemessen. Man erwartet ein wesentlich besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis und dadurch „höhere Qualität“ der Messspektren.

5.1 Das Flugzeugfenster

Das Flugzeugfenster besteht aus einem keilförmigen Silizium-Einkristall, welcher mit einer Polyethylenfolie antireflex beschichtet wurde [7].

Die Valenzelektronen des Siliziums können von Photonen der Wellenlänge $\lambda < 1,1 \mu m$ über die Bandlücke in das Leitungsband gehoben werden. Sind die Elektronen im Leitungsband, so können sie Strahlung absorbieren und somit die Eigenschaften des Fensters ändern. Dieser Effekt wurde erstmals während der Messkampagne *MAHRSI* beobachtet. Wurde das Flugzeugfenster während der Messungen direkt mit Sonnenlicht bestrahlt, so zeigten die gemessenen Spektren gegenüber den Spektren, bei denen sich das Fenster auf der Schattenseite des Flugzeugs befand, eine deutlich erhöhte Basislinie.

Um diesen Effekt zu vermindern, wurde das Fenster neu beschichtet. Für die Beschichtung wurde eine schwarze Polyethylenfolie gewählt, die für den sichtbaren Bereich nicht transparent ist. Sie verhindert die Transmission von Photonen mit $\lambda < 1,1 \mu m$ in das Silizium. Allerdings ist die Effizienz dieser Maßnahme unter Laborbedingungen sehr schwer nachzuprüfen. Insbesondere erwies es sich als nicht realisierbar, das Fenster mit einer der Sonne äquivalenten Strahlungsquelle zu beleuchten. Im Labor wurde eine Hg-Lampe verwendet. Das Spektrum einer kalten Strahlungsquelle wurde sowohl mit einem beleuchteten als auch mit einem unbeleuchteten Fenster gemessen. Den Effekt¹ konnte man nur mit dem Fenster im ursprünglichen Zustand beobachten. Bei Verwendung des neubeschichteten Fensters konnte dagegen keine Abhängigkeit der Transmission von der Beleuchtungsstärke festgestellt werden.

¹Der Effekt „*Photon Induced Absorption*“ wird ausführlich in [5] und [8] behandelt.



Abbildung 5.1: Das Flugzeugfenster des DLR-Forschungsflugzeugs FALCON

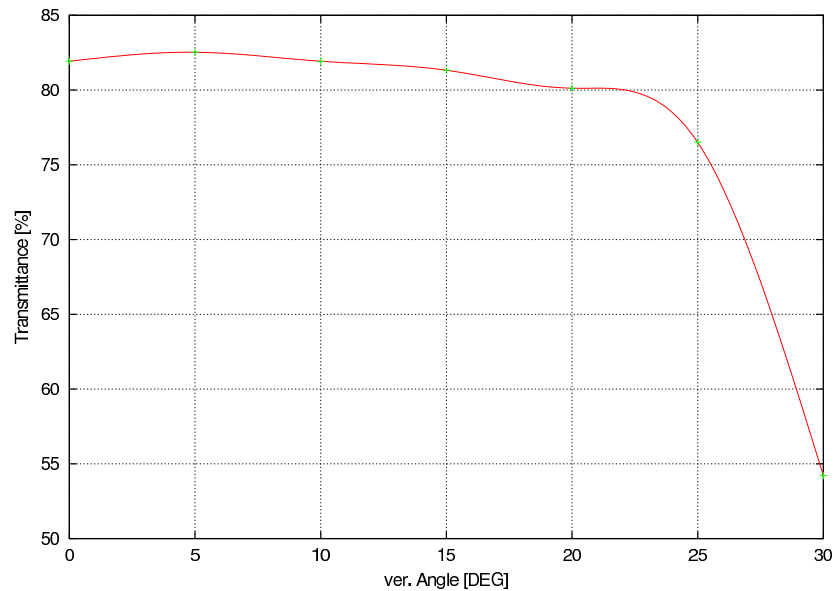


Abbildung 5.2: Die Transmission des Fensters in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel (Bodenmessung)

	Sonne	Schatten
Beginn	10 : 45	11 : 19
Ende	10 : 50	11 : 24
Blickwinkel	15,0°-15,8°	15,0°
T_{AOS}	126,6 K \pm 2,3 K	129,2 K \pm 3,0 K
$T_{POWERMETER}$	130,9 K \pm 2,5 K	123,3 K \pm 5,0 K

Tabelle 5.1: Vergleich der Höhe der Basislinie mit voll beleuchtetem Fenster und mit dem Fenster im Flugzeugschatten

Um die Wirkungsweise der neuen Beschichtung zu prüfen, sind Messungen der Messkampagne FARO vom 14.12.2000 geeignet. Um 10⁴⁵ Uhr wurde eine Absorptionsmessung gegen die Sonne begonnen. Naturgemäß wurde das Fenster bei dieser Messung voll beleuchtet. Gleichzeitig mit der Absorptionsmessung folgte auch eine „klassische“ Emissionsmessung mit einem Blickwinkel von etwa 2° über der Sonne. Der Empfangswinkel wurde mit der Sonne nachgeführt.

Um 11¹⁹ Uhr folgte der Rückflug nach Faro. Beim Rückflug wurde die Emission der Atmosphäre unter drei verschiedenen Winkeln gemessen (8°, 15° und 25° relativ zur Horizontebene). Bei diesem Flug lag das Fenster ganz im Schatten des Flugzeugs.

Bei beiden Messungen wurde die Flughöhe von 12470 m konstant gehalten (die Flughöhe beeinflusst die Temperatur der Basislinie). Für den Vergleich beider Messungen ist es wichtig, dass diese bis auf die Beleuchtung von der Sonne unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurden.

Zur Auswertung wurde folgendes Verfahren verwendet:

1. Es ist nicht notwendig die vollständigen Spektren zu vergleichen; vielmehr ist es wichtig, die Höhe der Basislinie zu kennen. Dazu wurden die Messwerte von allen AOS-Kanälen zu einem Frequenzkanal zusammengefasst und mit der Beziehung 4.16 die Atmosphärentemperatur („Brightness Temperature“) berechnet.
2. Für jede Messsequenz i wurde die Temperatur T_i berechnet.
3. Aus den Temperaturen T_i wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet.
4. Das gleiche Verfahren wurde auch auf die mit dem Powermeter (siehe Abbildung 4.1) bestimmten Werte angewandt.
5. Aus der kombinierten Emissions-Absorptionsmessung wurde nur der Zeitraum von 10⁴⁵ Uhr bis 10⁵⁰ Uhr ausgewertet, in dem die Sonne etwa 15° über dem Horizont stand.

Die äußeren Bedingungen (Sonnenstand, Uhrzeit, etc.) und die Ergebnisse der Messung sind in der Tabelle 5.1 zusammengefasst. Beide Methoden (AOS und Powermeter) zeigen entgegengesetzte Abhängigkeiten². Die Abhängigkeit der Atmosphärentemperatur von der Beleuchtung des Fensters innerhalb der erreichten Messgenauigkeit ist trotz des „worst case“ (Sonne, Schatten) nicht nachzuweisen. Die in der Tabelle 5.1 aufgelisteten Werte zeigen, dass die neue Beschichtung richtig funktioniert, denn die entsprechenden Bedingungen führten bei der MAHRSI Kampagne zur Differenz von etwa 30 K (siehe [5]).

Für die genaue Auswertung der Spektren (im „level-2-Prozess“) muss man auch den Fenstereinfluss berücksichtigen. In Abbildung 5.2 ist die Transmission des Flugzeugfensters in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (Vertikalwinkel) dargestellt. Diese Messung wurde bei eingebautem Fenster am Flugzeug durchgeführt. Im für die Messungen interessanten Bereich von 0° bis 20° liegt die Transmission bei 80% .

²Falls die Abhängigkeit der Atmosphärentemperatur von der Beleuchtung nicht beseitigt wäre, müssten die beiden Methoden ein gleiches systematisches Verhalten zeigen. Innerhalb von erreichter Messgenauigkeit ist es aber nicht nachzuweisen.

5.2 Ablenkspiegel

Ursprünglich wurde das Heterodynsystem *THOMAS* nur für die vertikale Sondierung konzipiert. Mit einem motorgesteuerten Spiegel wurde sowohl der vertikale Winkel eingestellt, als auch zwischen den Kalibrierquellen umgeschaltet. Messungen in Absorption gegen die Sonne („*sun tracking*“) erfordern jedoch auch eine Bewegungsfreiheit in der Horizontalebene. Zudem erwies sich die alte Steuereinheit für die Bewegung des Motors als ungeeignet, um Rollbewegungen des Flugzeugs während des Fluges auszugleichen.

Technisch ist es sehr schwierig, eine zweiachsige Bewegung des Ablenkspiegels zu realisieren, ohne größere mechanische Modifikationen am bestehenden System vornehmen zu müssen. Aus diesem Grund ist die Horizontalbewegung mittels eines weiteren Spiegels realisiert. Allerdings wurde das speziell konstruierte Flugzeugfenster ursprünglich nur für Vertikalsondierung entwickelt. Auf Grund der ovalen Form des Siliziumfensters (Abbildung 5.1) ist die Bewegungsfreiheit in horizontaler Richtung auf ca. 4° beschränkt. Folgende Gründe sprechen jedoch gegen eine komplette Neuentwicklung des Fensters:

1. Es ist technisch sehr schwierig, ein großflächiges Einkristall-Silizium-Fenster mit den erwünschten physikalischen Eigenschaften (Reinheit, Transmission, ..) zu realisieren.
2. Die Kabine des Forschungsflugzeugs *FALCON* wird auf Normaldruck gehalten. Das Fenster muss den Druckunterschied aushalten, so dass aus Sicherheitsgründen die Fläche des Fensters möglichst klein gehalten werden sollte.
3. Die Kosten für die Entwicklung eines neuen Fenster sind sehr hoch.

Um die Bewegungsfreiheit in der Horizontalebene nicht noch weiter zu beschränken, musste der Spiegel möglichst nahe am Fenster angebracht werden. Aus diesem Grund wurde der Strahlengang im Spektrometer verändert. Dies führte zwar nicht zu einer Verlängerung des optischen Weges, was wegen der Absorption von Strahlung durch die feuchte Luft von Bedeutung ist, es musste aber ein weiterer Spiegel eingebaut werden.

5.3 Zusätzliche Kalibrierquelle

Aus Kapitel 4.3.1 folgt, dass der Kalibrierungsfehler minimal ist, wenn die Strahlungstemperatur des Messsignals zwischen den Temperaturen beider Kalibrierquellen liegt. Die Kalibrierquelle „*HOT*“, die im Abschnitt 4.1 detailliert beschrieben wurde, ist nur für Emissionsmessungen geeignet, da die Temperatur dieser Strahlungsquelle für Absorptionsmessungen gegen die Sonne viel zu niedrig ist (Extrapolation, siehe Abschnitt 4.3.1). Um die Absorptionsspektren kalibrieren zu können, musste eine neue Kalibrierquelle mit höherer Temperatur entwickeln werden.

Im Folgenden wird die für das Heterodynsystem „sichtbare“ Temperatur der Sonne abgeschätzt. Der Temperaturabschätzung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

1. Die äquivalente Schwarzkörper-Temperatur der Sonnenoberfläche im FIR-Bereich ist ca. 4200 K (siehe [22, 24]).
2. Nach der Berücksichtigung der Transmission der Erdatmosphäre (berechnet mit dem Programm FASCOD, siehe [4] und Abbildung 5.4) beträgt die Sonnentemperatur etwa $T_{sun} = 4100\text{ K}$.
3. Die Empfangsgeometrie (Antennencharakteristik) des Heterodynspektrometers wurde vereinfacht und als eine „Boxfunktion“ (mit -3 dB Pegel vom Maximum) betrachtet.

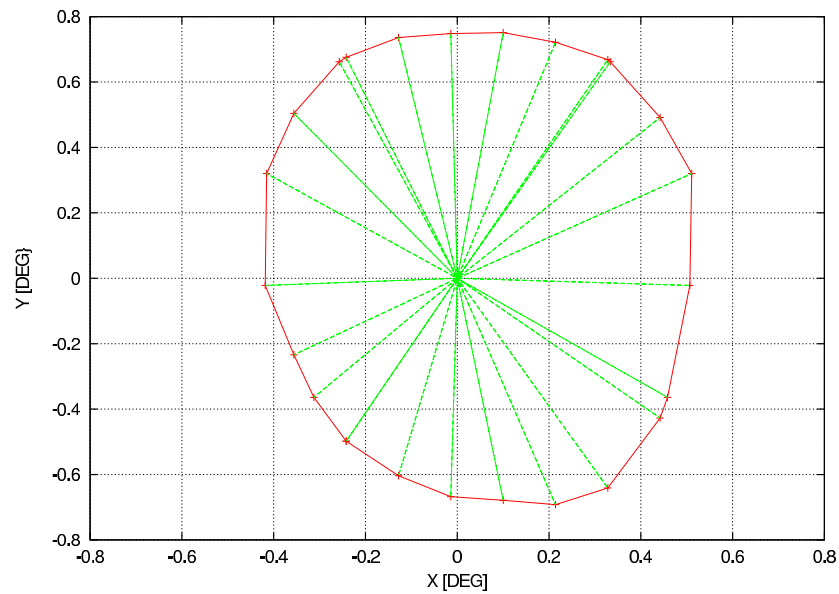
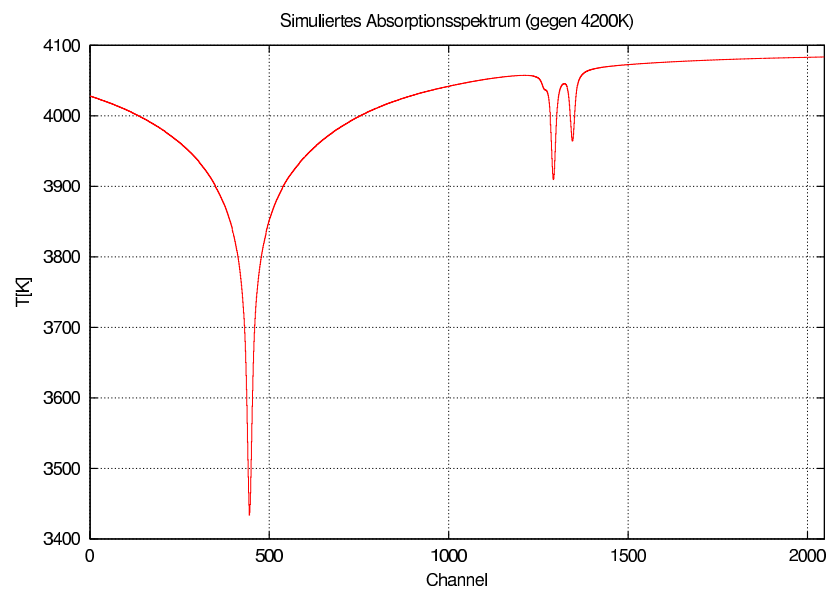


Abbildung 5.3: Antennennprofil T23#4 (1,30 m vom Pointingspiegel, -3 dB) [13, 19]

Abbildung 5.4: Simuliertes Absorptionsspektrum (H_2O und OH) gegen die Sonne bei einer Temperatur von 4200 K (FIR)

Der Winkeldurchmesser der Sonne beträgt für einen Beobachter auf der Erdoberfläche etwa $0,5^\circ$. In Abbildung 5.3 ist die gemessene Antennencharakteristik der Diode T23#4, die bei Absorptionsmessungen in Faro benutzt wurde, dargestellt. Die Fläche der Empfangsfunktion wurde numerisch als die Summe der dargestellten Dreiecken-Flächen berechnet:

$$A_{sun} = \frac{\pi d^2}{4} = 0,196^\circ\circ \quad (5.1)$$

$$d = 0,5^\circ$$

$$A_{antenne} = \sum_{i=1}^N A_i = 1,09^\circ\circ \quad (5.2)$$

N Anzahl von Dreiecken
 A_i die Fläche vom i -ten Dreieck

Die Temperatur der Sonne von der Erdoberfläche aus gesehen ist durch das Verhältnis der Fläche der Sonne zur Fläche der Antennencharakteristik bestimmt:

$$T_{sig,sun} = T_{sun} \frac{A_{sun}}{A_{antenne}} = 736 \text{ K} \quad (5.3)$$

Diese Beziehung, die von konstanter Antennenresponsivität ausgeht, zeigt, dass die Kalibrierquelle (300 K) für Absorptionsmessungen gegen die Sonne nicht geeignet ist. Stattdessen wurde eine zusätzliche Kalibrierquelle („VERY HOT“) mit einer Strahlungstemperatur von etwa 800 K gebaut. Im Prinzip handelt es sich dabei um einen durch elektrischen Stromfluss geheizten Körper. Die spektrale Temperatur dieser Quelle im FIR wurde mit dem Heterodynspektrometer unter Verwendung der ursprünglichen Kalibrierquellen bestimmt. Obwohl das so gemessene Spektrum stark durch das Rauschen belastet ist (Gleichung 4.24), kann man von einer sehr schwachen Frequenzabhängigkeit der Temperatur ausgehen. Daher kann man das Spektrum über alle Frequenzkanäle mitteln. In Abbildung 5.5 ist die so gemittelte Temperatur („Brightness Temperature“) der Quelle in Abhängigkeit von der zugeführten elektrischen Leistung dargestellt. Bei Absorptionsmessungen wurde die Quelle bei etwa 12 W verwendet.

Die zusätzliche Kalibrierquelle wurde so in das bestehende System integriert, dass man neben der alten auch die neue Kalibrierquelle verwenden kann. Das ermöglicht simultanes Messen in Absorption gegen die Sonne und in Emission nahe der Sonne.

In Rahmen dieser Änderungen wurde auch der sog. „Dewar-Effekt“ [5,27] beseitigt, bei dem die Strahlung der kalten („COLD“) Quelle über das Flugzeugfenster in das System reflektiert wurde. Diese Reflexion trat nur für Elevationswinkel unter 10° auf und wurde durch eine einfache Blende aus *Ecosorb* bei Raumtemperatur beseitigt.

5.4 Diplexer

Der Diplexer überlagert Strahlung aus dem FIR-Laser und Atmosphärenstrahlung aus beiden Seitenbändern räumlich und polarisationsrichtig. Im Falle des Heterodynspektrometers THOMAS handelt es sich um ein Martin-Puplett-Interferometer. Das detektierte Spektrum entsteht durch Superposition der beiden Seitenbänder. Die mechanische Einstellung des Diplexers beeinflusst das Verhältnis, mit dem die beiden Bänder vom Diplexer transmittiert werden.

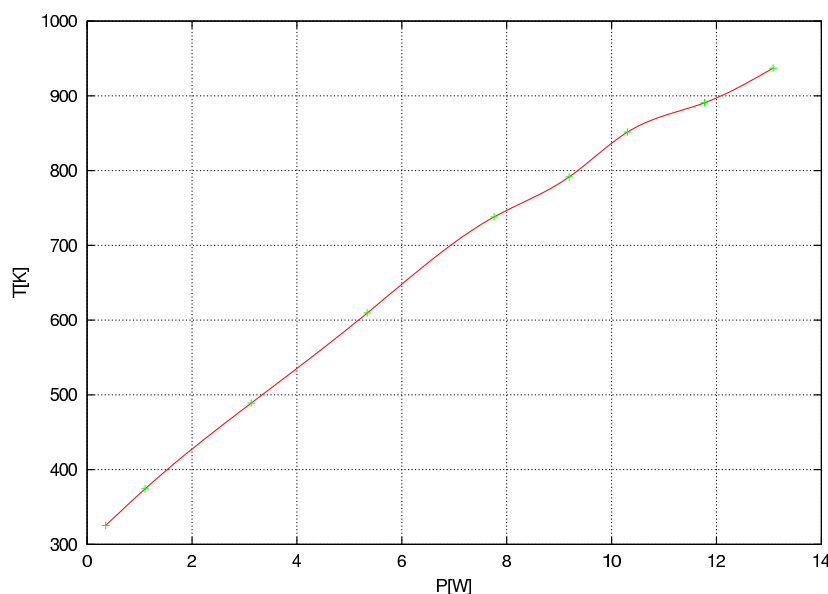


Abbildung 5.5: Abhängigkeit der Temperatur der „VERY HOT“ Kalibrierquelle von der zugeführten elektrischen Leistung

Die Justierung erfolgt mit Mikrometerschrauben und ist sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Bei mechanischen Vibrationen während des Starts bzw. der Landung des Flugzeugs kam es wiederholt zur Dejustierung des Diplexers. Um dies zu verhindern, wurde eine neue Justierungsvorrichtung konstruiert.

5.5 Mechanische Stabilisierung des CO_2 -Lasers

Der CO_2 -Laser erwies sich als sehr empfindlich gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen. Um die mechanische Stabilität zu verbessern, wurde der Laser mit Hilfe dreier Kunststoffschrauben in Querrichtung fixiert, ohne die aufgrund seiner thermischen Ausdehnung notwendige Bewegungsfreiheit entlang der Längsachse einzuschränken.

Zur Erhöhung der Stabilität führte auch eine Justage des Laserauskoppelfensters im warmen Zustand, was die effektive Leistung des FIR-Lasers fast um einen Faktor zwei verbesserte.

Diese Änderungen hatten auch zur Folge, dass wegen der jetzt ausreichend großen Ausgangsleistung des FIR-Lasers eine automatische Leistungsregelung nicht mehr notwendig war. Die Regelung neigte bei niedriger Laserleistung zu Instabilitäten. Die thermische Stabilität des Systems ist jetzt ausreichend, um die Laser-Leistung nur alle 5 - 10 Minuten nachregeln zu müssen.

In Abbildung 5.6 ist die Leistung des CO_2 -Lasers und in Abbildung 5.7 die Laser-Leistung des FIR-Lasers während der Messkampagne MAHRSI im Vergleich zur Messkampagne Faro 2000 dargestellt. Vertikale Linien markieren die oben genannten Störungen. Aus den Abbildungen kann man entnehmen, dass während der MAHRSI-Messungen Störungen wesentlich häufiger vorkamen, als während der Faro Messungen. Aus diesem Grund wurde für die MAHRSI Messkampagne ein spezielles Verfahren entwickelt, welches die unbrauchbaren Spektren ausfiltert [5]. Ein entsprechend vereinfachtes Verfahren ist im Abschnitt 5.9.5 beschrieben.

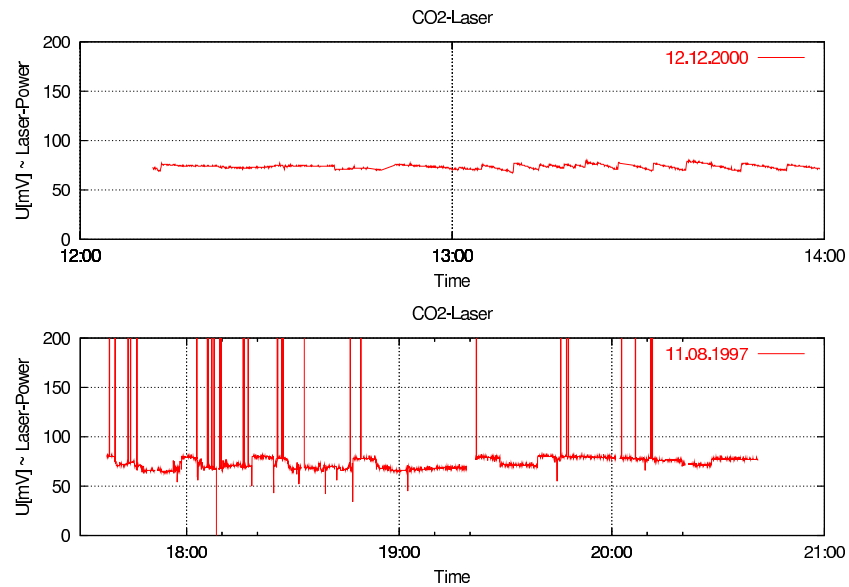
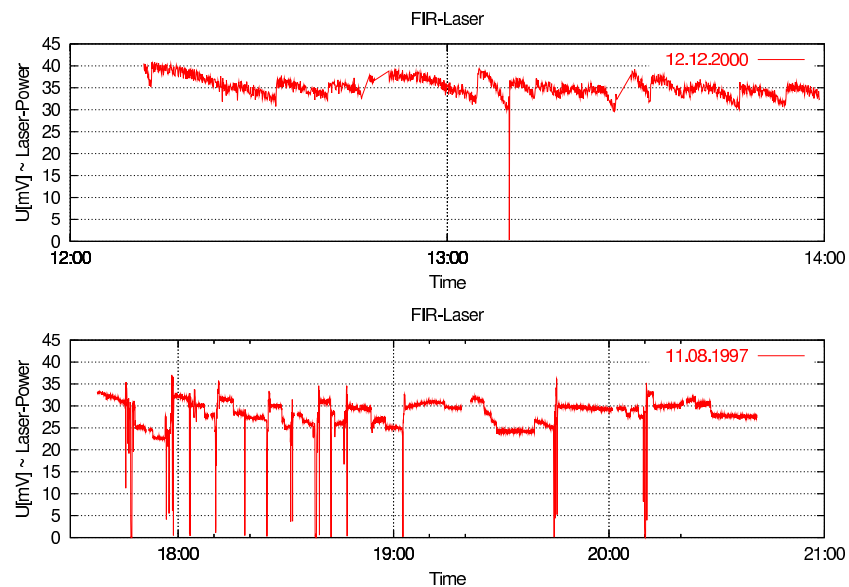
Abbildung 5.6: CO_2 -Laserleistung, Vergleich der Stabilität

Abbildung 5.7: FIR-Laserleistung, Vergleich der Stabilität

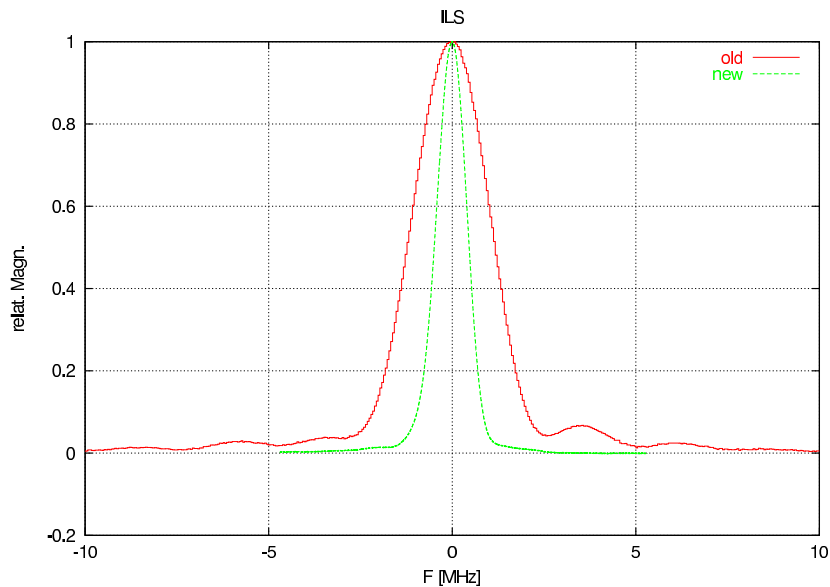


Abbildung 5.8: Linienprofilfunktion (ILS)

5.6 Das Akustooptische Spektrometer (AOS)

Zur Verbesserung des gesamten Systems, insbesondere in Bezug auf Frequenzauflösung und Stabilität, trugen hauptsächlich Modifikationen am akustooptischen Spektrometer bei.

5.6.1 Laserdiode

Mit der bestehenden mechanischen Lösung war es nicht möglich, eine vollständige Beleuchtung der Braggzelle zu erzielen, was wiederum eine unnötige Verbreiterung der Linienprofilfunktion (ILS) zur Folge hatte. Dies verursachte eine Verbreiterung der ILS des Heterodynspektrometers.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der gesamte Laserblock samt Optik ausgewechselt, die Justierungsvorrichtung verbessert und die Elektronik für die Leistungsstabilisierung der Laserdiode neu entwickelt. In Abbildung 5.8 ist die ILS vor und nach der Umbaumaßnahme abgebildet.

Die Halbwertsbreite und damit die Frequenzauflösung hat sich im mittleren spektralen Bereich des AOS von 2,02 MHz auf 0,96 MHz verbessert. Außerdem sind die aus dem Beugungsmuster stammenden „Seitenflügel“ stark unterdrückt. Dies ist Resultat des neuen Beleuchtungsprofils am Bragg-Kristall. Genauere Angaben über das AOS sind im Anhang A zu finden.

5.6.2 Ausleseelektronik

Die elektrische Ladung einer Photozelle des CCD-Arrays ist direkt proportional der Lichtstärke und der Beleuchtungszeit („*Pixelintegrationszeit*“) [15]. Aus technischen Gründen ist es notwendig, die Daten aus Photozellen um ein Referenzsignal zu korrigieren. Als Referenz dient ein Signal aus speziellen Photozellen, die bei der Herstellung des CCD-Arrays durch eine Schicht ausgeblendet werden („*black pixels*“).

Die Korrektur der Daten aus dem CCD-Array des AOS mit „*black pixels*“, wie sie in [5] beschrieben ist, wurde ursprünglich bei der Bearbeitung der Spektren durchgeführt. Die hier vorgeschlagene

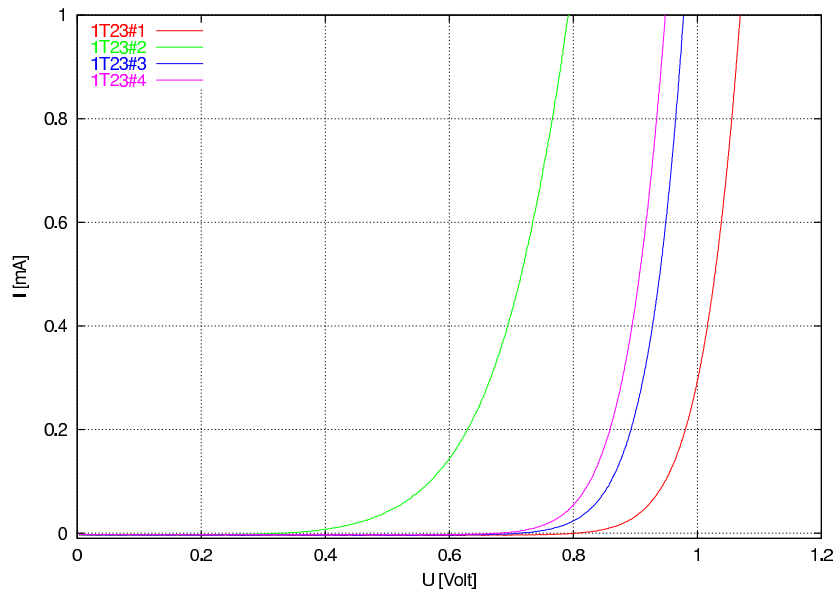


Abbildung 5.9: Kennlinien von vier Dioden - Die Dioden 1T23#3 und 1T23#4 haben die besten Eigenschaften bezüglich T_{sys} und Rauschen.

und realisierte Lösung baut auf Hardwaremitteln auf. Bei dieser Lösung wird der Wert analog gespeichert, und die Korrektur mit einem Operationsverstärker realisiert. Der elektronische Schaltplan ist in Anhang C zu finden.

5.6.3 Steuerprogramm

Die Steuersignale für das CCD-Element werden mit Hilfe einer speziellen I/O- und A/D-Karte generiert. Im Prinzip handelt es sich um einen vollständigen Rechner mit einem auf die Echtzeitprozesse optimierten Betriebssystem. Da die neue Ausleseelektronik jetzt auch Steuersignale zur Speicherung des Referenzsignals braucht, wurde die Software zur Steuerung des AOS entsprechend modifiziert. Bei gleichzeitiger Optimierung des Programms konnte eine Verkürzung der Beleuchtungszeit des CCD-Arrays erzielt werden. Dies ermöglicht es, Messungen mit einer Beleuchtungszeit von 15 ms durchzuführen. Dadurch werden die Messungen gegenüber niederfrequenten Störungen (Drift) unempfindlicher.

5.6.4 Leistungsverstärker

Die nicht optimale thermische Stabilität des AOS ist ein wesentlicher Grund für das thermisch bedingte Driften im Gesamtsystem.

Als störende Wärmequelle konnte der Leistungsverstärker des AOS identifiziert werden. Aus diesem Grund wurde der Leistungsverstärker räumlich von den restlichen Komponenten des AOS getrennt. Dadurch wurde die Temperaturstabilität des AOS wesentlich verbessert.

5.7 Kontaktierung von Schottkydioden

Das Kernstück des Heterodynsystems stellt der *Schottky-Mischer* dar, der zum Empfang des Atmosphärensignals dient. Er bestimmt die Empfindlichkeit des Systems, die wiederum durch die

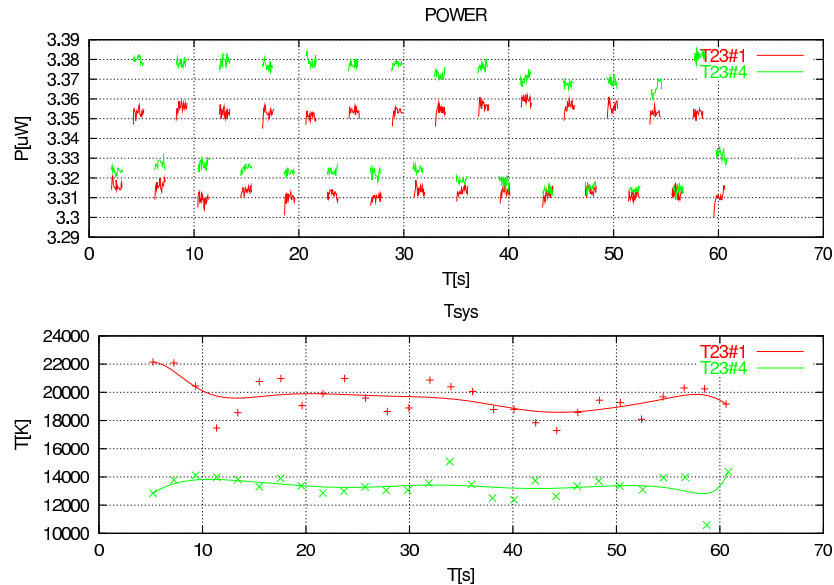


Abbildung 5.10: Dioden-Test auf dem Heterodynsystem - Im oberen Teil ist die am Eingang des AOS gemessene Signalleistung beim zyklischen Umschalten von der Kalibrierquelle „HOT“ auf die Kalibrierquelle „COLD“ dargestellt. Im unteren Teil sind die entsprechenden Systemrauschtemperaturen abgebildet.

Systemrauschtemperatur beschrieben wird. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die zeitliche Stabilität des Systems. Die Schottkydiode basiert auf einem *Metall-Halbleiter-Kontakt*. Dieser Kontakt wirkt aber auch als Rauschquelle. Besonders die niederfrequenten Anteile des Rauschens (Schrotrauschen und $1/f$ -Rauschen [15]) verschlechtern die Signalstabilität. Das Kontaktrauschen wird durch die mechanische Qualität des Kontakts bestimmt.

Die Kontaktierung ist ein aufwendiger Prozess, der unter dem Mikroskop manuell durchgeführt werden muss. Bisher wurden alle U-I-Kennlinien mit Hilfe eines sog. „Curve Tracers“ aufgenommen. Um die Kontaktierung zu erleichtern, wurde der „Curve-Tracer“ durch einen Rechner mit einer A/D- und D/A-Karte ersetzt. Diese Lösung weist mehrere Vorteile auf:

- Die aufgenommenen Kennlinien (Abbildung 5.9) können archiviert werden und ermöglichen so einen Qualitätsvergleich mit älteren Versuchen.
- Der Zustand des Kontakts (fehlender Kontakt, Kurzschluss, Kontakt in Ordnung) wird akustisch signalisiert.

In Abbildung 5.10 sind Testmessungen zweier Schottkydioden zum Vergleich dargestellt. Diese Testprozedur wird vor jeder Messung durchgeführt, um den Zustand des Heterodynsystems zu charakterisieren.

Während des Tests wird wiederholt zwischen den Kalibrierquellen „HOT“ und „COLD“ umgeschaltet. Aus dieser Testmessungen (der obere Teil der Abbildung 5.10) kann man Rückschlüsse auf Empfindlichkeit und Stabilität des Systems ziehen. Je weiter die Leistungswerte der Kalibrierquellen „HOT“ und „COLD“ voneinander entfernt sind, desto niedriger ist die Systemrauschtemperatur und desto besser ist die Empfindlichkeit des Systems.

Die langfristige Stabilität ist durch die sichtbare Drift der Messwerte bestimmt. Daraus ergibt sich, dass ein einzelner Messzyklus („HOT“, „SIGNAL“, „COLD“) unter 4 Sekunden liegen sollte. Die Kurzzeitstabilität ist durch die Streuung der Messwerte charakterisiert.

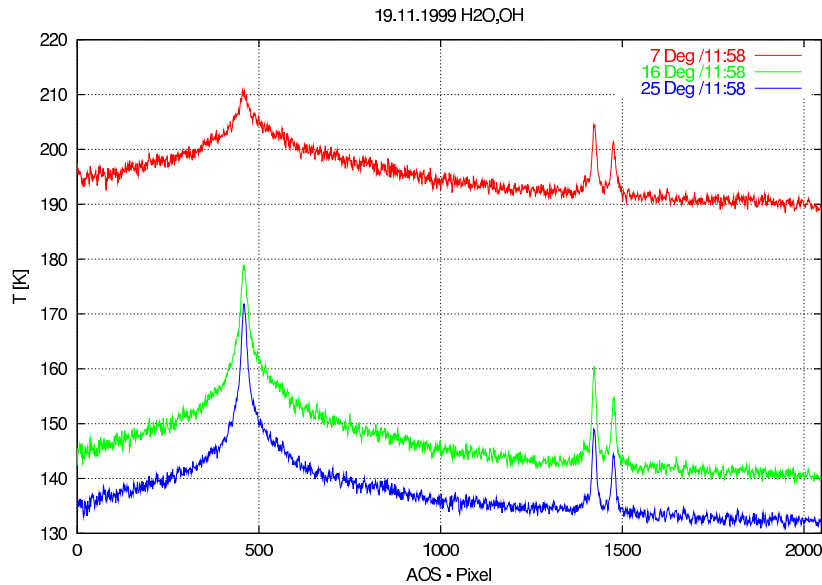


Abbildung 5.11: Drei gleichzeitig aufgenommene Spektren

5.8 Winkelsondierung

Die bisher angewandte Methode ermöglichte eine Messung nur unter *einem* vertikalen Winkel (*Pointingwinkel*). Messungen unter verschiedenen Vertikalwinkeln wurden sequentiell aneinandergereiht. Auf Grund der Fluggeschwindigkeit des Forschungsflugzeugs FALCON stammen die Messdaten verschiedener Vertikalmessungen zwangsweise aus unterschiedlichen geographischen Bereichen der Erdatmosphäre.

Erst die erhöhte Stabilität des Systems und damit verbundene Effizienz (siehe Abbildung 5.6 und 5.7) ermöglichten die „gleichzeitige“³ Messung mehrerer Spektren unter verschiedenen Vertikalwinkeln.

Dazu wurde die Steuerungssoftware des Heterodynspektrometers entsprechend abgeändert.

Eine Einzelmessung besteht weiterhin aus der Sequenz

„HOT-SIG-COLD-SIG-HOT“.

In der Praxis wurde unter drei verschiedenen Winkeln gemessen, was sich in Bezug auf die Messdauer als optimal erwies. Dabei wurde folgende Messsequenz benutzt:

„HOT-SIG1-COLD-SIG2-HOT-SIG3-COLD-SIG1-HOT-SIG2-COLD-SIG3-HOT“.

Die Steuerungssoftware erlaubt prinzipiell jede beliebige Sequenz.

In Abbildung 5.11 ist ein Beispiel einer solchen Sequenzmessung dargestellt. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass alle Messdaten aus einem räumlich begrenzten Bereich (gegeben durch die geographische Position des Flugzeuges während des Fluges) stammen.

5.9 Umbau des Heterodynsystems auf „sun tracking“.

Der wesentliche Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Erweiterung des Heterodynspektrometers für die Messung von OH in Absorption. Dabei wird die Sonne als Strahlungsquelle benutzt. Aufgrund

³Die einzelnen Spektren werden weiterhin zeitlich hintereinander gemessen, aber die kalibrierten Spektren werden in gleichem Zeitraum summiert.

der hohen Temperatur der Sonnenoberfläche (etwa 4200 K im FIR-Bereich) erwartet man eine deutliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Dies ermöglicht eine Verkürzung der notwendigen Messzeit, was wiederum die räumliche Auflösung erhöht.

Der Umbau des Spektrometers war mit einer Reihe von technischen Problemen verbunden. In diesem Abschnitt wird zuerst die endgültige technische Lösung beschrieben; danach wird auf Details der einzelnen Problemlösungen eingegangen.

5.9.1 Technische Realisierung

In Abbildung 5.12 ist die technische Realisierung des „*sun tracker*“ dargestellt. Die zeitlich kritische Steuerung der Nachführung in Richtung der Sonne übernimmt ein separater Rechner, der unter dem Betriebssystem Linux arbeitet („*LINUX-Rechner*“). Der Rechner arbeitet weitgehend unabhängig von den anderen Komponenten des Heterodynsystems. Die Position der Sonne wird mit einer herkömmlichen CCD-Kamera aufgenommen. Zur Digitalisierung des Videosignals aus der Kamera wird eine TV-Karte, die durch den *LINUX-Rechner* gesteuert wird, benutzt. Mit Hilfe der digitalisierten Bilder wird die Lage der Sonne berechnet und die beiden Spiegel des Spektrometers werden entsprechend nachgeführt. Die Spiegelmotoren werden von zwei Steuereinheiten betrieben. Sie kommunizieren über zwei serielle Schnittstellen mit dem *LINUX-Rechner*.

Die Steuerung des Heterodynsystems übernimmt ein weiterer Rechner, der mit dem Betriebssystem MS-DOS arbeitet („*DOS-Rechner*“). Die Aufgaben des *DOS-Rechners* sind vielfältig:

- Programmierung und Steuerung der A/D-Karte
- Weiterverarbeitung von Daten aus dem akustooptischen Spektrometer
- Aufnahme von Betriebsparametern (z.B. Leistung des CO_2 -Lasers)
- Erfassung von „Housekeeping“-Daten über eine serielle Schnittstelle (Temperaturen der Kalibrierquellen, ...)
- Erfassung von weiteren Daten über eine IEEE-Schnittstelle (FIR-Leistung, Powermeter, ...)
- Erfassung von Flugdaten aus dem *FALCON*-Messrechner (Flughöhe, geographische Lage, ...)

Die Kommunikation zwischen *DOS-* und *LINUX-Rechner* erfolgt über eine weitere serielle Schnittstelle. Der *DOS-Rechner* fungiert als „*MASTER*“, d. h. er steuert die Messphasen („*HOT*“; „*COLD*“...) und speichert alle gemessenen Daten. Der Benutzer steuert das Messsystem über den *DOS-Rechner*.

5.9.2 Erfassung der Sonnenposition

Der *FALCON*-Messrechner liefert u. a. die genaue geographische Lage und die Parameter, die die räumliche Ausrichtung des Flugzeugs charakterisieren. Die räumliche Ausrichtung wird durch den seitlichen Neigungswinkel („*Rollwinkel*“) und den Neigungswinkel der Längsachse des Flugzeugs („*Pitchwinkel*“) beschrieben. Die Ausrichtung des Flugzeugs kann allerdings aufgrund von äußeren Einflüssen (Seitenwind) von der Flugrichtung abweichen. Die tatsächliche Ausrichtung wird als „*True-Heading*“ bezeichnet.

Anhand dieser Daten und unter der Annahme, dass der Blickrichtung des Heterodynsystems in Bezug auf Flugzeuglage und Ausrichtung der Spiegel exakt bekannt ist, ließe sich die Position der Sonne berechnen und die Ausrichtung der beiden Spiegel entsprechend nachführen. Diese Methode erwies sich aus verschiedenen Gründen jedoch als nicht praktikabel⁴ :

⁴Die Methode wurde beim Messflug in 1999 getestet. Es wurden zwar die ersten Spektren in Absorption gegen die Sonne gemessen, aber für Messungen ist die Methode ungeeignet.

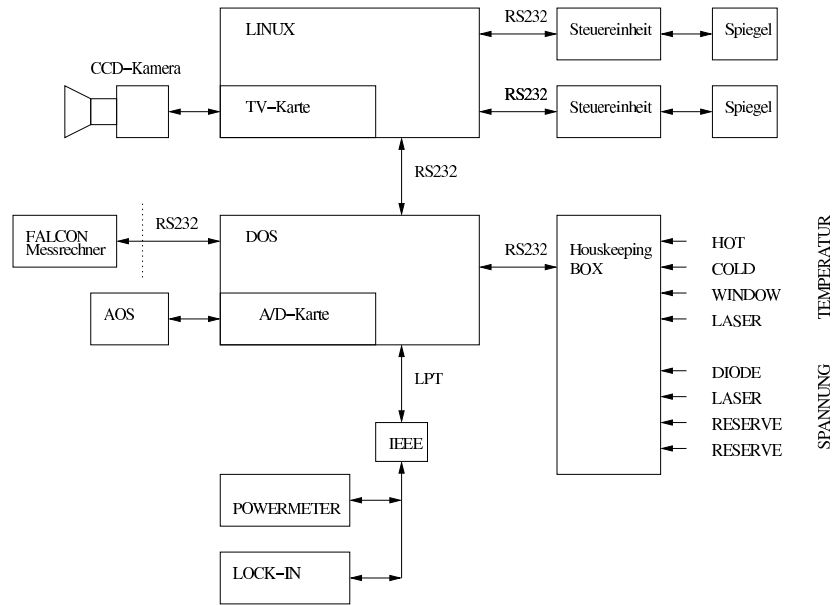


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der technischen Realisierung

- Die Daten aus dem FALCON-Messrechner sind für eine feine Nachsteuerung des Rollwinkels zu ungenau.
- Der Datenstrom aus dem FALCON-Rechner ist zu langsam.
- Der DOS-Rechner wurde mit der Berechnung und Nachführung der Spiegelposition im Vergleich zur Rollbewegung des Flugzeugs überlastet.

Sensor

Die Bestimmung der Sonnenposition durch das Siliziumfenster ist nur im FIR-Bereich möglich. Da in diesem Frequenzbereich kein geeigneter Sensor, der auch die notwendige zweidimensionale Winkelauflösung besitzt, existiert, wird für den visuellen Bereich eine herkömmliche Kamera als Sensor verwendet. Daher muss die Sonnenlage durch ein anderes Fenster erfasst werden.

Die verwendete Kamera basiert auf einem CCD-Array und stellt das Videosignal in „PAL-Norm“ zur Verfügung. Schärfen- und Zoomeinstellung der Kamera müssen fixiert bleiben, da sich sonst die Geometrie des Gesamtsystems ändern würde. Die Beleuchtungsstärke wird mittels einer Blende eingestellt. Zur zusätzlichen Abschwächung wurde auf das Objektiv der Kamera ein Filter montiert.

Digitalisierung

Das Videosignal aus der Kamera wird mit einer TV-Karte⁵ digitalisiert und weiter bearbeitet. Diese kann bis zu 25 Bilder pro Sekunde liefern (PAL-Norm)(siehe Tabelle 5.2).

Betriebssystem

Bei der Wahl des Betriebssystems wurde die Unterstützung der oben genannten TV-Karte berücksichtigt. Außerdem müssen unter dem verwendeten Betriebssystem Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung stehen, die auch das Programmieren auf niedrigster Ebene ermöglichen. Die Programmentwicklung erfordert ein Betriebssystem mit „Open-Source“-Architektur. Das Betriebssystem Linux erwies sich dafür als am besten geeignet.

⁵Hauppauge WinTV PCI

WinTV PCI-FM
Videodigitizer-Chip Bt878
Kabeltauglicher TV-Tuner
2-Kanalton/Stereo
24 Bit Farbtiefe
max. Auflösung 1600x1200 Pixel
TV-Antenneneingang 75 Ohm
Radio-Antenneneingang 75 Ohm
Stereo Audio Line Out
Stereo Audio Line In
Composite/S-Videoeingang
IR-Empfänger Eingang
PCI Steckplatz

Tabelle 5.2: Eigenschaften der TV-Karte nach Angaben des Herstellers

Algorithmus

Als Grundlage für die Programmierung der Videokarte diente das Programm *xawtv*⁶. Die TV-Karte wird im Schwarz-Weiß-Modus (Auflösung 400 x 300 Pixel) betrieben. Mit einem Software-Trigger wird eine Übertragung der Bilddaten von der Karte in den Arbeitsspeicher gestartet.

Zur Auswertung der Bilddaten wird die Helligkeit der einzelnen Bildpixel mit einem Schwellwert S verglichen. Ist der Helligkeitswert $x_{i,j}$ größer als der Schwellwert S , so gilt das entsprechende Pixel als von der Sonne beleuchtet:

$$F_{sun}(x_{i,j}) = \begin{cases} 1; & \text{falls } x_{i,j} < S \\ 0; & \text{falls } x_{i,j} > S \end{cases} \quad (5.4)$$

F_{sun} „Boxfunktion“ der Sonne
 $x_{i,j}$ Pixelwert mit Koordinaten i, j
 S Vergleichswert (Schwelle)

Mittels zweidimensionaler Schwerpunktrechnung wird die Sonnenlage berechnet:

$$A_{sun} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} F_{sun}(x_{i,j}) \quad (5.5)$$

A_{sun} Fläche der Sonne
 $N_x = 400$ gewählte X-Auflösung
 $N_y = 300$ gewählte Y-Auflösung

$$r_x = \frac{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} i F_{sun}(x_{i,j})}{A_{sun}} \quad (5.6)$$

$$r_y = \frac{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} j F_{sun}(x_{i,j})}{A_{sun}} \quad (5.7)$$

r_x, r_y die gesuchten Koordinate der Sonne

⁶Copyright (c)1997-99 Gerd Knorr <krazel@goldbach.in-berlin.de>

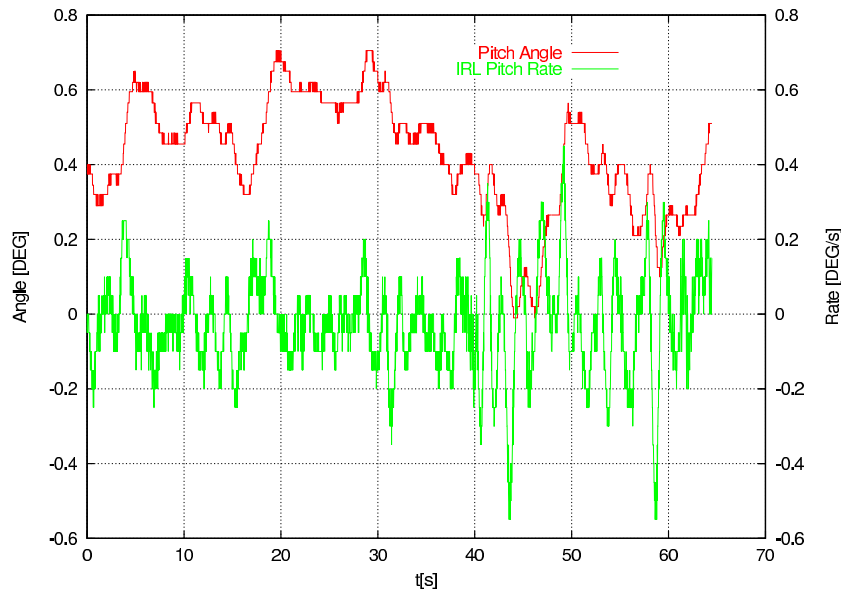


Abbildung 5.13: Pitchbewegung des Flugzeugs

Die Lage des Schwerpunkts muss dann aus den Pixelkoordinaten der Kamera auf die entsprechenden Winkelgrößen umgerechnet werden. Die Winkelauflösung der Kamera ist in vertikaler und horizontaler Richtung verschieden und muss berücksichtigt werden.

5.9.3 Motorsteuerung

Die Gründe für den Einbau eines weiteren Spiegels und den Umbau der ursprünglicher Konstruktion wurden in Abschnitt 5.2 erläutert. In diesem Abschnitt werden die besonderen Anforderungen an das Spiegelsystem diskutiert, die für den Ausgleich der Flugzeugbewegung notwendig sind.

Das typische Verhalten des Flugzeugs im Flug ist in Abbildung 5.13 und 5.14 dargestellt. Hierbei handelt es sich um Daten, die während eines Fluges aufgenommen wurden.

Die Bewegung um die Querachse des Flugzeugs („Pitchbewegung“) ist relativ gering und damit unkritisch. Die maximale Auslenkung innerhalb von 70 s beträgt etwa $0,7^\circ$. Die maximale Winkeländerung („IRL“, „Rate“) beträgt etwa $0,55^\circ s^{-1}$.

In Abbildung 5.14 ist die typische Seitenbewegung („Rollbewegung“) des Flugzeugs FALCON abgebildet. Die maximale Auslenkung ist größer als 3° und die maximale Winkeländerung („IRL“, „Rate“) übersteigt $1,5^\circ s^{-1}$. Die Bewegungseinheit eines Spiegels muss so entworfen werden, dass sie mit ihrer Eigenschaften (Drehzahl, Beschleunigung, ...) in der Lage ist, in Echtzeit die nicht vorhersagbare Bewegung des Flugzeugs auszugleichen.

Die hier benutzten Motoren (Servoantrieb) und Steuereinheiten (Servoregler) wurden von der Firma *Harmonic Drive* [9] hergestellt. Als Servoantrieb wurde *RS-11B-6001C* und als Steuereinheit *SC-510* gewählt.

Die neue Steuereinheit *SC-510* kommuniziert mit dem Rechner über eine serielle Schnittstelle und zeichnet sich durch eine ausreichende Fehlertoleranz bei der Kommunikation aus.

5.9.4 Kopplung Sonne- und Spiegelposition

In diesem Abschnitt wird anhand der Empfangsgeometrie (Antennencharakteristik, Abbildung 5.3) die erforderliche Winkelgenauigkeit der Nachführung abgeschätzt. Aus der typischen Bewegung

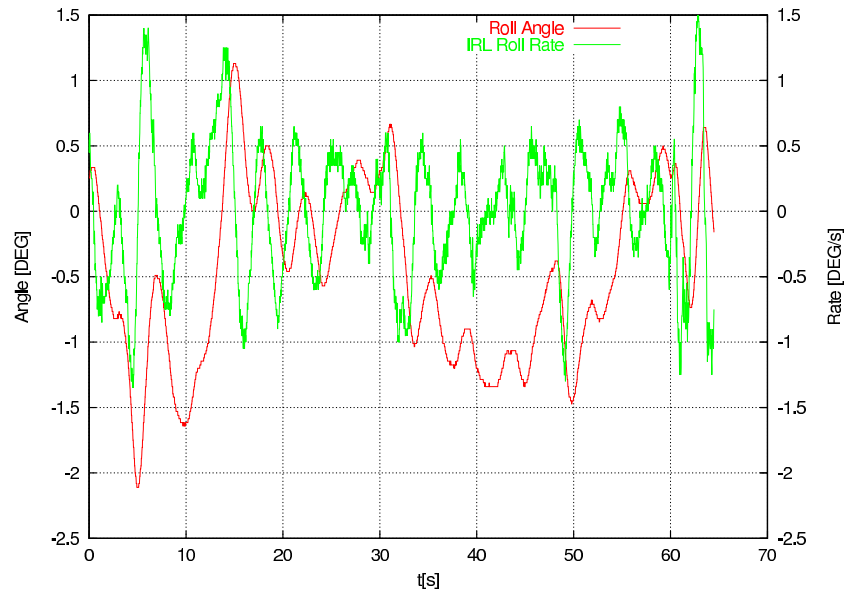


Abbildung 5.14: Rollbewegung des Flugzeugs

des Flugzeugs (Abbildung 5.13 und 5.14) wird die notwendige Nachführzeit des Regelzyklus berechnet. Die wirkliche Zykluszeit der Regelung muss kleiner als die notwendige Nachführzeit sein.

Winkelgenauigkeit

Die Antennencharakteristik (Abbildung 5.3) kann man mit einer Ellipse (große Achse $1,4^\circ$, kleine Achse $0,9^\circ$) gut approximieren (Abbildung 5.15). Die Sonne hat einen Durchmesser von etwa $0,5^\circ$. Daraus ergibt sich für die vertikale Richtung die erforderliche Winkelgenauigkeit von $\pm 0,45^\circ$ und für die horizontale Richtung $\pm 0,2^\circ$.

Maximale Zyklusdauer

Die maximale Zyklusdauer für die vertikale Richtung wird für die Winkelgenauigkeit von $\pm 0,2^\circ$ und die maximale Winkeländerung von $0,55^\circ s^{-1}$ berechnet:

$$T_{ver,max} = \frac{0,2^\circ}{0,55^\circ s^{-1}} = 0,36 s \quad (5.8)$$

Für die horizontale Richtung (Winkelgenauigkeit $\pm 0,45^\circ$, Winkeländerung $1,5^\circ s^{-1}$) gilt:

$$T_{hor,max} = \frac{0,45^\circ}{1,5^\circ s^{-1}} = 0,3 s \quad (5.9)$$

Die maximale Zyklusdauer ergibt sich dann zu:

$$T_{max} = \min(T_{ver,max}, T_{hor,max}) = 0,3 s \quad (5.10)$$

Wirkliche Zyklusdauer

Die Nachführung der Spiegel mit der Änderung der Sonnenposition bezüglich des Flugzeugs ist zeitlich sehr kritisch. Wie schon erwähnt, wird diese Aufgabe dem LINUX-Rechner überlassen. Das Programm (Abbildung 5.16) bewegt die Spiegel entweder auf die Kalibrierquellen („HOT“, „COLD“, „VERY-HOT“) oder auf einen von zehn vordefinierten Messpunkten, wie es das MASTER-Programm auf dem DOS-Rechner verlangt. Eine tiefere Analyse des Programmablaufs ergibt für die wirkliche Zyklusdauer:

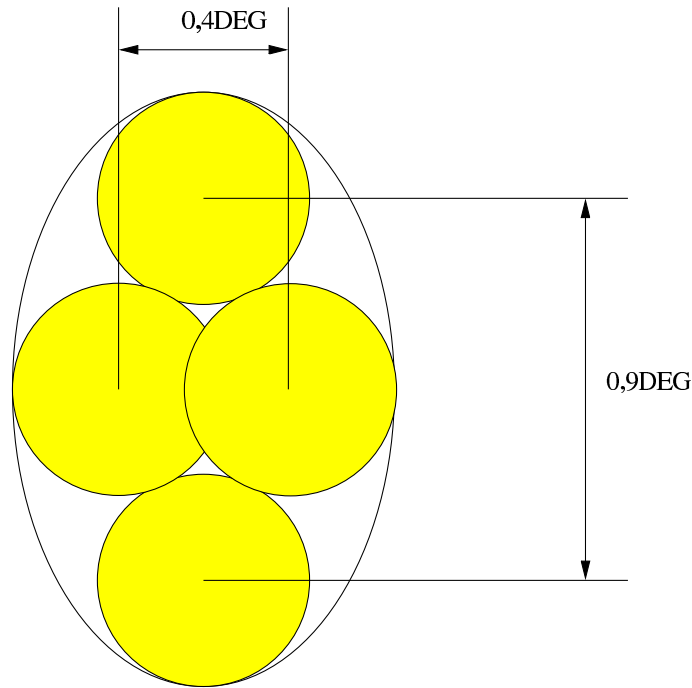


Abbildung 5.15: Abschätzung der Winkelgenauigkeit

$$T = 0,149 \text{ s} < T_{max} = 0,3 \text{ s} \quad (5.11)$$

Wie gut das System unter realen Bedingungen arbeitet, zeigt die Abbildung 5.17. In der Abbildung sind die Mittelwerte über die Frequenzkanäle von einzelnen Messsequenzen dargestellt. Die durchgezogenen Kurven entsprechen den Kalibrierquellen („77K-COLD“, „296K-HOT“, „700K-VERY-HOT“). Die Werte aus der Emissionsmessung sind mit einem „x“-Zeichen und die aus der Absorptionsmessung mit einem „+“-Zeichen dargestellt. Die Variation spiegelt die Qualität der Nachführung wieder. Aus dem Bild kann man entnehmen, dass sich die Sonne immer im Empfangsbereich des Heterodynsystems befand, sonst müssten sich die Absorptionswerte mit den Emissionswerten überdecken.

Die Abbildung 5.17 zeigt außerdem auch eine starke Drift im System. Ohne Drift würden die Werte der Kalibrierquellen konstant bleiben. Diese Schwankungen sind die Hauptursache für die Notwendigkeit der Kalibrierung innerhalb von kurzen Zeitabständen (etwa 6 s). Dass sich die Übertragungsfunktion des Systems gemäß der Gleichung 4.29 nicht ändert, belegt die Abbildung 5.18. Der hohe Korrelationsgrad der beiden Kurven wird durch die große Abhängigkeit beider Parameter von der Differenz $P_{hot} - P_{cold}$ verursacht:

$$R = \frac{T'_{hot} - T'_{cold}}{P_{hot} - P_{cold}} \quad (5.12)$$

$$T_{sys} = \frac{T'_{hot} P_{cold} - T'_{cold} P_{hot}}{P_{hot} - P_{cold}} \quad (5.13)$$

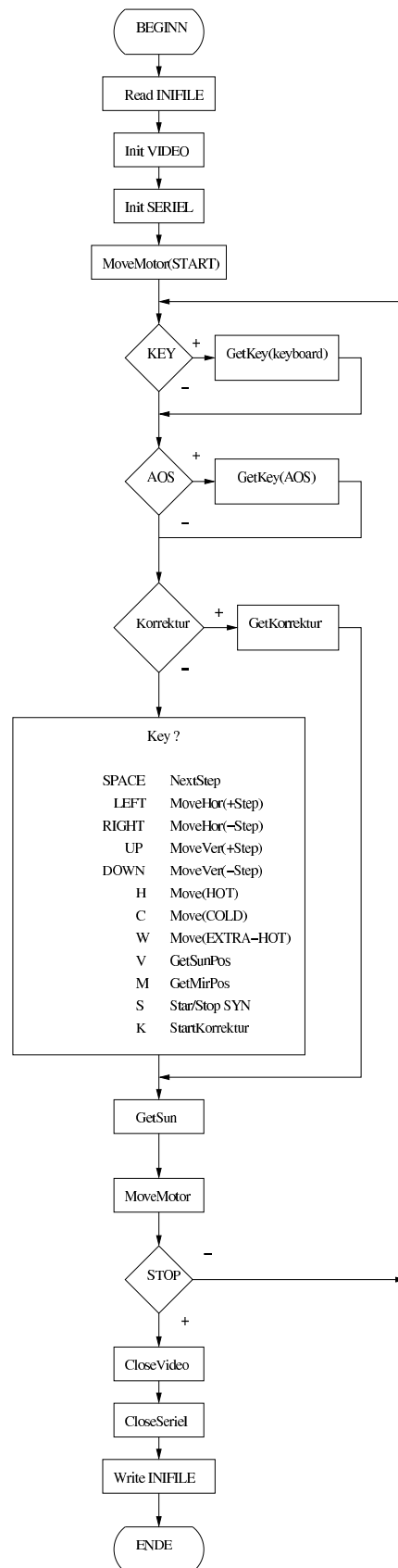


Abbildung 5.16: LINUX-Programm, Blockdiagramm

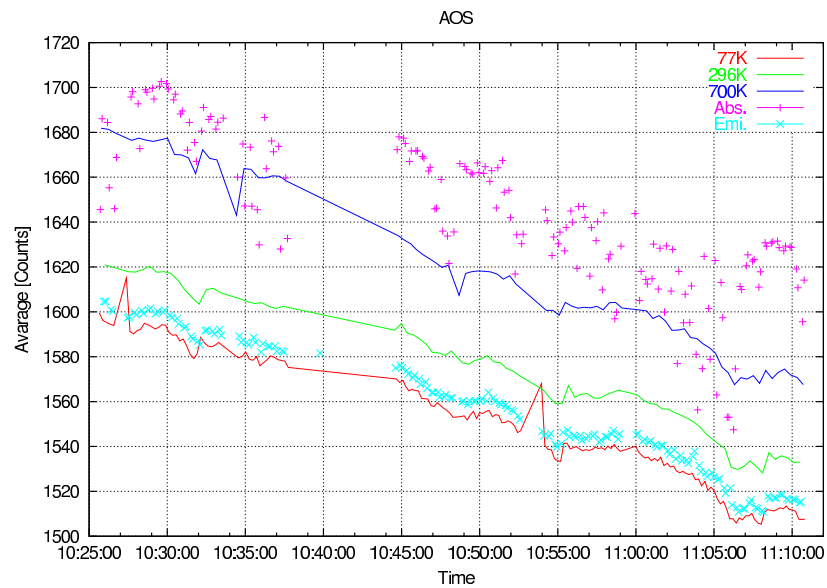


Abbildung 5.17: Mittelwerte vom AOS während des Messflugs am 14.12.2000

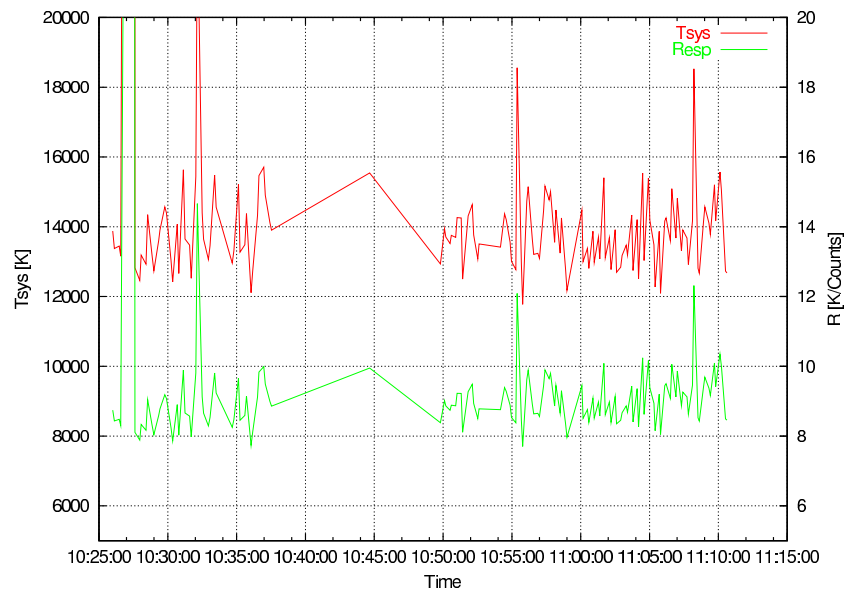


Abbildung 5.18: Die Parameter der Übertragungsfunktion des Heterodynsystems während des Messflugs am 14.12.2000

Zyklus	Messzeit
HOT	1350 ms
COLD	1050 ms
VERY	1500 ms
ABS	1500 ms
EMI	1500 ms

Tabelle 5.3: Integrationszeiten

5.9.5 Messesequenz, Kalibrierung und Auswahlkriterien

Man kann die Sonne - bezüglich nichtresonanter Beiträge zu dem gemessenen Spektrum - sehr gut als schwarzen Strahler betrachten. Allerdings befindet sich in der Sonnenatmosphäre unter anderem auch *OH*. Dies liefert auch einen Beitrag zu atmosphärischen *OH*-Linien. Um die Möglichkeit offen zu lassen, die Beiträge von *OH* auf der Sonne mit dem Inversionsprozeß von den Beiträgen aus der Atmosphäre trennen zu können, wurde während der Absorptionsmessung gegen die Sonne auch ein Messzyklus in Emission gemessen. Dieser zusätzliche Messzyklus verlangsamt zwar die Messung, aber auf der anderen Seite wird ermöglicht, auch die Temperatur der zusätzlichen heißen Quelle (*VERY-HOT*) zu bestimmen. Damit ist die Temperatur gemeint, unter der das Heterodynspektrometer die zusätzliche heiße Quelle „sieht“ und die auch für die Kalibrierung (Gleichung 4.16) benutzt wird. Weiter ermöglicht diese Wahl für Testzwecke, die Absorptionsspektren mit der „klassischen“ warmen (*HOT*) Quelle zu berechnen. Diese werden naturgemäß (Absatz 4.3.1) durch ein größeres Rauschen belastet.

Die gewählte Messesequenz sieht folgendermassen aus:

„...*COLD-ABS-VERY-ABS-COLD-EMI-HOT-EMI*...“

<i>COLD</i>	kalte Quelle (77 K)
<i>HOT</i>	heiße Quelle (296 K)
<i>VERY</i>	zusätzliche heiße Quelle (800 K)
<i>ABS</i>	Atmosphärensignal gegen der Sonne
<i>EMI</i>	Emissionssignal der Atmosphäre

Die Messesequenz wurde so konstruiert, dass alle Kalibrierquellen zweimal benutzt wurden. Dies hat den Nachteil, dass die Integrationszeiten der einzelnen rohen Spektren nicht mehr optimal gemäß der Gleichung 4.27 gewählt werden können. Die so gewählten Messzeiten sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Mit dieser Messesequenz werden jeweils zwei Absorptions- bzw. Emissionsspektren hintereinander gemessen.

Trotz der erhöhten Stabilität des Gesamtmesssystem treten immer wieder Störungen auf, die das gemessene Spektrum verfälschen. Die Ursachen für solche negativen Einflüsse sind z. B. die manuelle Nachregelung der Laserparameter (Abbildung 5.20). Die einzige Möglichkeit, die Folgen solcher Störungen zu eliminieren, ist, die gestörten Spektren auszufiltern. Bei der MAHRSI Kampagne wurde ein relativ aufwendiges Verfahren zur Auswahl der nicht verfälschten Spektren benutzt. Da sich aber die Stabilität des Systems wesentlich verbesserte (siehe Abschnitt 5.5), wurde für die neuen Messungen ein vereinfachtes Verfahren eingesetzt. Dies basiert auf dem Erfüllen von drei Kriterien:

Die Systemrauschtemperatur T_{sys} charakterisiert das gesamte System und ist mit der Gleichung 4.28 einfach zu berechnen. Unter den störungsfreien Bedingungen muss sie zwischen 10000 K und

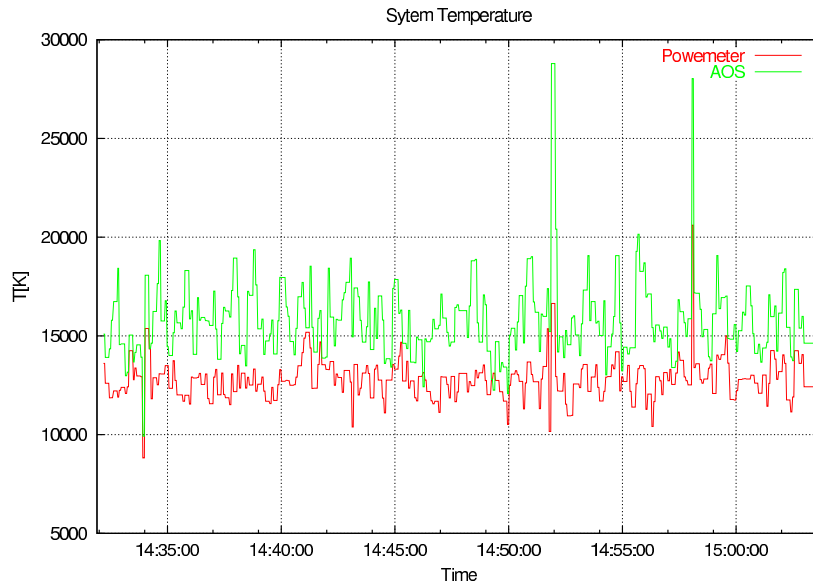


Abbildung 5.19: Systemrauschtemperatur (Messung am 11.12.2000)

20000 K liegen (Abbildung 5.19). T_{sys} wurde einmal von dem Wert des Powermeters und einmal von dem Summenwert des AOS berechnet. Das dritte Kriterium macht sich zu Nutze, dass das Signal sehr schwach ist. Mit anderen Worten bedeutet es, dass der Kontrast von OH oder Wasserlinien im Vergleich zum Rauschen in dem Spektrum von einer Sequenz klein ist. Falls man diese resonanten Beiträge vernachlässigt, würde man nur das nichtresonante Kontinuum (schwarzer Strahler) messen. Dieser hat aber weitgehend ein frequenzunabhängiges Spektrum. Bei Störungen wird das Spektrum verformt. Die Verformung kann man durch die Standardabweichung (RMS-Wert, δ_{n-1}) charakterisieren:

$$\delta_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)} \quad (5.14)$$

x_i Wert des i-ten Frequenzkanals (i-ter Pixelwert)
 n Anzahl der Frequenzkanäle (Pixel) = 2048
 $\langle x \rangle$ Mittelwert

Die Kriterien bzgl. der Standardabweichung muss man unterschiedlich für die Emission- und Absorptionsmessung wählen. Für Emissionsmessungen sollte δ_{n-1} zwischen 5 K und 15 K liegen (Abbildung 5.20). Bei der Absorptionsmessung ist das Signal wesentlich stärker und die Linien (Wasser und OH) sind in den einzelnen Spektren nicht mehr zu vernachlässigen. Die obere Grenze wurde auf 80 K gesetzt.

5.9.6 Die Arbeitsweise des Programms

Die Messgeometrie beeinflusst auch die Arbeitsweise des Programms. Da durch ein seitlich gelegenes Flugzeugfenster gemessen wird, ist es notwendig, solche Flugbahnen zu fliegen, bei denen sich die Sonne auf der linken („backbord“) Seite des Flugzeugs befindet. Die vor dem Flug berechnete Flugbahn (Abschnitt 5.9.7) muss vor dem Beginn der Messung so korrigiert werden, dass die Sonne

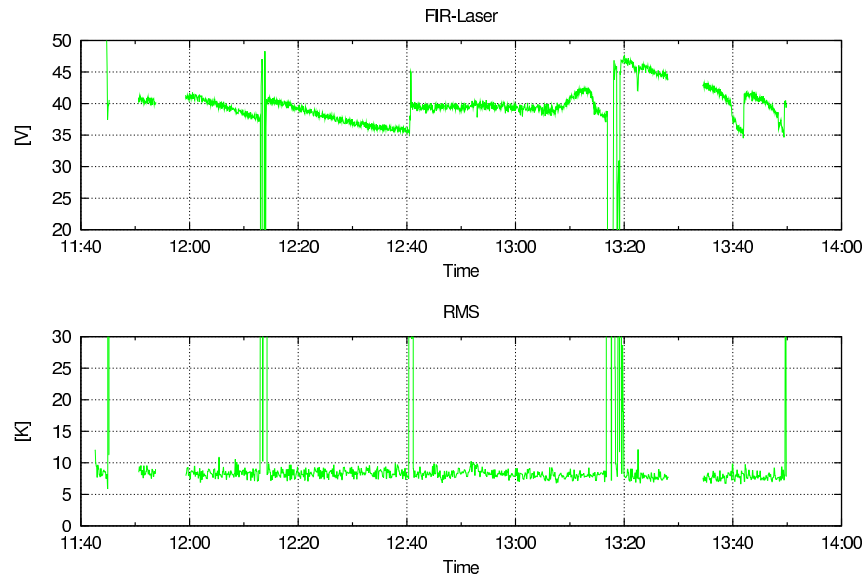


Abbildung 5.20: RMS der kalibrierten Spektren (unten); FIR-Laserleistung (oben) - Die Störungen korrelieren eindeutig (Messung am 19.11.1999).

genau senkrecht zur Flugzeugachse steht. Die Bewegungsfreiheit des Spiegels in horizontaler Ebene beträgt nur $\pm 2^\circ$. Daher ist es notwendig, die Sonne möglichst genau in der Mitte des Sichtfelds zu haben. Dies wird durch eine Korrektur der Flugzeugausrichtung erreicht. Da der Autopilot des Flugzeugs nur stückweise geradlinige Bahnen fliegen kann, ist es notwendig, die Flugrichtung um etwa 1° in 5 Minuten zu korrigieren. Die kleineren Abweichungen werden mit der automatischen Nachführung der Spiegelposition bzw. der Sonnenlage korrigiert.

Das Programm (Abbildung 5.21) beginnt mit der Initialisierung und dem Testen von allen notwendigen Hardware-Komponenten:

- COM0, serielle Schnittstelle für die Kommunikation mit FALCON-Board-Computer. Die Übertragung läuft im Hintergrund über einen Interrupt ab.
- COM1, serielle Schnittstelle für die Kommunikation mit *Housekeeping-Box*.
- COM2, serielle Schnittstelle für die Kommunikation mit LINUX-Rechner.
- LPT0, emulierte IEEE-Schnittstelle
- A/D-Karte
- Video-Karte (Graphik-Modus)

Mit der Initialisierung werden alle für die Messung wichtigen Parameter (Messzyklus und Integrationszeiten) aus einer Init-Datei gelesen. Nach der Initialisierung befindet sich das Programm in sogenanntem *FREE-Modus*. In diesem Modus werden alle Systemparameter ununterbrochen dargestellt. Gleichzeitig wird auch das rohe Spektrum vom AOS gemessen und graphisch dargestellt. Dies ermöglicht dem Benutzer die richtige Arbeitsweise aller Komponenten zu überprüfen. In diesem Modus wird auch die oben beschriebene Suche der richtigen Sonnenlage realisiert.

Erst wenn alle Subsysteme richtig funktionieren, kann der Operator die Messung starten. Die Erfassung eines Rohspektrums dauert relativ lange (*Integrationszeit* ≈ 1 s) und wird von der A/D-Karte selbständig durchgeführt. Vom Programm wird die Datenerfassung mit einem Befehl

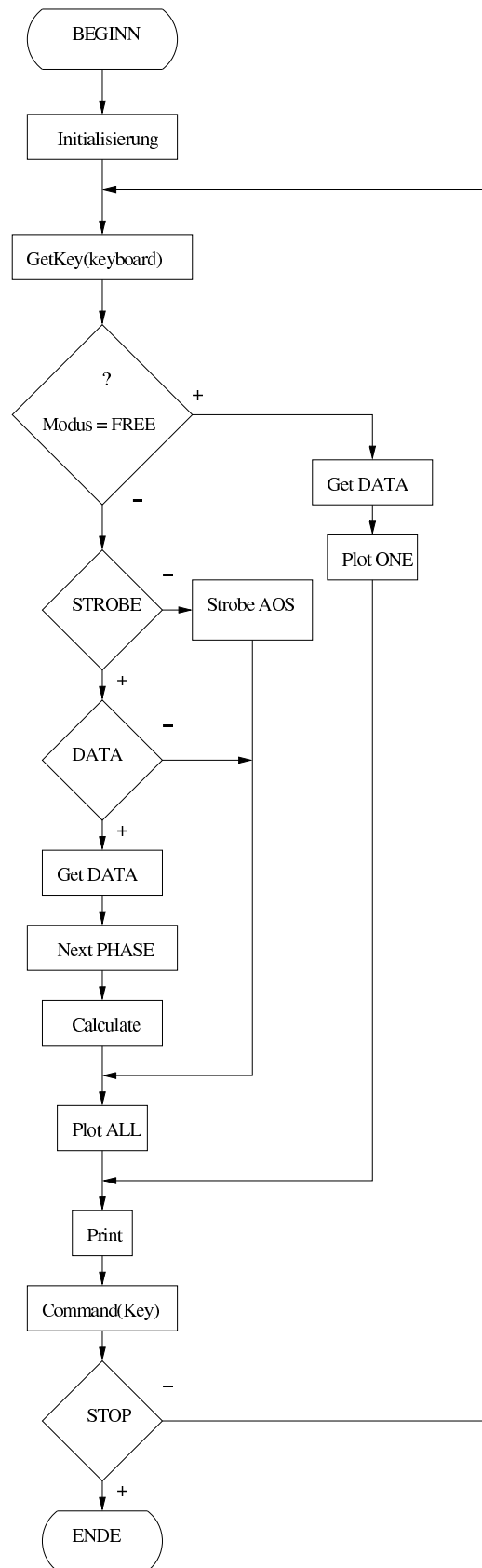


Abbildung 5.21: DOS-Programm, Blockdiagramm

(*STROBE-Strobe AOS*) gestartet. Solange die Daten nicht bereitstehen (*DATA*), werden nur die Systemparameter auf dem Bildschirm aktualisiert. Erst nach der Übertragung der Daten von der A/D-Karte (*Get DATA*) werden die Spektren neu berechnet. Auf dem Bildschirm können wahlweise mehrere Arten von Spektren dargestellt werden:

- Rohes Spektrum, das zuletzt gemessene direkte AOS-Spektrum.
- Differenzspektrum, das Spektrum wird als Differenz vom „HOT“- (oder „VERY-HOT“) und „COLD“-Spektren gebildet und dient vor allem als einer von mehreren Parametern, mit denen sich die richtige Funktion des Systems überprüfen lässt.
- Das einzelne kalibrierte Spektrum, das Spektrum von einem Messzyklus. Es können je nach der Art der Messung (Winkelondierung) mehrere Spektren gleichzeitig dargestellt werden.
- Das integrierte Spektrum (Summenspektrum), es werden nur die Spektren addiert, die bestimmte Kriterien erfüllen (Abschnitt 5.9.5).

Die in Abbildung 5.21 dargestellte Arbeitsweise des DOS-Programms ist stark vereinfacht. Eine detaillierte Beschreibung würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Bei der Programmentwicklung wurden folgende Optimierungen berücksichtigt:

1. Bildschirm-Darstellung

Die Video-Karte liest zyklisch die Daten aus dem Arbeitsspeicher in den Videospeicher. Bei gleichzeitigem Zugriff vom Programm und der Karte wird das Programm verlangsamt (die Karte hat notwendigerweise größere Priorität). Deswegen wurde der Videospeicher auf zwei sogenannte Videopages verteilt. In einer Videoseite sind die Daten, die aktuell dargestellt werden. In die andere Seite schreibt das Programm die neuen Daten. Erst wenn der Aufbau der Seite vollständig ist, werden die Seiten vertauscht.

2. Speicher-Optimierung

Das Betriebssystem DOS kann nur einen relativ kleinen Arbeitsspeicher verwalten. Dieser ist für gleichzeitiges Speichern aller notwendigen Daten zu klein. Die Daten müssen temporär auf die Festplatte gespeichert werden. Die Zugriffe auf die Festplatte sind aber langsam. Aus diesem Grund wurde die Berechnung der Spektren so optimiert, dass möglichst wenige Festplattenzugriffe vorkommen.

3. Paralleler Ablauf von Programmteilen

Das Betriebssystem DOS ermöglicht keine Multitasking-Programmierung. Nur über einen Interrupt ist es möglich, kleine Programmstücke selbstständig laufen zu lassen. So z. B. werden die Daten aus dem FALCON-Boardcomputer in den Speicher des DOS-Rechners übertragen, ohne dass sich das Hauptprogramm um die Aktualisierung der Daten kümmern müsste. Auch die oben beschriebene Zusammenarbeit des Programms mit der A/D-Karte kann man als parallel laufende Prozesse betrachten.

5.9.7 Flugbahnrechnung

Das für den FIR-Bereich transparente Fenster liegt auf der linken („backbord“) Seite des FALCON-Flugzeugs. Dadurch ist die Flugbahn während der Absorptionsmessung vorgegeben, die Sonne muss sich auf der linken Seite des Flugzeugs befinden. Da sich die Sonne während des mehrstündigen Flugs bewegt ($15^\circ h^{-1}$), muss sich auch die Flugrichtung mit der Sonnenlage ändern. Dies verlangt eine Bahnkorrektur um $1,25^\circ$ in 5 Minuten, da der Autopilot nur stückweise geradlinige Bahnen einhalten kann.

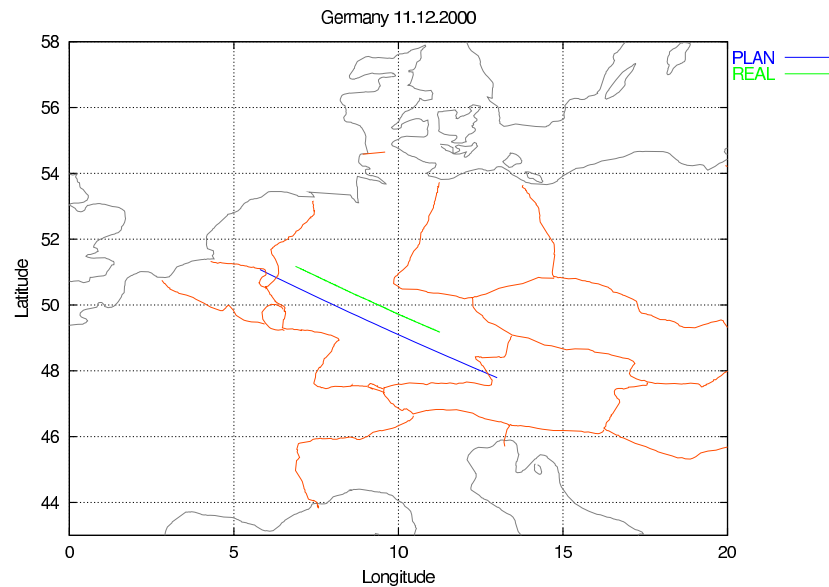


Abbildung 5.22: Die berechnete und die wirkliche Flugbahn am 11.12.2000

Die Lage ist noch etwas komplizierter, denn die Flugrichtung muss nicht unbedingt mit der Ausrichtung des Flugzeugs übereinstimmen. Um z. B. einem seitlichen Wind entgegen zu wirken, ist die Längsachse des Flugzeugs nicht parallel zu Flugrichtung.

Aus Sicherheitsgründen verlangt die Flugüberwachung die Bekanntmachung der Flugbahn, vor allem in einem so dicht besiedelten Gebiet wie Europa, schon vor dem Flug. Auf der anderen Seite ist die genaue Berechnung der Flugbahn wegen unberechenbarer Einflüsse unmöglich. Dazu zählt vor allem die Wetterlage. Diese ist meistens kurz vor dem Start bekannt, aber kann sich aber während des Flugs ändern. Weiter ist auch der genaue Zeitpunkt und die geographische Lage, wann die Messung beginnt, nur mit einer gewissen Unsicherheit bekannt. Die Messung kann erst nach dem Erreichen der richtigen Flughöhe gestartet werden. Die Flugüberwachung lässt einen ausreichend großen Spielraum für die vorberechnete Bahn.

Die Berechnung der Flugbahn beginnt mit dem Bestimmen des Startpunkts der Messung. Es wird sowohl die Zeit als auch die geographische Lage gewählt. Die Wahl berücksichtigt auf der einen Seite die wissenschaftlichen Anforderungen. Wie schon früher erwähnt, variiert die OH-Konzentration in der Atmosphäre mit der Tageszeit. Bei dem Messflug am 14.12.2000 wollte man z. B. den Anstieg der OH-Konzentration nach dem Sonnenaufgang beobachten. Auf der anderen Seite müssen auch die formalen organisatorischen Anforderungen der Bodenkontrolle berücksichtigt werden. Es ist nämlich wesentlich einfacher, einen Flug zu organisieren, der sich nur über den Flugraum eines Staates erstreckt. So wurde z. B. am 11.12.2000 nur über dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland geflogen (Abbildung E.1). Am 14.12.2000 in Faro/Portugal musste man, da der Zeitpunkt schon vorgegeben wurde, zuerst in nord-westlicher Richtung fliegen (Abbildung E.3), bis man mit Messungen starten konnte. Andernfalls hätte sich die Flugbahn über das Marokko-Gebiet erstrecken. Die Berechnung besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil muss aus der vorgegebenen geographischen Lage und dem Zeitpunkt die aktuelle Sonnenlage bestimmt werden. Diese Rechnung berücksichtigt außer der Tageszeit nur die Jahreszeit (Neigung der Rotationsachse der Erde). Es werden keine anderen Einflüsse, wie Mond oder die Rotation der Drehachse berücksichtigt.

Der zweite Teil berechnet die eigene Flugbahn. Dazu ist es notwendig, die Flugzeuggeschwindigkeit zu kennen. Streng genommen müsste man bei der Rechnung die Transformation zwischen den kartesischen und den Winkelkoordinaten (Kugelkoordinaten der Erde) berücksichtigen. Die oben aufgeführten Gründe ermöglichen aber eine starke Vereinfachung der Rechnung. Die Flüge fanden

in einem relativ kleinem geographischem Bereich ($30^\circ - 50^\circ$) statt. Aus den vorherigen Messflügen (MAHRSI) konnte man eine typische Winkelgeschwindigkeit des Flugzeugs in zwei zueinander senkrechten Richtungen abschätzen. Die *latitudinale Geschwindigkeit* beträgt nach dieser Abschätzung etwa $0,18^\circ \text{min}^{-1}$ und die *longitudinale Geschwindigkeit* etwa $0,11^\circ \text{min}^{-1}$. Die Rechnung wird mit einem Zeitschritt von einer Minute durchgeführt, das heißt, nach jeder Minute wird die Position der Sonne neu berechnet und die Flugrichtung entsprechend korrigiert. In Abbildung 5.22 sind die berechneten und die wirklichen Flugbahnen dargestellt. Die nördliche Verschiebung wurde von der Bodenkontrolle angeordnet. Damit wurde erreicht, dass die komplette Flugbahn nur über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verläuft.

Teil III

Messungen

Kapitel 6

Hilfsmessungen

Die Hilfsmessungen am Heterodynspektrometer kann man in zwei Gruppen aufteilen:

- Messungen für das Testen der Funktion des Heterodynempfängers
- Charakterisierung des Spektrometers

6.1 Testmessungen - Funktion des Systems

Das Ziel dieser Messungen ist es die Funktion des Heterodynspektrometers möglichst schnell zu überprüfen, bzw. die fehlerhaft arbeitenden Elemente zu lokalisieren. Zu solchen Tests zählen:

- Messung der Systemrauschtemperatur T_{sys} („HOT/COLD“) mit Powermeter (siehe Abschnitt 5.7)
- Messung der Stabilität - 1/f-Rauschen („HOT/COLD“) mit Powermeter (siehe Abschnitt 5.7)
- Messungen mit Grau-Strahler
- Messung des Differenz-Spektrums

Grau-Strahler

Grobe Störungen können mit Powermeter-Messungen der Leistung im gesamten Frequenzbereich des Spektrometers (1,4 - 2,8 GHz) entdeckt werden. Bei einem komplexen Test wird statt des Atmosphärensignals das Signal aus einer „vordefinierten“ Strahlungsquelle gemessen. Als Signalquelle dient die kalte Kalibrierquelle, wobei die Lage des Spiegels absichtlich verstellt wird, so dass das Spektrometer einen „grauen Strahler“ mit der Temperatur zwischen 77 K und 300 K misst. In idealem Fall ist dann das gemessene Spektrum eine verrauschte Gerade. Abbildung 6.1 zeigt ein solches Spektrum.

Um die qualitativen Aussagen aus der Messung des grauen Strahlers zu gewinnen, wird vorausgesetzt, dass sich der Messfehler ΔT sowohl in der Zeitdomäne als auch in der Frequenzdomäne gleichermaßen verhält. In der Frequenzdomäne kann man den Temperaturfehler als Standardabweichung vom Mittelwert berechnen:

$$\delta_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \langle T \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2 \right)} \quad (6.1)$$

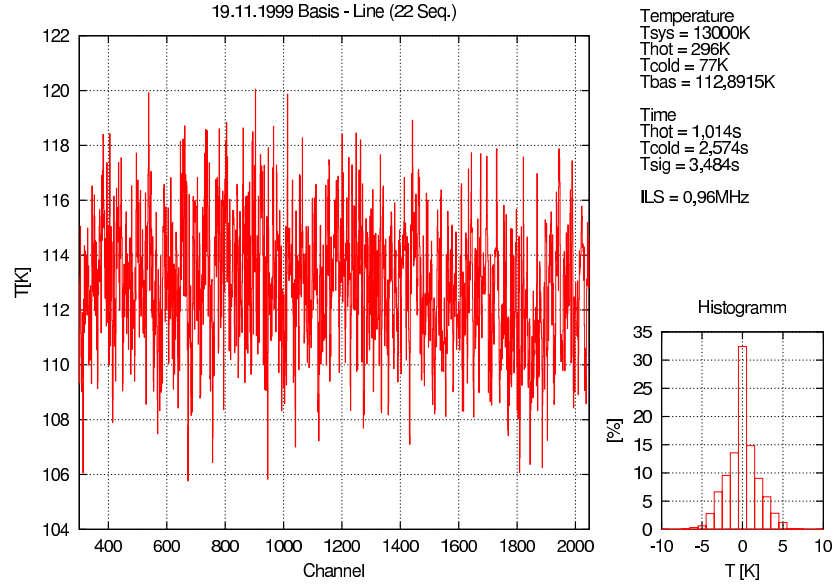


Abbildung 6.1: Grauer Strahler

T_i spektrale Temperatur von i-tem Frequenzkanal
 n Anzahl von Frequenzkanälen (Pixel) = 2048
 $\langle T \rangle$ Mittelwert, Basistemperatur

Für die Daten in der Abbildung 6.1 ergibt sich z. B.:

$$\delta_{n-1} = 2,31 \text{ K} \quad (6.2)$$

In der Zeitdomäne verhält sich der Fehler folgendermaßen (siehe [5]):

$$\Delta T = \sqrt{\frac{1}{B} \left(\frac{x^2}{\tau_{sig}} + \frac{y^2}{\tau_{cold}} + \frac{z^2}{\tau_{hot}} \right)} \quad (6.3)$$

mit

$$x^2 = (T_{sys} + T_{sig})^2 \quad (6.4)$$

$$y^2 = \left(\frac{T_{sig} - T_{hot}}{T_{hot} - T_{cold}} (T_{sys} + T_{cold}) \right)^2 \quad (6.5)$$

$$z^2 = \left(\frac{T_{sig} - T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} (T_{sys} + T_{hot}) \right)^2 \quad (6.6)$$

und effektiver Bandbreite von einem Frequenzkanal (siehe [15]):

$$B = \sqrt{\frac{2\pi}{\ln(2)}} \sigma_{ILS} \quad (6.7)$$

und mit einer Halbwertsbreite der ILS-Linie (Abbildung 5.8):

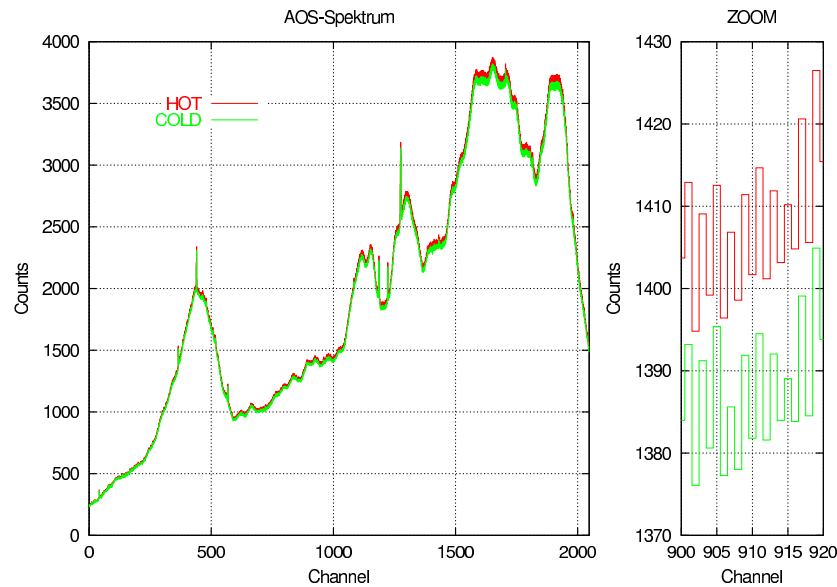


Abbildung 6.2: Einstrahlspektrum - HOT und COLD

$$\sigma_{ILS} = 0,96 \text{ MHz} \quad (6.8)$$

Das Spektrum in Abbildung 6.1 besteht aus 22 summierten Einzelspektren. Die notwendigen Parameter sind in der Abbildung 6.1 aufgelistet. Für ΔT gilt dann:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{1}{BN} \left(\frac{x^2}{t_{sig}} + \frac{xy^2}{t_{cold}} + \frac{z^2}{t_{hot}} \right)} = 1,78 \text{ K} \quad (6.9)$$

$N = 22$	Anzahl von Einzelspektren
$\tau_{sig} = N t_{sig}$	Messzeit des Atmosphärensignals
$\tau_{cold} = N t_{cold}$	Messzeit des Signals aus der kalten Kalibrierquelle (COLD)
$\tau_{hot} = N t_{hot}$	Messzeit des Signals aus der heißen Kalibrierquelle (HOT)
$t_{sig}, t_{cold}, t_{hot}$	Messzeiten für einzelne Signalquellen in einem Messzyklus

Das Verhältnis $\frac{\delta_n - 1}{\Delta T} = 1,3$ drückt aus, wie weit der Messfehler von dem theoretisch möglichen Wert entfernt ist. Bei schlechten Verhältnissen (stärkere Störungen) ist dieser Koeffizient größer als 2.

Differenz-Spektrum

Das empfangene Signal aus der kalten („COLD“) bzw. heißen („HOT“) Quelle hat nach dem Abschnitt 4.3.1 die Form:

$$S_{hot} = c \cdot kB(T_{sys} + T_{hot}^l) \quad (6.10)$$

$$S_{cold} = c \cdot kB(T_{sys} + T_{cold}^l) \quad (6.11)$$

Mit der Definition von:

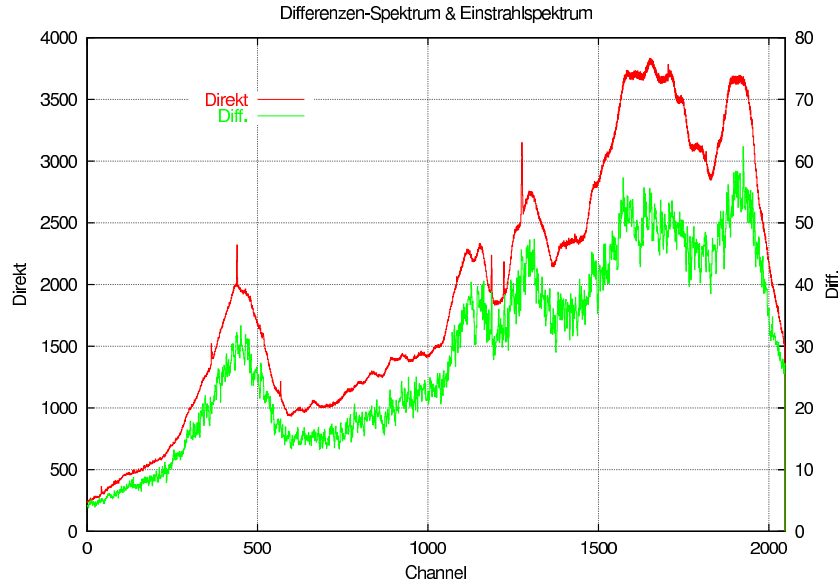


Abbildung 6.3: Einstrahlungsspektrum und Differenz-Spektrum

$$k_{hot} = 1 + \frac{T'_{hot}}{T_{sys}} \approx 1 \Leftrightarrow (T'_{hot} \ll T_{sys}) \quad (6.12)$$

$$k_{cold} = 1 + \frac{T'_{cold}}{T_{sys}} \approx 1 \Leftrightarrow (T'_{cold} \ll T_{sys}) \quad (6.13)$$

kann man die Gleichungen 6.10 und 6.11 umschreiben:

$$S_{hot} = k_{hot} c \cdot kBT_{sys} \quad (6.14)$$

$$S_{cold} = k_{cold} c \cdot kBT_{sys} \quad (6.15)$$

Das „Einstrahlungsspektrum“ ist daher vorwiegend durch $c \cdot kBT_{sys}$ bestimmt. Der Verlauf des Spektrums (Abbildung 6.2) ist durch die Eigenschaften der Signalkomponenten (Frequenzcharakteristik von 1. und 2. Mischer, Bandpass, alle Verstärker, AOS, ...) gegeben und für das Heterodynenspektrometer charakteristisch.

Für das sog. Differenz-Spektrum gilt:

$$S_{dif} = S_{hot} - S_{cold} = (k_{hot} - k_{cold}) c \cdot kBT_{sys} = k_{dif} c \cdot kBT_{sys} \quad (6.16)$$

mit

$$k_{dif} = k_{hot} - k_{cold} = \frac{T'_{hot} - T'_{cold}}{T_{sys}} \ll 1 \quad (6.17)$$

Nach der Gleichung 6.16 hat das Differenz-Spektrum bis auf die multiplikative Konstante den gleichen Verlauf wie das direkte Einstrahlungsspektrum (Abbildung 6.3). Für eine schnelle Kontrolle des Heterodynensystems bei einer Messung wird das Differenz-Spektrum in Echtzeit berechnet und

gemeinsam mit letztem Einstrahlspektrum dargestellt. Das Differenz-Spektrum enthält die Information von beiden Kalibrierspektren in einem Messzyklus und ist daher für die Kontrolle der richtigen Funktion des Heterodynspektrometers geeignet.

Bei richtiger Funktion des Systems muss die folgende Bedingung für alle Frequenzkanäle (Pixel) erfüllt sein:

$$S_{dif} > 0 \quad (6.18)$$

Bei schwächeren Störungen ändert sich die Form des Differenz-Spektrums, was optisch sehr schnell festzustellen ist. Bei starken Störungen wird die Bedingung 6.18 verletzt.

6.2 Messungen zur Charakterisierung des Spektrometers

Nach den tiefreichenden Änderungen vor allem im Bereich des akustooptischen Spektrometers musste das Heterodynsystem erneut charakterisiert werden. Für die Charakterisierung des Empfängers sind spektrale Messung mit Methanol (CH_3OH) am besten geeignet. Die Messanordnung ist in [5] beschrieben. Für den Empfangsbereich des Heterodynspektrometers THOMAS sind zwei Methanolinien von Bedeutung:

$$f_1 = 2514,50 \text{ GHz} = 83,87484 \text{ cm}^{-1} \approx \text{Frequenzkanal 1331; unteres Band (LO}_2 = 6,4 \text{ GHz)} \quad (6.19)$$

$$f_2 = 2530,72 \text{ GHz} = 84,41560 \text{ cm}^{-1} \approx \text{Frequenzkanal 1825; oberes Band (LO}_2 = 6,4 \text{ GHz)} \quad (6.20)$$

Diese Linien sind bei den Messbedingungen im Labor opaque. Unter der Berücksichtigung der beiden Seitenbänder ergibt sich für die Kontraste T_{1k} und T_{2k} der beiden Linien:

$$T_{basis} + 2 \cdot T_{ik} = T_{hot} \quad (6.21)$$

mit

T_{basis}	Die Temperatur der Strahlungsquelle (abgeschwächt durch die Messzelle, ...)
$T_{ik} = T_{1k} \text{ oder } T_{2k}$	Kontrast der Linie (die Temperatur im Linienzentrum über der Basislinie)
$T_{hot} \approx 296 \text{ K}$	Raumtemperatur (Labor)

Im Anhang B ist die optimale Einstellung des Diplexers bzgl. der Mitte der beiden Seitenbänder berechnet. Auf gleiche Weise kann man die Einstellung für die Methanolinien bestimmen (Abbildung 6.4). Für die Maximumordnung ergibt sich:

$$m = 155 \text{ oder } 156 \quad (6.22)$$

Die Messungen von Methanolspektren wurden sowohl in Emission (gegen eine Strahlungsquelle bei der Temperatur von 77 K) als auch in Absorption (zusätzliche Kalibrierquelle wurde umgebaut) durchgeführt (Abbildung 6.5).

Für die Auswertung der Messdaten wurden die Methanolinien durch zwei Gaußfunktionen folgender Form gefittet:

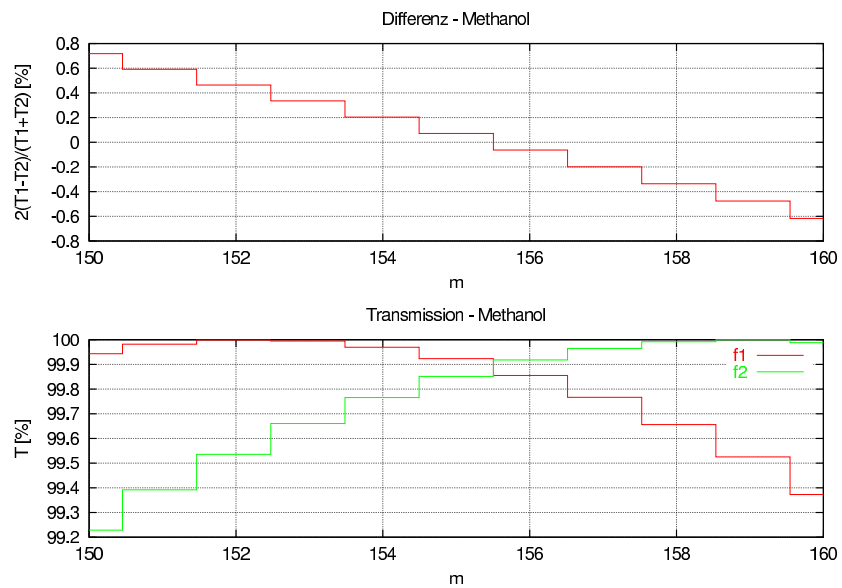


Abbildung 6.4: a) Kontrastdifferenz der beiden Methanollinien in Abhängigkeit vom m b) Transmission der Methanollinien in Abhängigkeit vom m

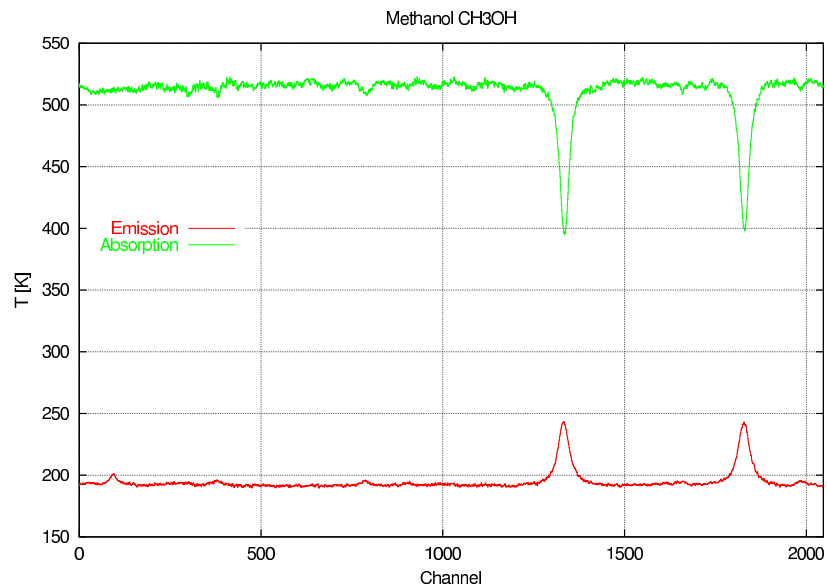


Abbildung 6.5: Methanol in Absorption und Emission

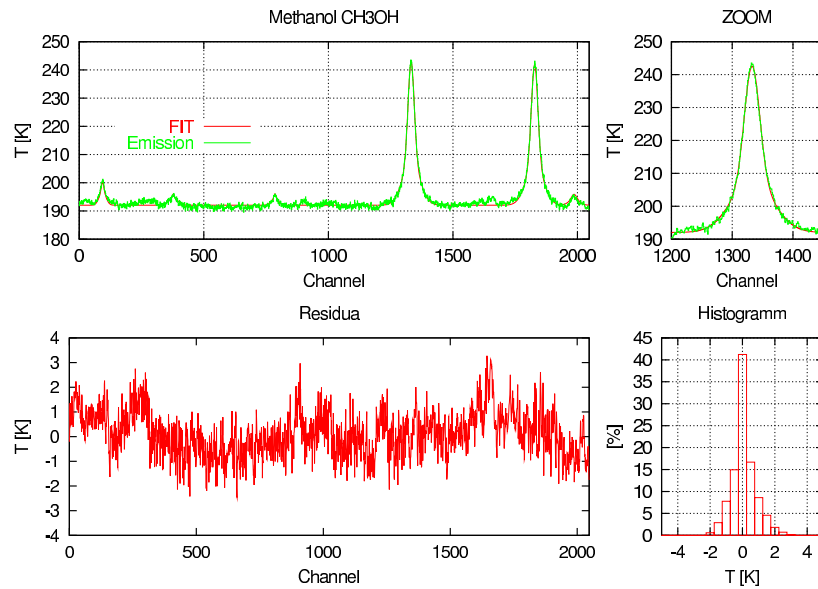


Abbildung 6.6: Methanol in Emission mit Fit

$$T_{1,2}(x) = T_{basis} + \sum_{i=1}^2 A_i \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{B_i}\right) \quad (6.23)$$

x	AOS-Pixel, Frequenzkanal
$x_0 = 1331 \text{ oder } 1825$	Lage der Linie
A_i, B_i	Parameter der Gauß-Kurve

Bei der Auswertung der Daten wurden zwei Parameter betrachtet:

- aus der Gleichung 6.21 berechnete Raumtemperatur T_{hot}
- die Kontrast-Abweichung der beiden Linien:

$$\Delta = 2 \cdot \frac{T_{1k} - T_{2k}}{T_{1k} + T_{2k}} \quad (6.24)$$

Die Messergebnisse sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die meisten Messungen wurden in Absorption durchgeführt, dadurch wurde die Messzeit kürzer. Durch die niedrige Temperatur der „HOT“-Kalibrierquelle (Extrapolation) erhöhte sich die Ungenauigkeit der Basislinie, was sich in der Abweichung der berechneten Raumtemperatur T_{hot} von der Realität (296 K) zeigt. Emissionsmessungen dagegen zeigen eine hervorragende Übereinstimmung (zwischen 294 K und 298 K) mit dem wirklichen Wert.

Die Messungen wurden unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt:

- Die Pixelintegrationszeit (CCD-Beleuchtungszeit im AOS) wurde bei der Messung am 23.11.2000 um 9^{55} probeweise auf 26 ms erhöht.
- Bei der Messung am 23.11.2000 um 12^{15} wurde eine andere Mischdiode (T4) benutzt.

			unteres Band			oberes Band						
Datum	Zeit	Diode	T_{hot} [K]	T_{basis} [K]	T_{1k} [K]	T_{hot} [K]	T_{basis} [K]	T_{2k} [K]	Diff. [%]	LO_2 [GHz]	Art	T_{pix} [ms]
13.11.2000	11 : 49	T3	299	192	53,31	294	193	50,72	4,98	6,4	Emis.	15
	12 : 49		298	190	54,00	294	190	52,00	3,77	6,4		15
21.11.2000	10 : 00		270	543	136,36	284	545	130,53	4,37	6,4	Abs.	15
	11 : 22		271	542	135,41	287	544	128,83	4,98	6,5		15
	14 : 08		275	542	133,50	294	544	124,83	6,71	6,3		15
	14 : 48		259	531	136,06	279	537	128,77	5,50	6,2		15
23.11.2000	9 : 55		268	539	135,23	287	542	127,50	5,88	6,2		26
	10 : 53		262	545	141,43	288	548	129,73	8,63	6,1		15
	11 : 48		277	537	130,21	300	537	118,83	9,14	5,9		15
	12 : 15	T4	303	532	114,41	311	528	108,22	5,56	6,4		15

Tabelle 6.1: Test der radiometrischen Genauigkeit

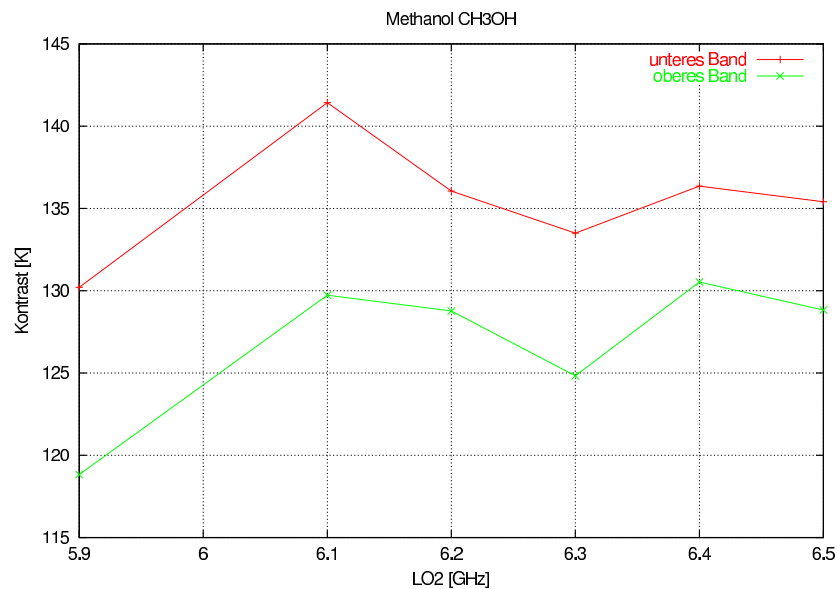


Abbildung 6.7: Kontrast der Methanollinien in Abhängigkeit von der Frequenz (2. LO)

- Die Frequenz des zweiten Lokaloszillators wurde variiert (Abbildung 6.7). Dadurch bewegte sich die Lage der Linien im Spektrum.

Sowohl die Änderung der Pixelintegrationszeit als auch der Umtausch der Mischerdiode haben keinen Einfluss auf die gemessenen Spektren (im Gegensatz zu [5]).

Abbildung 6.7 zeigt den Kontrast der beiden Methanollinien in Abhängigkeit von der Frequenz des zweiten Lokaloszillators (und dadurch von dem Frequenzkanal im AOS). Es ist keine systematische Abhängigkeit festzustellen.

Der Kontrast der ersten Linie bei $f_1 = 2514,50 \text{ GHz}$ ist systematisch größer als bei der zweiten Linie. Dies hat zwei Ursachen:

- Die Absorption im oberen Seitenband ist größer. Im oberen Seitenband befindet sich eine Wasserlinie, die auch bei der Atmosphärenmessungen gemessen wurde. Die Simulationsrechnung (FASCOD siehe [4]) des Transmissionskoeffizienten ergab:

$$\tau_1 = 0,8914; \text{unteres Band}$$

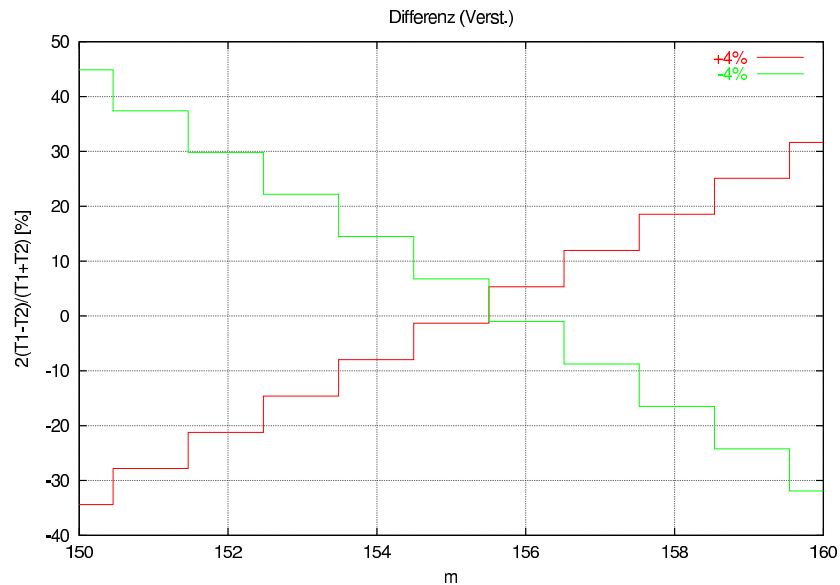


Abbildung 6.8: Kontrast-Differenz von Methanollinien bei verstelltem Diplexer (Simulationsrechnung)

$$\tau_2 = 0,8827; \text{oberes Band}$$

Dies ergibt:

$$\Delta = 2 \cdot \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \approx 1\% \quad (6.25)$$

- Der Diplexer kann nicht optimal für beide Methanollinien eingestellt werden: Abbildung 6.8 zeigt die Abhängigkeit der Kontrast-Differenz Δ von Maximumordnung m (siehe Anhang B). Für die beiden optimalen Einstellungen ($m=155$, 156) werden die positiven Werte immer bevorzugt: Für die Verstimmung des Diplexers um $\pm 4\%$ beträgt die Abweichung etwa -1% bis $+7\%$.

Da bei dem Diplexer keine Null-Lage definiert ist, ist es notwendig, die richtige Position (m) experimentell festzustellen. Abbildung 6.9 zeigt die Abweichung des Kontrasts von beiden Linien bei der Verstimmung des Diplexers für verschiedene Einstellungen (m). Die optimale Einstellung ergibt sich für das Maximum in der Nähe von $91,4 \text{ mm}$ (relative Längeneinheiten auf dem Diplexer).

Die optimale Einstellung für OH-Linien ist in Abbildung 6.10 berechnet.

Fazit:

- Da die Nullposition des Diplexers nicht definiert ist, ist es notwendig, eine Messung mit Methanol durchzuführen. Dabei wird eine Diplexer-Position bestimmt, bei der die beiden Linien gleichermaßen transmittiert werden.
- Die so bestimmte Position entspricht der Maximum-Ordnung $m=155$ oder $m=156$. In dieser Position ist der Diplexer nicht auf die maximale Transmission von beiden Methanollinien optimiert (das ist auch nicht möglich, weil die Linien bzgl. der LO1-Frequenz asymmetrisch verteilt sind).

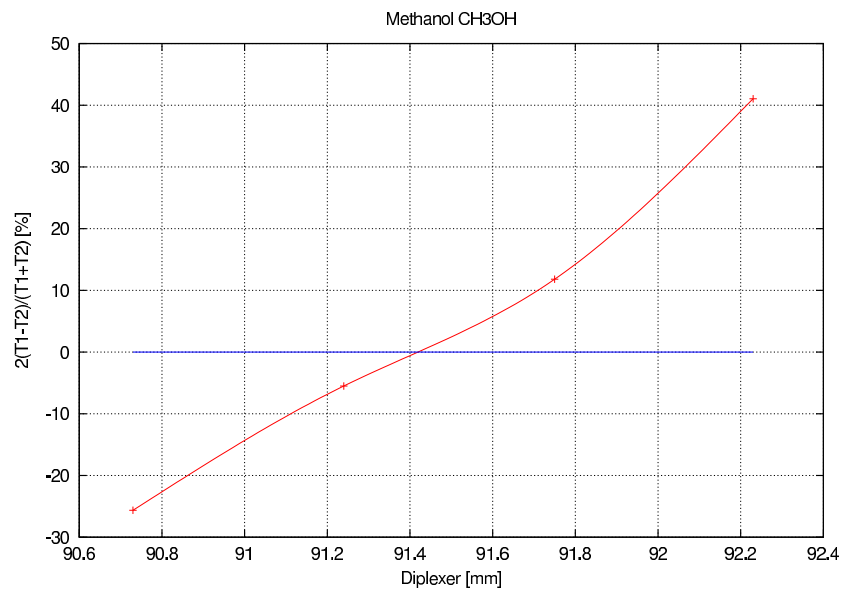


Abbildung 6.9: Kontrast-Differenz der Methanollinien bei verstimmtm Diplexer (Messung) in Abhängigkeit von relativen Längeneinheiten am Diplexer

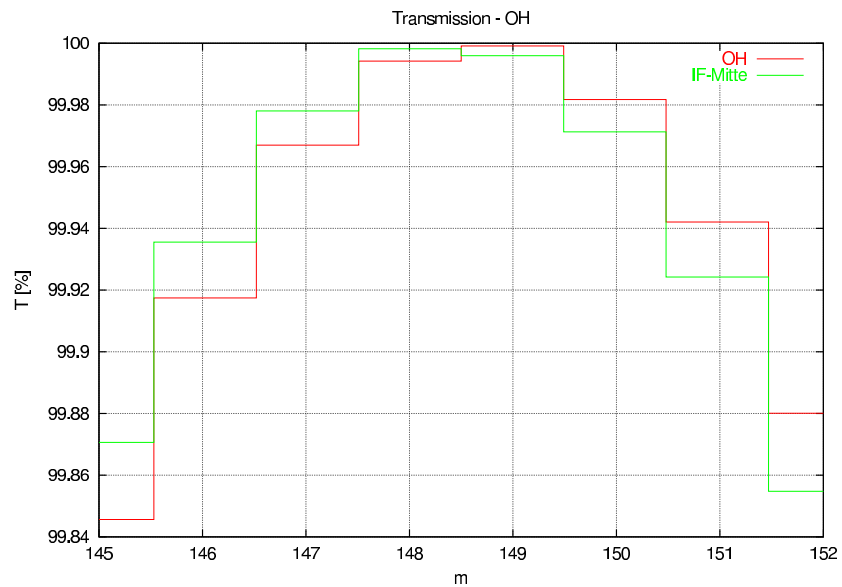


Abbildung 6.10: Transmission des Diplexer für OH

- Die Einstellung des Diplexers für OH-Messungen ist auf eine maximale Transmission bei der Frequenz von OH-Triplet optimiert ($m=149$).
- Die Transmission als Funktion der Ordnung des Transmissions-Maximums (m) ist relativ unempfindlich (Abbildung 6.10), solange keine Verstimmung des Diplexers relativ zum Maximum vorliegt. Anderfalls (kleine Verstimmung) ist die Transmission extrem abhängig von m .

Kapitel 7

OH - Emissionsmessungen

Das Heterodynsystem THOMAS wurde zunächst zur Messung von atmosphärischem OH in Emission eingesetzt. Bei jeder Kampagne wurde die Qualität der gewonnenen Messdaten verbessert. Trotzdem gibt es dabei Grenzen, die aus dem Messprinzip resultieren.

Da nur die emittierte Strahlung der Atmosphäre gemessen wird, ist das empfangene Signal sehr schwach im Vergleich zu Systemrauschen des Empfängers (T_{sys}). Um aus dem Signal für die Inversionsrechnung geeignete spektrale Daten zu gewinnen, ist es notwendig, eine lange Zeit zu messen. Da aber aus dem nicht stationären Flugzeug gemessen wird, stammen die Messdaten aus räumlich verschiedenen Bereichen.

In Vergleich zu Absorptionsmessung gegen der Sonne gibt es hier keine bewegliche Quelle. Das erhöht die Zuverlässigkeit der gemessenen Daten. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass man wegen der relativ niedrigen Temperatur der Atmosphäre mit einer einfachen „HOT“-Kalibrierquelle bei Raumtemperatur auskommt. Dabei werden die optimalen Bedingungen für die radiometrische Kalibrierung, wie sie im Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurden, eingehalten.

7.1 Beispiele der OH-Emissionsmessungen

Das gemessene Spektrum gemäß dem Paragraph 4.1 enthält Anteile aus dem oberen und aus dem unterem Seitenband. Um die OH-Linien von anderen Signaturen zu trennen, wurde die Wasserlinie durch vier Lorentz-Kurven und das Kontinuum durch eine waagrechte Gerade angenähert:

$$T_{H_2O}(x) = B + \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{(x - x_0)^2 + G_i^2} \quad (7.1)$$

x	AOS-Pixel, Frequenzkanal
B	Kontinuum
x_0	Lage der Wasserlinie
A_i, B_i	Parameter der Lorentz-Kurve

Von dem ursprünglichen Spektrum wurde die aus dem Fit gewonnene Kurve abgezogen. Die Fitqualität wurde durch die Berechnung der Residuen und insbesondere deren Histogramme überprüft. Ein Beispiel für ein so verarbeitetes Spektrum ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Im Idealfall bilden die Residuen eine durch das weiße Rauschen behaftete Gerade.

In der Tabelle 7.1 sind einige der aus dem Fit gewonnenen Parameter aufgeführt.

Datum	Pointing	Flughöhe [m]	B [K]	x_0 [Chan.]
17.11.1999	10°	11850	155,7	461,1
19.11.1999	7°	11250	189,2	462,5
	16°		139,8	460,3
	25°		130,1	460,1
12.12.2000	8°	12470	150,4	458,2
	15°		118,2	457,6
	25°		110,1	457,1
14.12.200	8°	11860	173,5	466,0
	15°		138,8	461,3
	25°		123,6	461,1

Tabelle 7.1: Fitparameter der Wasserlinie

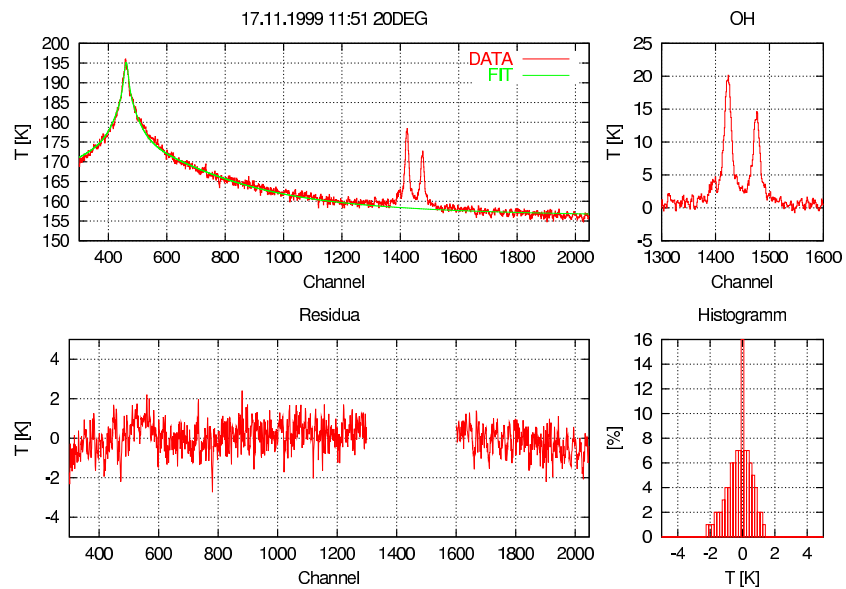


Abbildung 7.1: Spektrum vom 17.11.1999

Winkel	Basis	Kontrast H_2O	Kontrast OH
8°	160 K	24 K	3 K/17 K/12 K
15°	120 K	48 K	3,5 K/18 K/12,5 K
25°	110 K	48 K	2 K/16 K/10 K

Tabelle 7.2: Winkelsondierung vom 12.12.2000

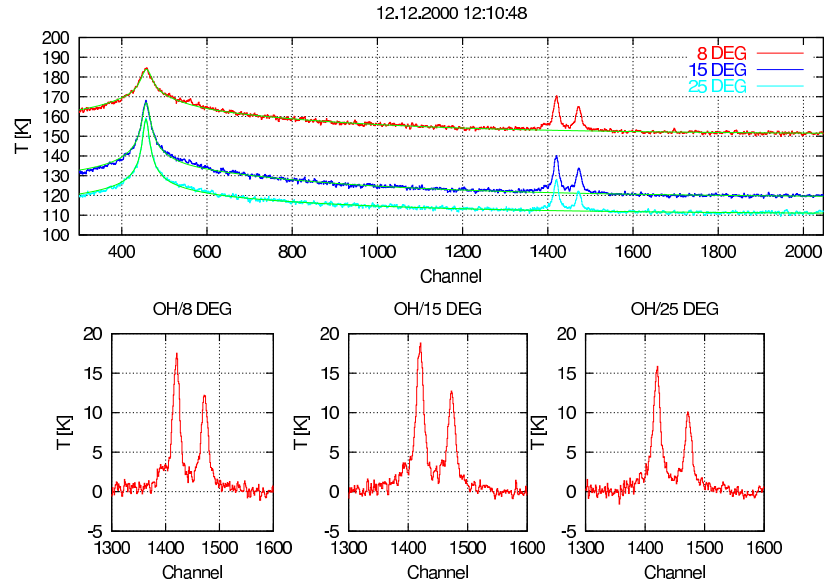


Abbildung 7.2: Gleichzeitig aufgenommene Spektren vom 12.12.2000 .

In Abbildung 7.2 sind Daten aus einer Winkelsondierungsmessung dargestellt. Bei dem Winkel von 8° blickt man durch eine „dickere“ Atmosphärenschicht. Die nichtresonante Beiträge sind stark, in Folge dessen liegt die Basislinie hoch (160 K). Der Kontrast der Linien, besonders der Wasserlinie ist klein. Bei höheren Winkeln sinkt die Basislinie. Der Kontrast der Wasserlinie ist bei 15° und 25° konstant. Der Kontrast von OH-Linien ist bei einem Winkel von 15° maximal¹.

¹Die Signalstärke von OH-Beiträgen ist abhängig von der Dicke der Schicht, wo sich OH befindet. Bei niedrigeren Winkeln blickt man durch eine dickere Atmosphärenschicht. Auf der anderen Seite scheint für einen Beobachter bei niedrigeren Winkeln auch die tiefere wasserhaltige und dadurch stark absorbierende Schicht dicker zu sein. Diese zwei Prozesse sind nicht vom Vertikalwinkel linear abhängig und ergeben zusammen für den Vertikalwinkel einen optimalen Wert im Bezug auf die Signalstärke (OH).

Kapitel 8

OH - Absorptionsmessungen

Die Entwicklung des Heterodynsystem THOMAS seit Anfang der 90er Jahre ist, vor allem beim Schottkymischer, an die physikalischen Grenzen der Machbarkeit gestoßen. Eine weitere Verbesserung der gemessenen Daten ist nicht mit der Verbesserung des bestehenden Systems zu erreichen¹. Die einzige Möglichkeit, die Qualität der Messdaten zu erhöhen, besteht in der Wahl einer anderen Signalquelle. Da OH nur am Tag in der Atmosphäre vorhanden ist, zeichnet sich die Sonne als eine ideale Strahlungsquelle aus. Die spektralen Eigenschaften der Erdatmosphäre werden dann in Absorption gemessen.

Der technische Aufwand bei der Absorptionsmessung ist wesentlich höher als bei der Emissionsmessung. Die Sonne ist im Bezug auf das fliegende Flugzeug eine bewegliche Strahlungsquelle. Die Qualität der gemessenen Daten ist abhängig von der Nachführung. Die hohe Temperatur der Strahlungsquelle verbietet die Kalibrierung mittels einer einfachen 300 K-Kalibrierquelle. Die gemessenen Daten sind empfindlich gegenüber der Nichtlinearität des Systems.

Bei Überwindung der technischen Schwierigkeiten erwartet man bei der Absorptionsmessung ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis bei gleichzeitig verkürzter Messzeit. Das wiederum verbessert die räumliche Auflösung der Messdaten.

8.1 Beispiel der OH-Absorptionsmessung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei erfolgreiche Absorptionsmessungen durchgeführt. In diesem Abschnitt wird die Messung vom 11.12.2000 (siehe Anhang Abbildung E.3) diskutiert.

Abbildung 8.1 zeigt zwei mit unterschiedlichen Quellen kalibrierte Absorptionsspektren. Das mit 300 K-Quelle kalibrierte Spektrum ist naturgemäß mit einem hohen Rauschsignal belastet. Für das mit 700 K-Quelle kalibrierte Spektrum musste man zuerst die Temperatur der Kalibrierquelle berechnen (941,5 K). Die gute Übereinstimmung der Basislinien von beiden Spektren belegt die korrekte Funktionsweise der Kalibrierung mit der 700 K-Quelle.

Das Verhältnis des Kontrasts der OH-Linien zum Rauschpegel ist wie erwartet sehr hoch (gutes Signal-Rausch-Verhältnis). Bei genauerer Analyse der Messdaten zeigte sich aber, dass die Daten durch mindestens drei sinusförmige Signale gestört sind. Um diese Signale zu berechnen, wurde die Wasserlinie ähnlich dem Vorgang bei Emissionsmessungen durch vier Gaußfunktionen folgender Form gefittet:

¹Hier ist die Technologie auf der Basis von Schottkymischer gemeint. Eine wesentliche Verbesserung ist mit einem HEB-Mischer (Hot Elektron Bolometer) möglich [29, 12, 33].

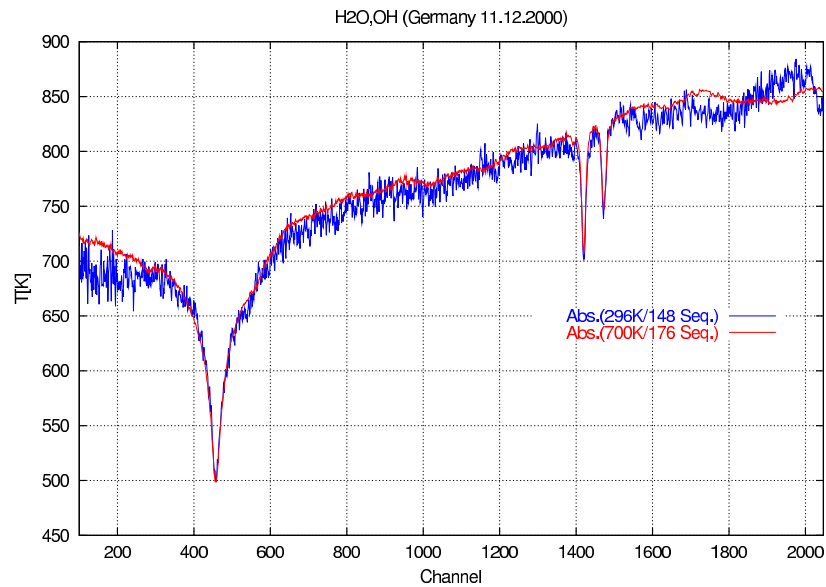


Abbildung 8.1: Rohes (mit 300K- und 700K-Quelle kalibriertes) Absorptionsspektrum vom 11.12.2000

i	A_i	B_i
1	-107,01	371,21
2	-71,00	6.416,94
3	-115,03	79.224,90
4	-967,08	63.335.600,00

Tabelle 8.1: Fitparameter

$$T_{H_2O}(x) = B + \sum_{i=1}^4 A_i \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{B_i}\right) \quad (8.1)$$

x	AOS-Pixel, Frequenzkanal
$B = 1373,69 K$	Kontinuum
$x_0 = 459,40$	Lage der Wasserlinie
A_i, B_i	Parameter der Gauß-Kurve (Tabelle 8.1)

Die störenden Signale haben die Form:

$$T_{st}(x) = \sum_{i=1}^4 \left\{ A_i \cos\left(\frac{2\pi(x - x_i)}{T_i}\right) \right\}^2 \quad (8.2)$$

x	AOS-Pixel, Frequenzkanal
x_i	Phasenverschiebung
T_i	Periode

i	x_i	T_i	A_i
1	530,85	2.100,36	6,17
2	645,56	306,35	2,34
3	-191,07	551,06	2,24

Tabelle 8.2: Fitparameter, störende Signale

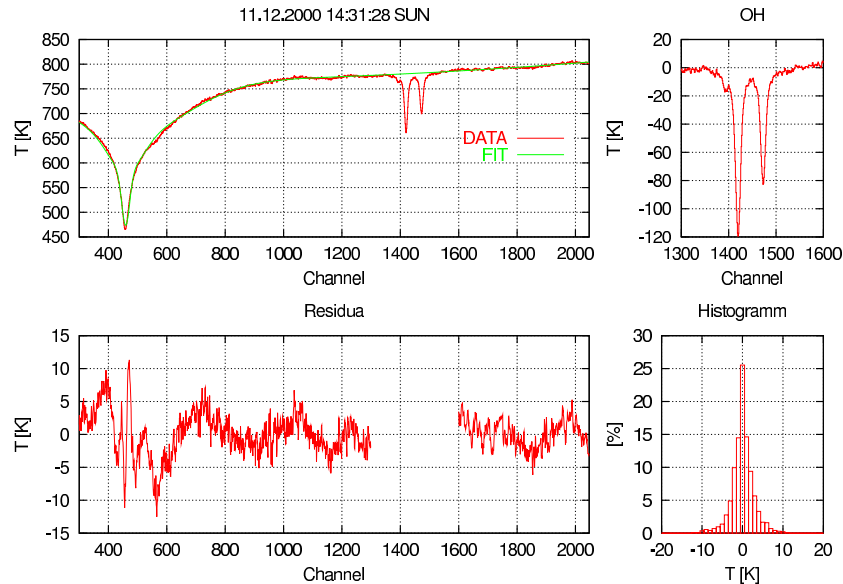


Abbildung 8.2: Absorptionsspektrum vom 11.12.2000

Die Wasserlinie und die störenden Signale müssen gleichzeitig gefittet werden². Die Parameter der Störsignale sind in Tabelle 8.2 aufgelistet.

Das von störenden Signalen bereinigte Spektrum ist in der Abbildung 8.2 dargestellt. Die gleichzeitig gemessenen Absorptions- und Emissionsspektren sind in der Abbildung 8.3 gegenübergestellt. In der Abbildung sind auch die aus dem Fit berechneten Wasserlinien gezeigt.

Den Vorteil der Absorptionsmethode im Vergleich zur Emissionsmethode dokumentiert die Abbildung 8.4. In der Abbildung sind reine OH-Linien nach dem Abzug von allen zusätzlichen Beiträgen (Kontinuum, Wasserlinie, Störsignale) dargestellt. Der Kontrast der stärksten OH-Linie ist in Absorption (120 K) um Faktor ca. 8 größer als in der Emission (15 K). Auch das Signal-Rausch-Verhältnis ist um den gleichen Faktor höher. Die für die Inversionsrechnung wichtige Linienform ist besonders bei Flanken zu sehen. Daher erwartet man eine bessere Höhengauflösung mit einem wesentlich kleineren Fehlerbalken.

In der Abbildung 8.5 sind die von der Absorptions- bzw. Emissionsmessung gewonnenen Daten dargestellt. Das Emissionsspektrum wurde mit Faktor -8 multipliziert, um die beiden Spektren vergleichen zu können. Aus der Differenz von beiden Spektren könnte man Rückschlüsse auf das OH in der Sonnenatmosphäre ziehen [20].

²Der Bereich der OH-Linien wurde nicht berücksichtigt.

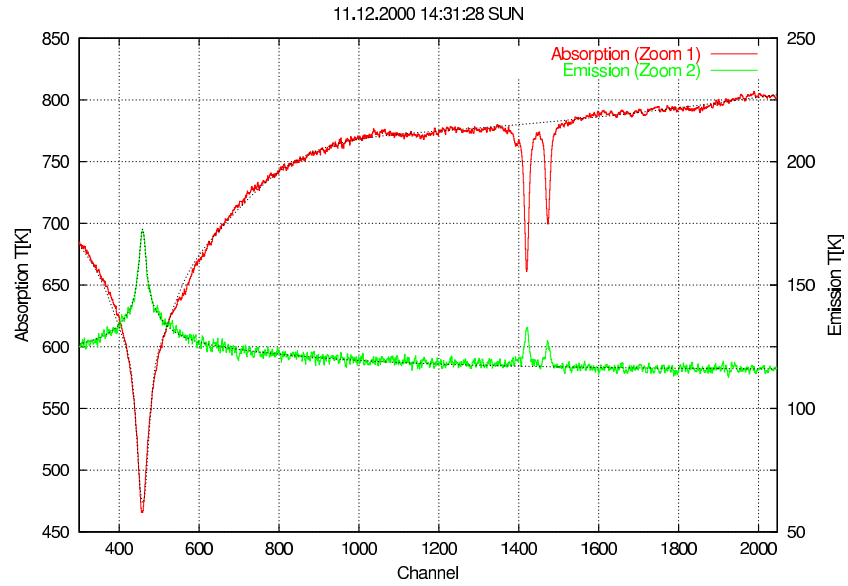


Abbildung 8.3: Absorptionsspektrum und Emissionsspektrum mit Fit (11.12.2000)

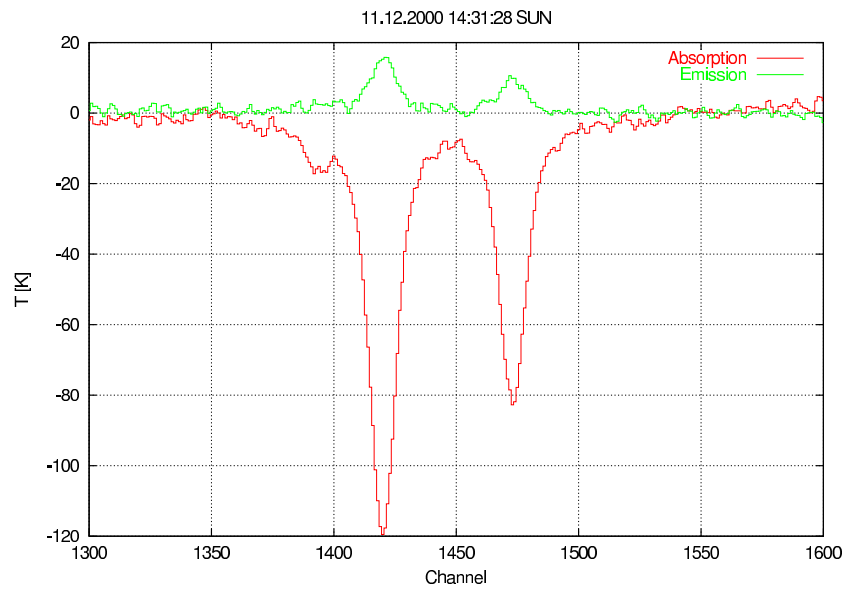


Abbildung 8.4: Berechnete OH-Linien in Absorption und Emission

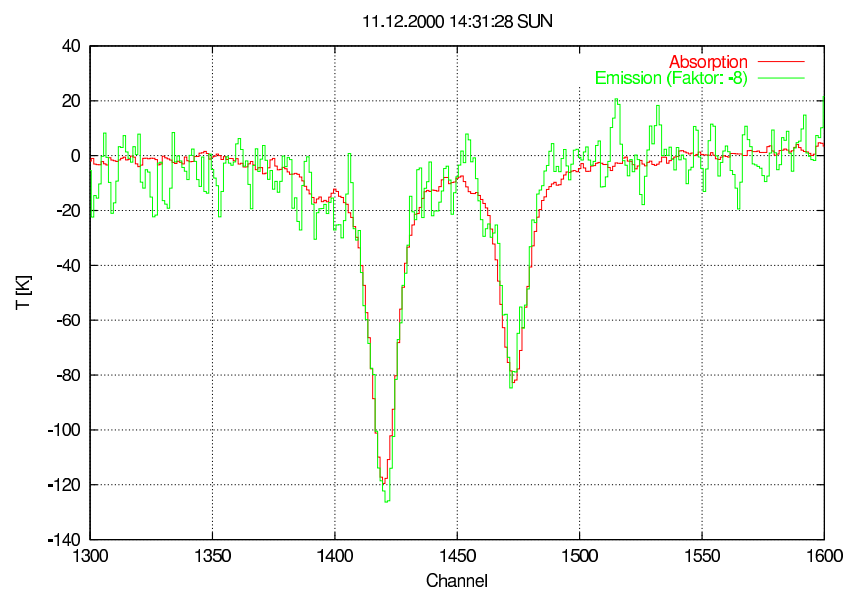


Abbildung 8.5: Vergleich der OH-Linien in Absorption und Emission (multipliziert mit Faktor -8)

Kapitel 9

Fazit und Ausblick

Gegenstand dieser Arbeit war die Erweiterung und Optimierung des Heterodynspektrometers THOMAS des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), das für die Messung von Hydroxyl (OH) in der mittleren Stratosphäre und Mesosphäre eingesetzt wird, für weitere atmosphärische Messungen in Emission und in Absorption gegen die Sonne.

Alle Optimierungsmaßnahmen wurden sowohl im Labor als auch bei Messkampagnen im Herbst 1999 und 2000 getestet. Im Rahmen der Optimierung wurden folgende Verbesserungen durchgeführt:

- Das speziell für den FIR-Bereich entwickelte Flugzeugfenster wurde neu beschichtet. Diese neue Antireflexionsbeschichtung aus schwarzer Polyethylenfolie beseitigte die Transmissionsabhängigkeit des Fensters von Sonnenstrahlung (siehe [8]).
- Der CO_2 -Laser wurde mechanisch stabilisiert, und es wurde eine verbesserte Justagevorrichtung für den Diplexer entwickelt.
- Der RF-Signalweg wurde optimiert und verkürzt.
- Durch eine neue Laseroptik wurde eine bessere Beleuchtung der Braggzelle erzielt (AOS), was die Frequenzauflösung des Spektrometers verbesserte.
- Die Elektronik des CCD im AOS wurde neu entwickelt und der Auslesealgorithmus wurde optimiert.
- Um die thermische Stabilität des AOS zu erhöhen, wurde der Leistungsverstärker räumlich von der AOS-Elektronik getrennt und die Leistungsstabilisierung der Laserdiode wurde erneuert.

Die Optimierungen brachten eine Verbesserung der Stabilität des Systems, was eine Erweiterung der Emissionsmethode um „Winkelsondierung“ ermöglichte. Das gleichzeitige Messen der OH -Strahlung aus der Atmosphäre unter verschiedenen vertikalen Winkeln wurde so möglich.

Die wesentliche Innovation liegt jedoch in der Entwicklung einer neuen Anwendung des Instrumentes. Dabei wird die Absorption von Sonnenstrahlung durch OH gemessen. Für den Umbau des Heterodynempfängers waren folgende Arbeiten notwendig:

- Es wurde ein neuer Ablenkspiegel eingebaut, der die Nachführung des Empfangsstrahls in horizontaler Ebene ermöglicht.
- Um die Nachführung nach der Sonnenlage in Realzeit zu realisieren, wurden neue Motoreinheiten mit entsprechenden Steuereinheiten benutzt.

- Die Erfassung der Position der Sonne wurde mit einer Videokamera durchgeführt. Das Videosignal der CCD-Kamera wurde mit einer Digitalisierungskarte bearbeitet. Die dazu notwendige Software wurde unter dem Betriebssystem Linux entwickelt.
- Um die Absorptionsdaten optimal zu kalibrieren, wurde eine neue heiße Quelle (800 K) eingebaut.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Verbesserungen bzgl. der Emissionsmessung an die Grenze der Fähigkeiten der Schottkydioden bei Raumtemperatur stoßen. Weitere Verbesserungen sind nur durch Verwendung neuer Technologien (z. B. HEB-Mischer) möglich. Ein anderer Weg, bessere Messdaten mit bestehender Technik zu erhalten, ist die Anwendung der Absorptionstechnik. Diese zeigt im Vergleich zur Emission ein wesentlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Der Kontrast von gleichzeitig in Emission und Absorption gemessenen *OH*-Linien ist bei der Absorptionsgegenüber der Emissionsmessung um den Faktor 8 größer. Dies ermöglicht eine Verkürzung der Messzeit, was wiederum eine eindeutige Zuordnung der Messdaten zur geographischen Lage des Flugzeug zur Folge hat.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Absorptionsmessungen sind als erste Versuche auf diesem Gebiet zu betrachten. Obwohl sie eine wesentliche Verbesserung der Qualität der Messdaten im Vergleich zur Emissionsmessung darstellen, bleibt eine Reihe offener Punkte. Diese wurden bei den Messungen oder erst bei der Datenverarbeitung entdeckt:

- Um die Nachführung bezüglich der Position der Sonne zu verbessern, sollte man Nichtlinearitäten der Abbildung der CCD-Kamera untersuchen und im Programm berücksichtigen.
- Die Oberfläche der neu entwickelten Kalibrierquelle müsste aus einem Material, das ähnliche Eigenschaften als Ecosorb (im FIR-Bereich schwarzer Strahler) aufweist, gebaut werden. Dies würde das Entstehen von stehenden Wellen vermeiden.
- Die Ursachen von störenden harmonischen Signalen müssen untersucht werden. Diese sollten, falls möglich, beseitigt werden. Falls das nicht möglich ist, sollte wenigstens eine physikalische Erklärung gefunden werden, damit man das bei der Inversionsrechnung berücksichtigen werden kann.

Wie schon früher erwähnt, kann man aus gleichzeitigem Messen in Emission und Absorption den *OH*-Beitrag der Sonnenatmosphäre berechnen. Um bessere Daten zu bekommen, sollte man folgende Prinzipien berücksichtigen:

- Die Messung sollte um die örtliche Mittagszeit durchgeführt werden, denn dann verändert sich die Sonnenhöhe am wenigsten.
- Die Jahreszeit und die geographische Lage sollte so gewählt werden, dass sich die Sonnenhöhe um diese Zeit im Bereich zwischen 15° und 25° befindet.
- Um die gleichwertigen Daten bei der Emission und Absorption zu bekommen, sollte man mehr Emissionszyklen messen.

Eine andere Möglichkeit den *OH*-Beitrag zu bestimmen, würde nur die Absorptionsmethode benutzen. Da sich das *OH*-Radikal nur am Tag in der Erdatmosphäre befindet, könnte eine Messung gleich bei Sonnenaufgang durchführen. Die zeitlich nacheinander gewonnenen Spektren müssten dann den Anstieg vom *OH* in der Erdatmosphäre zeigen. Durch eine Extrapolation des Anstiegs des *OH* in der Erdatmosphäre rückwärts in der Zeit vor dem Sonnenaufgang könnte man den Beitrag aus der Sonnenatmosphäre berechnen.

Abbildungsverzeichnis

1	FALCON (D-CMET) - das Forschungsflugzeug des DLR	2
2.1	A) Höhenverteilung der Volumenmischungsverhältnisse einiger atmosphärischer Gase (midlatitude winter) [2]; B) Temperaturprofil in der Atmosphäre (midlatitude winter) [2]	14
2.2	Energieniveau-Diagramm der niedrigsten Rotationszuständen bei <i>OH</i> (die angekreisten Übergänge werden mit THOMAS beobachtet)	16
2.3	a) Die Linienstärken der <i>OH</i> -Übergänge im FIR (links), nichtresonanter Kontinuumsbeitrag (rechts); b) Aufspaltung der <i>OH</i> -Übergänge in zwei Triplets	17
3.1	Sondierungsarten in der Atmosphäre	20
4.1	Aufbau des Heterodynspektrometers THOMAS	26
4.2	Die zweifache Frequenztransformation im Heterodynspektrometer THOMAS	27
4.3	Braggzelle	29
4.4	Der Korrekturfaktor C_{pr} als Funktion der Temperatur für die Frequenz $f_{Triplet} = 2514,3\text{ GHz}$	31
4.5	Der Korrekturfaktor C_{pr} als Funktion der Frequenz für verschiedene Temperaturen	32
4.6	Symbolische Darstellung der Fehlerfortpflanzung bei Interpolation und Extrapolation	33
5.1	Das Flugzeugfenster des DLR-Forschungsflugzeugs FALCON	36
5.2	Die Transmission des Fensters in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel (Bodenmessung)	36
5.3	Antennenprofil T23#4 (1,30 m vom Pointingspiegel, -3 dB) [13, 19]	39
5.4	Simuliertes Absorptionsspektrum (<i>H₂O</i> und <i>OH</i>) gegen die Sonne bei einer Temperatur von 4200 K (FIR)	39
5.5	Abhängigkeit der Temperatur der „VERY HOT“ Kalibrierquelle von der zugeführten elektrischen Leistung	41
5.6	<i>CO₂</i> -Laserleistung, Vergleich der Stabilität	42
5.7	FIR-Laserleistung, Vergleich der Stabilität	42
5.8	Linienprofilfunktion (ILS)	43
5.9	Kennlinien von vier Dioden - Die Dioden 1T23#3 und 1T23#4 haben die besten Eigenschaften bezüglich T_{sys} und Rauschen.	44

5.10	Dioden-Test auf dem Heterodynsystem - Im oberen Teil ist die am Eingang des AOS gemessene Signalleistung beim zyklischen Umschalten von der Kalibrierquelle „HOT“ auf die Kalibrierquelle „COLD“ dargestellt. Im unteren Teil sind die entsprechenden Systemrauschtemperaturen abgebildet.	45
5.11	Drei gleichzeitig aufgenommene Spektren	46
5.12	Schematische Darstellung der technischen Realisierung	48
5.13	Pitchbewegung des Flugzeugs	50
5.14	Rollbewegung des Flugzeugs	51
5.15	Abschätzung der Winkelgenauigkeit	52
5.16	LINUX-Programm, Blockdiagramm	53
5.17	Mittelwerte vom AOS während des Messflugs am 14.12.2000	54
5.18	Die Parameter der Übertragungsfunktion des Heterodynsystems während des Messflugs am 14.12.2000	54
5.19	Systemrauschtemperatur (Messung am 11.12.2000)	56
5.20	RMS der kalibrierten Spektren (unten); FIR-Laserleistung (oben) - Die Störungen korrelieren eindeutig (Messung am 19.11.1999).	57
5.21	DOS-Programm, Blockdiagramm	58
5.22	Die berechnete und die wirkliche Flugbahn am 11.12.2000	60
6.1	Grauer Strahler	66
6.2	Einstrahlspektrum - HOT und COLD	67
6.3	Einstrahlspektrum und Differenz-Spektrum	68
6.4	a) Kontrastdifferenz der beiden Methanollinien in Abhängigkeit vom m b) Transmission der Methanollinien in Abhängigkeit vom m	70
6.5	Methanol in Absorption und Emission	70
6.6	Methanol in Emission mit Fit	71
6.7	Kontrast der Methanollinien in Abhängigkeit von der Frequenz (2. LO)	72
6.8	Kontrast-Differenz von Methanollinien bei verstelltem Diplexer (Simulationsrechnung)	73
6.9	Kontrast-Differenz der Methanollinien bei verstimtem Diplexer (Messung) in Abhängigkeit von relativen Längeneinheiten am Diplexer	74
6.10	Transmission des Diplexer für OH	74
7.1	Spektrum vom 17.11.1999	78
7.2	Gleichzeitig aufgenommene Spektren vom 12.12.2000	79
8.1	Rohes (mit 300K- und 700K-Quelle kalibriertes) Absorptionsspektrum vom 11.12.2000	82
8.2	Absorptionsspektrum vom 11.12.2000	83
8.3	Absorptionsspektrum und Emissionsspektrum mit Fit (11.12.2000)	84
8.4	Berechnete OH-Linien in Absorption und Emission	84
8.5	Vergleich der OH-Linien in Absorption und Emission (multipliziert mit Faktor -8)	85

A.1	Frequenzauflösung vom AOS in verschiedenen Bereichen	100
A.2	Empfindlichkeit vom AOS	100
A.3	Abweichung von der Linearität der Frequenz-Pixel-Zuordnung	101
B.1	Abhängigkeit der Transmission des Diplexers (Mitte der Seitenbänder) von m . . .	104
B.2	Transmission des Diplexers (Mitte der Seitenbänder) für die optimale bzw. ver- stimmte Einstellung des Diplexers	105
C.1	Leistungstabilisierung der Laserdiode im AOS	108
C.2	AOS - Ausleseelektronik	109
D.1	Flugroute 17.11.1999	112
D.2	Flugroute 19.11.1999	112
D.3	Flugroute 20.11.1999	113
E.1	Flugroute 11.12.2000	116
E.2	Flugroute 12.12.2000	116
E.3	Flugroute 14.12.2000	117

Tabellenverzeichnis

2.1	Bezeichnung der katalytischen Zyklen und Höhenbereiche, in denen ihr Beitrag maximal ist	15
5.1	Vergleich der Höhe der Basislinie mit voll beleuchtetem Fenster und mit dem Fenster im Flugzeugschatten	37
5.2	Eigenschaften der TV-Karte nach Angaben des Herstellers	49
5.3	Integrationszeiten	55
6.1	Test der radiometrischen Genauigkeit	72
7.1	Fitparameter der Wasserlinie	78
7.2	Winkelsondierung vom 12.12.2000	79
8.1	Fitparameter	82
8.2	Fitparameter, störende Signale	83
D.1	Messungen 1999 (CCD-Beleuchtungszeit 26 ms, „HOT“ 29 Seq., „COLD“ 99 Seq., „SIGNAL“ 134 Seq.)	113
E.1	Messungen 2000 (CCD-Beleuchtungszeit 15 ms)	117

Literaturverzeichnis

- [1] Anderson J.G.:
Rocket measurement of OH in the Mesosphere.
Journal of Geophysical Research, 76, 7.820, 1971.
- [2] Anderson G., S. Clough, F. Kneizys, J. Chetwynd & E. Shettle:
AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km).
Technical Report TR-86-0110, AFGL, 1986.
- [3] Bühler S., V. Eyring & H. Küllmann:
The impact of continuum emissions in the mm and sub-mm spectral range.
Final report, ESTEC/Contract No. 10998/94/NL/CN, 1996.
- [4] Clough S.A., F.Z. Kneizys, E.P. Shettle and G.P. Anderson:
Atmospheric radiance and transmittance: FASCOD2.
Proc. 6th Conf. Atmospheric Radiation, Williamsburg, 1986.
- [5] Englert C.R.:
Observation of OH in the middle atmosphere with an improved and characterized 2.5 THz heterodyne spektrometer.
Ph.D. thesis, University of Bremen
Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [6] Englert C.R., B. Schimpf, M. Birk, F.G. Schreier, M. Krocka, R. Titz, R.G. Nitsche & M.E. Summers:
Measurement of OH in the Middle Atmosphere with an airborne 2.5 THz Heterodyne Spectrometer: Comparison with Photochemical Models
Journal of Geophysical Research, Vol. 105, No. D17, pp 22,21-22,223, September 2000.
- [7] Englert C.R., H. Maurer & M. Birk:
Antireflection Coated, Wedged, Single-Crystal Silicon Aircraft Window for the Far-Infrared.
IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 38, 1997-2003, 1999.
- [8] Englert C., H. Maurer & M. Birk:
Photon Induced Far-Infrared Absorption in Pure Single Crystal Silicon.
Infrared Physics & Technology, 40(6)/447-451, 1999.
- [9] Harmonic Drive, Produktkatalog:
Hohlwellenantriebe der Baureihe FHA
Mini-Servoantriebe der Baureihe RS
Digitale AC-Servoregler HA-400
04/99 900062
- [10] Harmonic Drive, Bedienerhandbuch:
AC Servoregler SC-500/510 ,
Nr. AC 14-d 12/99

- [11] Harmonic Drive, Operations Manual
DBSC-Setup-Software for SC-500/510 and HA-400 Series Controllers
SW 6-e, Rev. 05/2000
- [12] Hübers H.-W., J. Schubert, A. Krabbe, M. Birk, G. Wagner, A. Semenov, G. Gol'tsman, B. Voronov, E. Gershenson
Parylene ant-reflection coating of a quasi-optical hot-electron-bolometric mixer at terahertz frequencies.
Infrared Physics & Technology, Vol. 42, pp 41-47, 2001
- [13] Humbel O.P.M.:
Charakterisierung und Verbesserung des optischen Strahlengangs eines FIR-Heterodynsystems.
Diplomarbeit, Technische Universität München, 1997
- [14] Korpel A.:
A Review of Fundamentals.
Proceedings of the IEEE
Special Section on Acousto-Optic Signal Processing, Vol.69, Nr.1, 1981
- [15] Krocka M.;
Charakterisierung und Optimierung eines akustooptischen Spektrometers zur Messung von OH-Emissions-Linien bei 2,5 THz.
Diplomarbeit, Technische Universität München, 1997
- [16] Krocka M.;
25 Jahre FALCON.
Poster, DLR-Oberpfaffenhofen, 2001
- [17] Maurellis A., Hoogeveen R., Birk M., Mair U., Selig A., Schrijver H.:
RETRIEVAL AND INSTRUMENTATION STRATEGIES FOR AIRBORNE SUB-MM/FAR-IR HETERODYNE RECEIVERS IN THE CONTEXT OF THE TELIS MISSION.
Third International Symposium on Submillimeter Wave Earth Observation from Space, ISSN-WEOS01, October 8-9, 2001, Hanse Institute for Advanced Study, Delmenhorst
- [18] Müller R.:
Rauschen
Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [19] Nitsche Roland
Ein quasioptischer 2.5 THz Heterodynempfänger für die flugzeuggestützte Spektroskopie der Atmosphäre.
Dissertation, TU-München, 1997.
- [20] Notholt J.:
The moon as a light source for FTIR measurement of stratospheric trace gases during the polar night: Application for HNO_3 in the arctic.
Journal of Geophysical Research, 99(D2), 3607-3614
- [21] Röser H.P.:
Heterodyne spectroscopy in the far infrared.
Europhys. News., 21,195, 1991.
- [22] Röser H.P.:
Heterodyne spectroscopy for submillimeter and far infrared wavelength from 100 μm to 500 μm .
Invited Review for IR Physics, Vol. 32, pp 385-407, 1991
- [23] Röser H.P., M. von Schönemark:
Comparison of Remote Sensing Experiments from Airborne and Space Platforms.
Acta Astronautica, Vol. 39, No. 9-12, pp 951-960, 1996

- [24] Röser H.P., R. Wattenbach, E.J. Durwen, G.V. Schultz:
Anwendung eines Heterodyn-Spektrometers für das Submillimeter-Wellenlängengebiet.
Laser und Optoelektronik, Nr.2/1982.
- [25] Salawitch R.J., S.C. Wofsky, P.O. Wennberg, R.C. Cohen, J.G. Anderson, D.W. Fahey, R.S. Gao, E.R. Keim, E.L. Woodbridge, R.M. Stimpfle, J.P. Koplów, D.W. Kohn, R.C. Webster, R.D. May, L. Pfister, E.W. Gottlieb, H.A. Michelsen, G.K. Yue, J.C. Wilson, C.A. Brock, H.H. Jonsson, J.E.Dye, D. Baumgardner, M.H. Proffitt, M. Loewenstein, J.R. Podolske, J.W. Elkins, G.S. Dutton, E.J. Hintsa, A.E. Dessler, E.M. Weinstock, K.K. Kelly, K.A. Boering, B.C. Daube, K.R. Chan & S.W. Bowen:
The Distribution of Hydrogen, Nitrogen and Chlorine Radicals in the Lower Stratosphere: Implications for Changes in O_3 Due to Emission of NO_y from Supersonic Aircraft.
Geophysical Research Letters, 21, 2.547-2.550, 1994.
- [26] Schiek B., Siweris H.:
Rauschen in Hochfrequenzschaltungen
ELTEX, Hüthig Buch Verlag GmbH, 1990.
- [27] Schimpf B.A.:
Analyse von Fern-Infrarot-Spektren zur Bestimmung der OH-Konzentration der mittleren Erdatmosphäre.
Dissertation, Universität Bremen, 1999.
- [28] Schwaab G.W.
Hochauflösende Molekülspektroskopie im Submillimeterbereich zur Erprobung eines breitbandig optimierten akustooptischen Spektrometers
Diplomarbeit, Bonn, 1987.
- [29] Semenov A.D., Hübers H.-W., Schubert J., Gol'tsman G.N., Elantiev I., Voronov B.M., Gershenson E.M.
Design and performance of lattice-cooled hot-electron terahertz mixer.
Journal of Applied Physics, V. 88, Nr. 11, December 2000
- [30] Stimpfle R.M., P.O. Wennberg, L.B. Lapson & J.G. Anderson:
Simultaneous, In situ Measurements of OH and H_2O in the Stratosphere.
Geophysical Research Letters, 17, 1.905-1.908, 1990.
- [31] Titz R.U., M. Birk, D. Hausmann, R. Nitsche, F. Schreier, J. Urban, H. Küllmann & H.P. Röser:
Observation of stratospheric OH at 2.5 THz with airborne heterodyne system.
Infrared Physics & Technology, 36/883-891, 1995.
- [32] Wattenbach R., H.P. Röser
Acousto optical spectrometer.
Laser & Optoelektronik, Vol. 17, No. 2, pp 111-120, 1985
- [33] Yagoubov P., Hübers H.-W., Gol'tsman G., Gao J., Hoogeveen R., Birk M., Selig A., de Korte P.
HOT-ELECTRON BOLOMETER MIXERS-TECHNOLOGY FOR FAR-INFRARED HETERODYNE INSTRUMENT IN FUTURE ATMOSPHERIC CHEMISTRY MISSION.
Third International Symposium on Submillimeter Wave Earth Observation from Space, ISSN-WEOS01, October 8-9, 2001, Hanse Institute for Advanced Study, Delmenhorst
- [34] Zhukovsky
M-55 Geophysica SPECIFICATION
Myasishchev Design Bureau, 140160 Zhukovsky Moscow Region

Anhang A

AOS

In Abbildung A.1 sind fünf Linienprofilfunktionen für verschiedene Frequenzkanäle (*Pixel*) des AOS dargestellt. Die Analyse wurde ähnlich wie in [5] durchgeführt. Diesmal wurden die Linien nur durch eine Gaußkurve gefittet

$$G(f) = \exp\left(-\ln(2)\frac{f^2}{\sigma^2}\right)$$

f Frequenz
 σ Halbwertsbreite

Die Funktionen wurden auf das Maximum normiert. Aus den Bildern ist zu sehen, dass die ILS in der Mitte vom AOS gaußförmig ist. Am Rande ist sie nicht mehr symmetrisch. Die Empfindlichkeit (Abbildung A.2) ist nicht optimal und an den Rändern eher schlecht. Weiter zeigt sich, dass die Messung durch stehende Wellen beeinträchtigt ist. Dies kommt auch bei Atmosphärenmessungen vor, allerdings sind die stehenden Wellen nur von thermischen Bedingungen abhängig. Solange Änderungen durch thermische Einflüsse langsamer als ein Messzyklus sind, werden die Ergebnisse dadurch nicht beeinflusst.

Die Abbildung A.3 stellt die Abweichung der Frequenz-Pixel (Frequenzkanal) Zuordnung von der Linearität [15] dar:

$$F[GHz] = k * Pixel + q$$

$$k = -693,539 \cdot 10^{-6} GHz$$

$$q = 2,8005 GHz$$

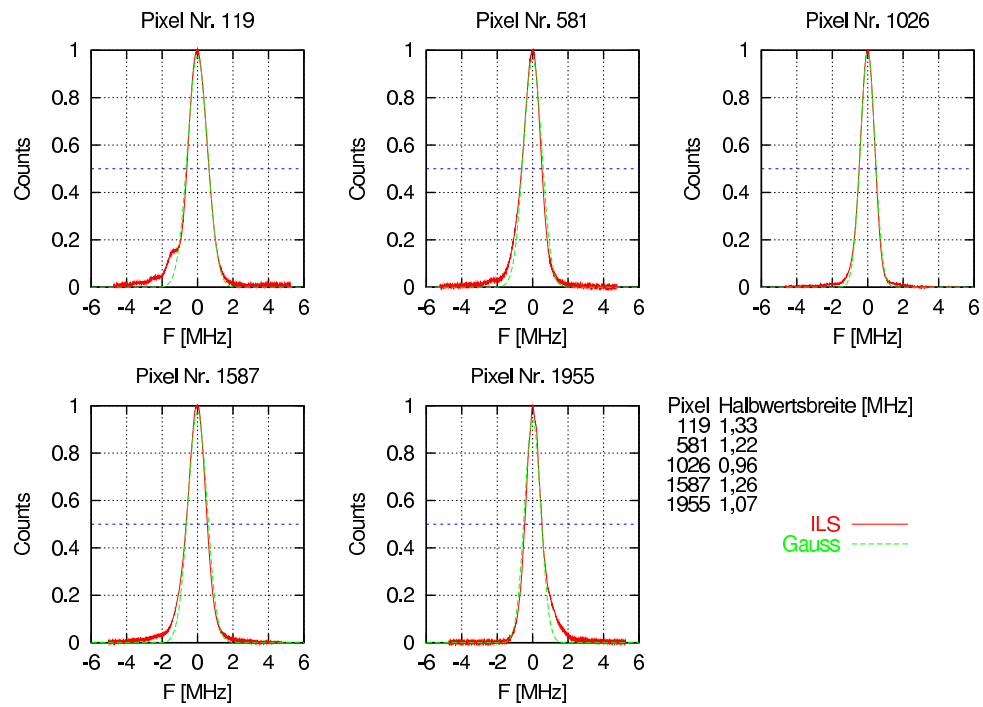


Abbildung A.1: Frequenzauflösung vom AOS in verschiedenen Bereichen

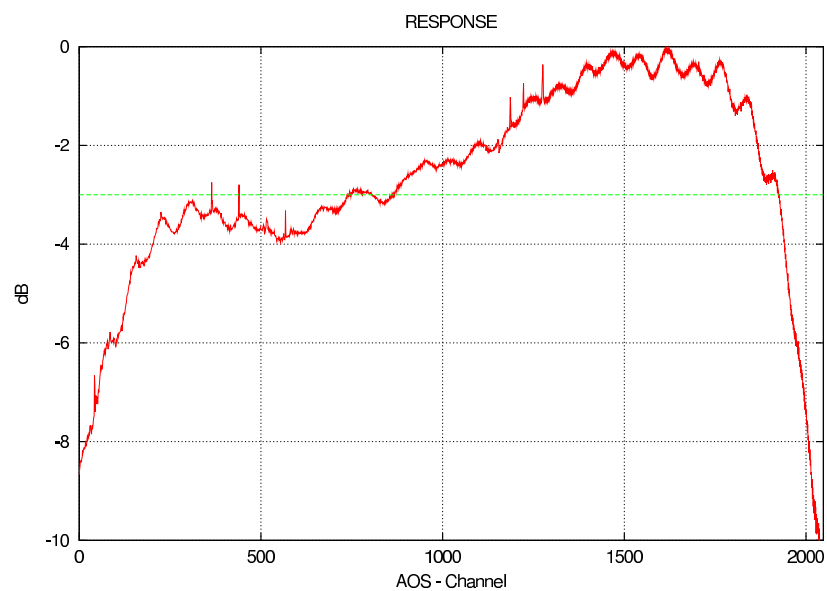


Abbildung A.2: Empfindlichkeit vom AOS

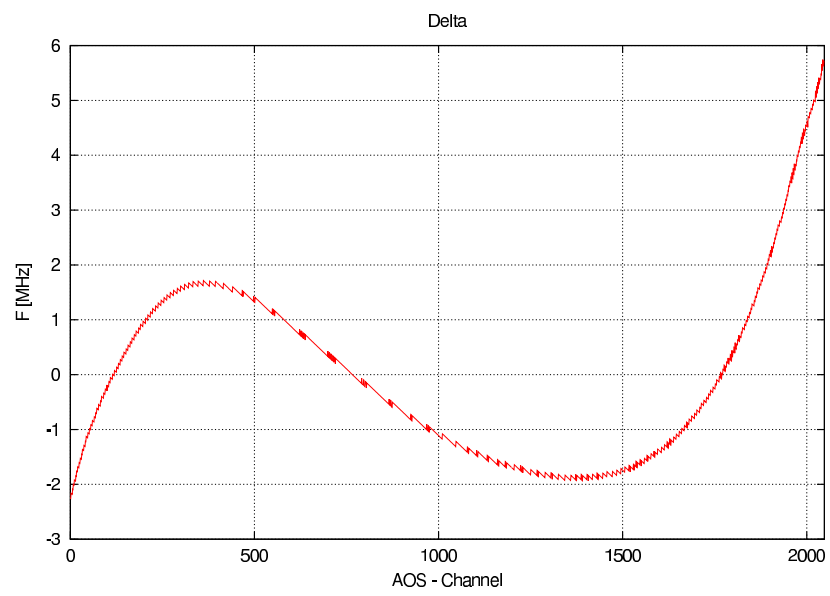


Abbildung A.3: Abweichung von der Linearität der Frequenz-Pixel-Zuordnung

Anhang B

Diplexer

Der Diplexer ist ein spezielles Martin-Puplett-Interferometer [5]. Es wird dazu verwendet, zwei zueinander senkrecht polarisierte Strahlen (Atmosphärensignal und das Signal des ersten Lokaloszillators) räumlich kohärent zu überlagern. Die Transmission des Diplexers für die parallel (T_{\parallel}) und orthogonal (T_{\perp}) polarisierte Strahlung ist nach [5] durch folgende Gleichungen gegeben:

$$T_{\parallel} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\Delta}{\lambda} \right) \right] \quad (\text{B.1})$$

$$T_{\perp} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi\Delta}{\lambda} \right) \right] \quad (\text{B.2})$$

Δ optische Wegdifferenz für beide Interferometerarme
 λ Wellenlänge

Am Eingang des Diplexers befindet sich ein Gitter-Polarisator, der die Laserstrahlung (1. Lokaloszillator) mit paralleler und die Atmosphärenstrahlung mit orthogonaler Polarisation transmittiert. Für die maximale Übertragung des Lasersignals gilt:

$$\cos \left(\frac{2\pi\Delta_{\parallel} f_{LO1}}{c} \right) = 1 \Leftrightarrow \Delta_{\parallel} = m \cdot \frac{c}{f_{LO1}} \quad (\text{B.3})$$

$c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ Lichtgeschwindigkeit
 $f_{LO1} = 2522,7816 \text{ GHz}$ Frequenz des 1. Lokaloszillators
 $m = 0, 1, 2, \dots$ ganze Zahl

Für die maximale Transmission des Signals aus dem oberen (+) und dem unteren (-) Seitenband gilt:

$$T_{\perp} = 1 \Leftrightarrow \cos \left(\frac{2\pi\Delta_{\perp} \cdot (f_{LO1} \pm f_{IF1})}{c} \right) = 1 \Leftrightarrow \Delta_{\perp} = \frac{(2k+1)}{2} \frac{c}{(f_{LO1} \pm f_{IF1})} \quad (\text{B.4})$$

$f_{IF1} = 8,5 \text{ GHz}$ erste Zwischenfrequenz
 $f_{LO1} \pm f_{IF1}$ Mitte des oberen bzw. unteren Seitenbands
 $k = 0, 1, 2, \dots$ ganze Zahl

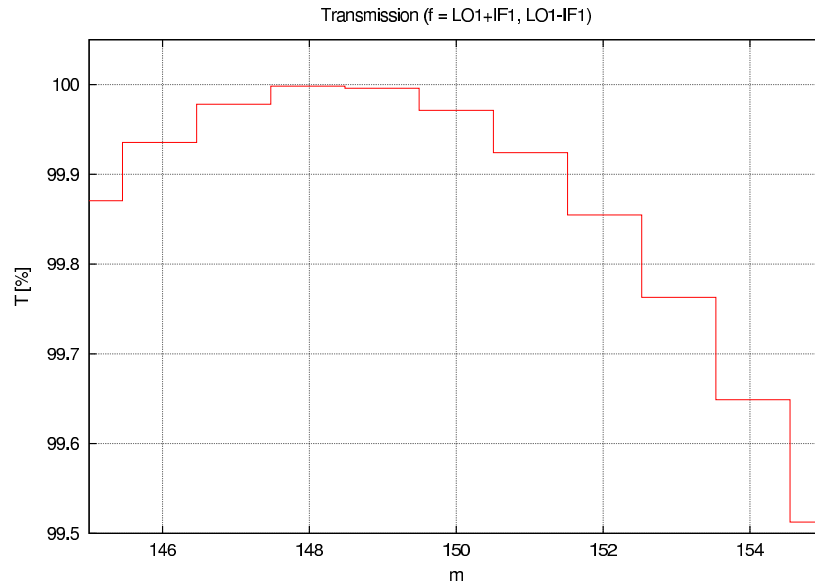


Abbildung B.1: Abhängigkeit der Transmission des Diplexers (Mitte der Seitenbänder) von m

Aus der Bedingung $\Delta_{\parallel} = \Delta_{\perp}$ kann man die Relation für k und m bestimmen:

$$m = \frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{f_{LO1}}{f_{LO1} \pm f_{IF1}} \quad (\text{B.5})$$

oder

$$k^{\pm} = \frac{1}{2} \left[m \frac{f_{LO1} \pm f_{IF1}}{f_{LO1}} - 1 \right] \quad (\text{B.6})$$

Um die optimale Einstellung des Diplexers bzgl. den Frequenzen $f_{LO1} \pm f_{IF1}$ (Mitte der beiden Seitenbänder) zu finden, wurde Δ_{\parallel} in die Gleichung B.2 eingesetzt. Die Abbildung B.1 zeigt den Verlauf der Transmission in Abhängigkeit vom m . Daraus ergibt sich das Optimum:

$$m = 148 \quad (\text{B.7})$$

Abbildung B.2 zeigt die Transmission des Diplexers in beiden Seitenbändern für die optimale bzw. verstimzte Einstellung des Diplexers.

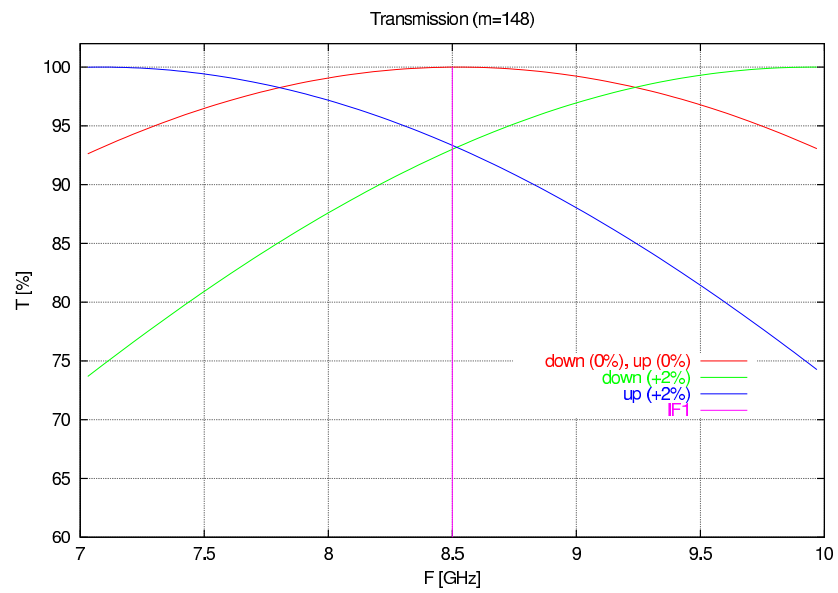


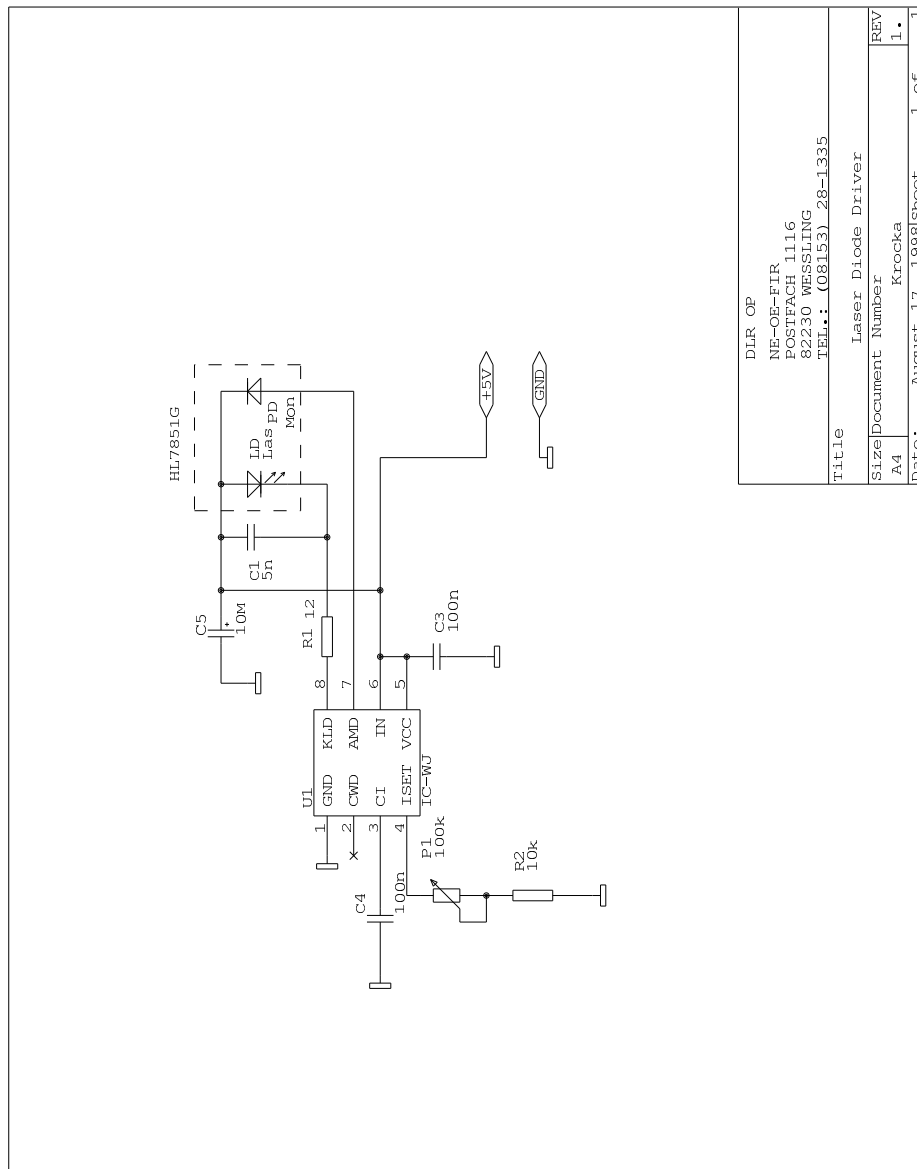
Abbildung B.2: Transmission des Diplexers (Mitte der Seitenbänder) für die optimale bzw. verstimte Einstellung des Diplexers

Anhang C

Schaltpläne

In Abbildung C.1 ist ein Schaltplan der elektronischen Stabilisierung der Laserdiode im AOS dargestellt. Die Laserdiode *HL7851G* besitzt zusätzlich eine integrierte Monitorodiode. Der Strom durch diese Diode ist direkt proportional der Leistung und wird in einer Rückkopplungsschleife über das *IC-W3* für die Regelung benutzt. Mit dem Potentiometer *P1* kann man die Leistung der Laserdiode einstellen.

Die elektronische Schaltung für das Auslesen von der CCD-Zeile ist in Abbildung C.2 zu sehen. Das Signal vom CCD wird mit dem Operationsverstärker *U2A* verstärkt und gleichzeitig wird ein Offset von etwa 8 V abgezogen. Die Verstärkung kann man mit dem Potentiometer *RP1* und den Offset mit dem Potentiometer *RP2* steuern. Der Wert vom „*black pixel*“ wird im Analogspeicher *U1* gespeichert und in *U2B* für die Korrektur benutzt. Die digitalen Steuersignale werden von der A/D-Karte generiert. Um die Signale aus der Karte nicht zu belasten, werden sie über den Treiber *U4* getrennt und verstärkt.



DLR OF NE-OE-FIR POSTFACH 1116 82230 WESSLING TEL.: (08153) 28-1335	
Title	Laser Diode Driver
Size	Document Number
A4	Krocka
Date:	August 17, 1998
Sheet	1 of 1
REV	1.

Abbildung C.1: Leistungstabilisierung der Laserdiode im AOS

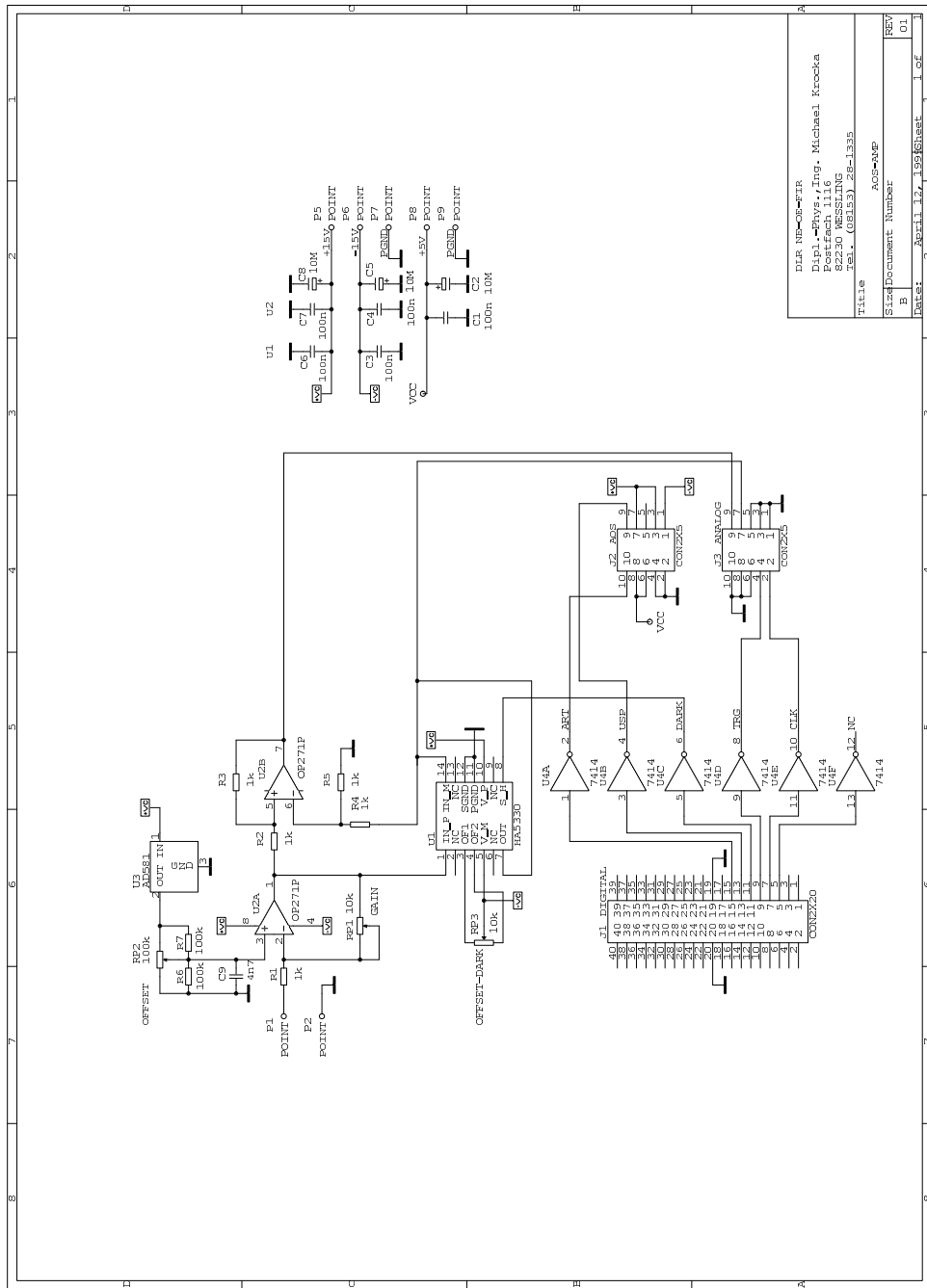


Abbildung C.2: AOS - Ausleselektronik

Anhang D

Flugmessungen 1999

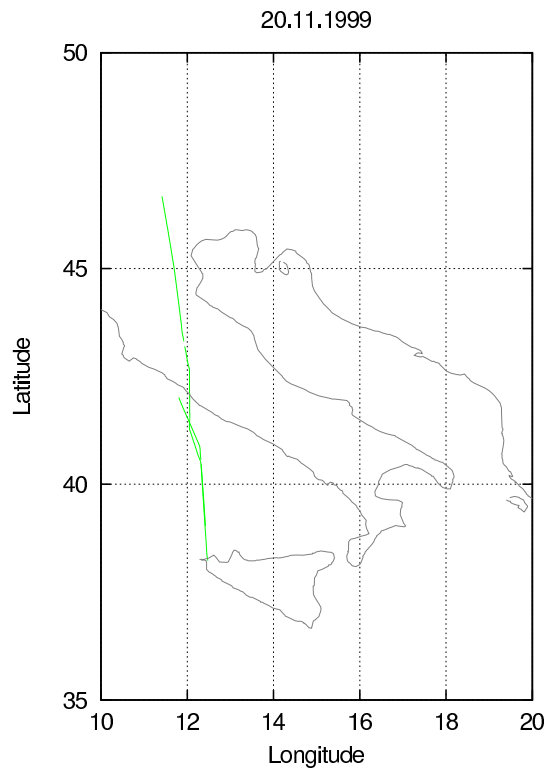


Abbildung D.1: Flugroute 17.11.1999

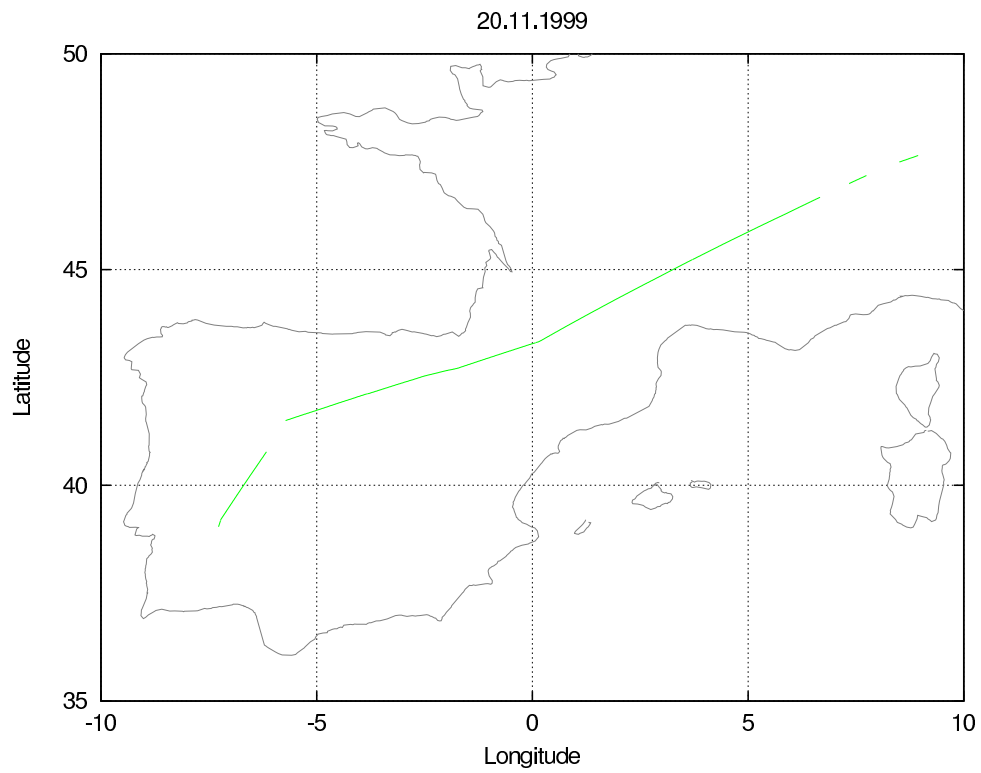


Abbildung D.2: Flugroute 19.11.1999

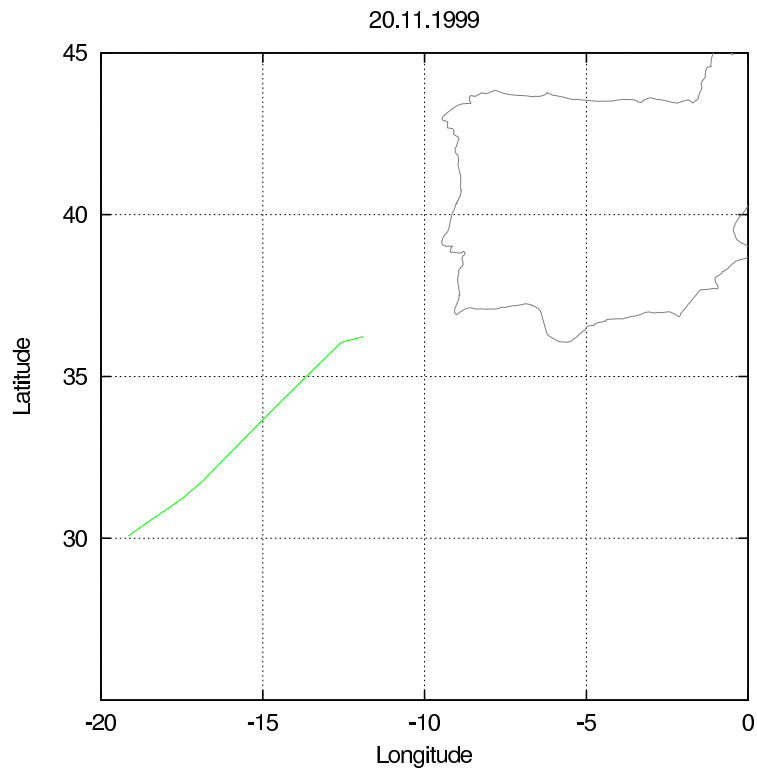


Abbildung D.3: Flugroute 20.11.1999

#	Start	Stop	Seq.	Flughöhe	Pointing	Basis	T_{sys}	Bemerkung
17.11.1999								
003	11 ⁰⁸	11 ²²	69	11250 m	10°	171 K	12000 K	Inv.
004	11 ²³	11 ³⁶	92	11250 m	20°	138 K		Inv.
006	11 ⁵¹	12 ³²	285	11850 m	10°	157 K		Inv.
007	12 ³³	13 ⁰⁰	170	11850 m	20°	124 K		Inv.
19.11.1999								
002	11 ⁵⁰	11 ⁵³	22	-	-	112 K	13000 K	Graukörper
004	11 ⁵⁹	13 ²⁸	3 x 200	11250 m	7° 16° 25°	190 K 150 K 130 K	12000 K	Seq.
005	13 ³⁴	13 ⁴⁹	3 x 36	11250 m	7° 16° 25°	197 K 153 K 140 K		Seq.
20.11.1999								
001	12 ²¹	13 ³²	3 x 130	11250 m	7° 16° 25°	180 K 130 K 125 K	12000 K	Seq.

Tabelle D.1: Messungen 1999 (CCD-Beleuchtungszeit 26 ms, „HOT“ 29 Seq., „COLD“ 99 Seq., „SIGNAL“ 134 Seq.)

Anhang E

Flugmessungen 2000

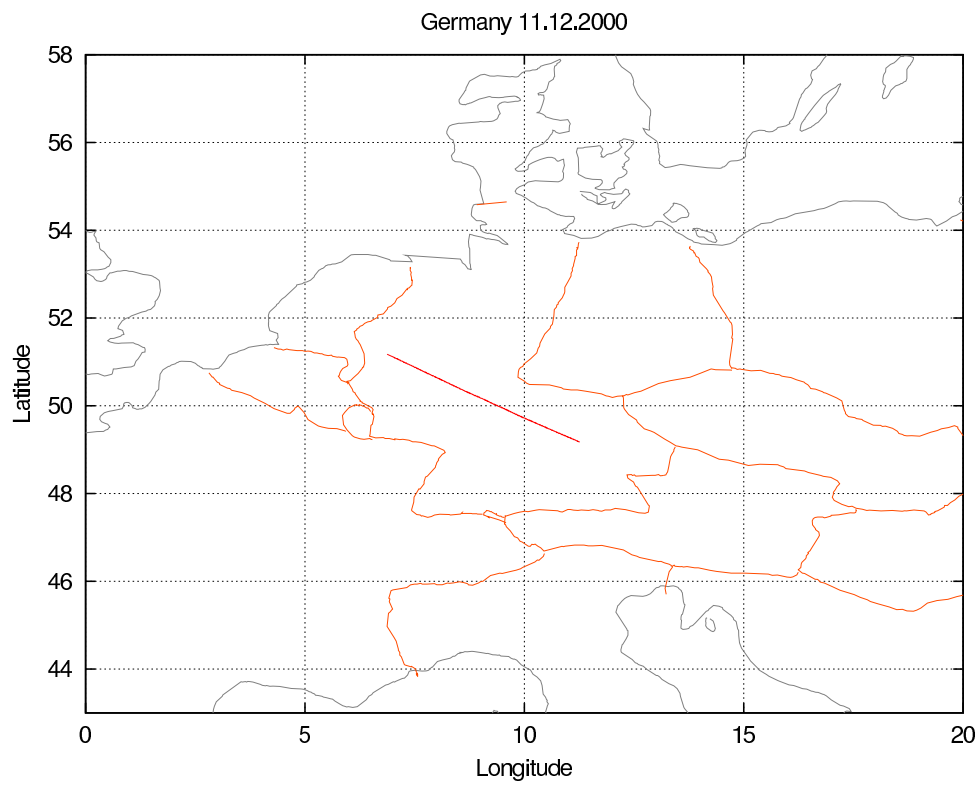


Abbildung E.1: Flugroute 11.12.2000

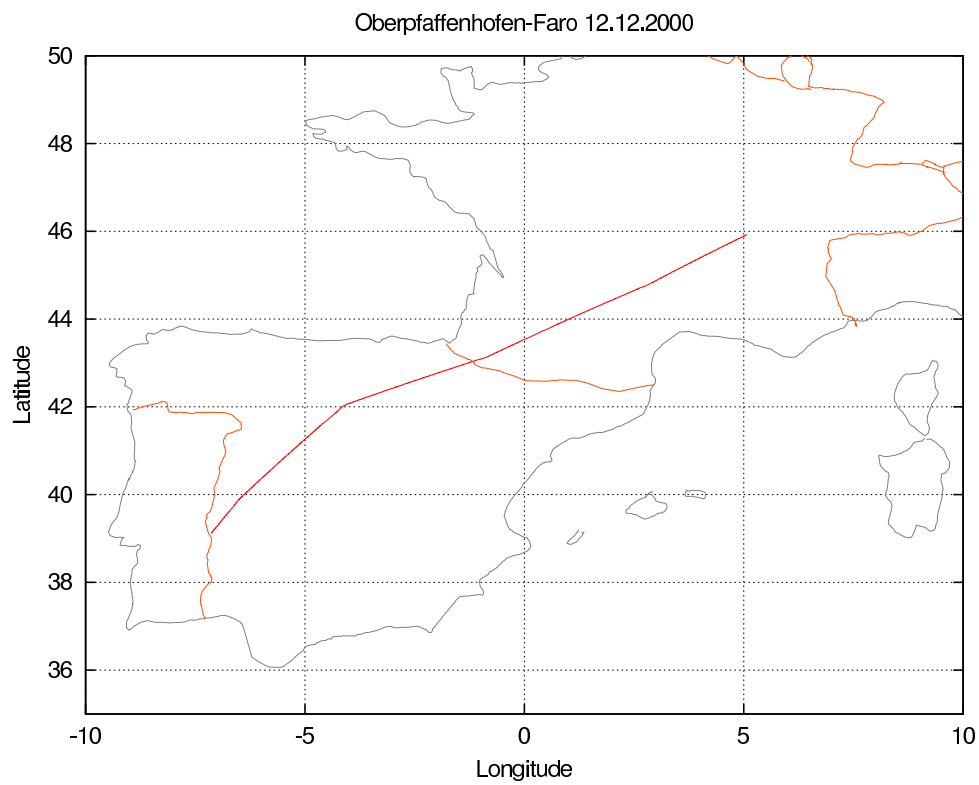


Abbildung E.2: Flugroute 12.12.2000

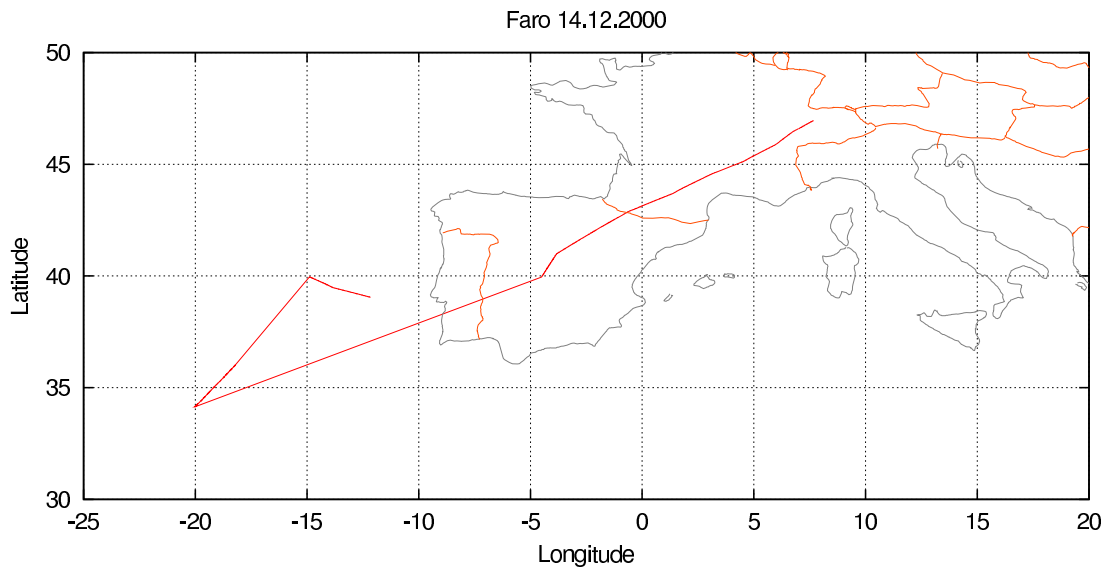


Abbildung E.3: Flugroute 14.12.2000

#	Start	Stop	Seq.	Flughöhe	Pointing	Basis	T_{sys}	Bemerkung
11.12.2000								
14_31_28	14 ³¹	15 ⁰³	161 168	12270 m		107 K 800 K	12000 K	Emis. Abs.
12.12.2000								
12_10_48	12 ¹¹	13 ⁵⁹	248 248 248	12470 m	8° 15° 25°	152 K 120 K 112 K	12000 K	Emis.
14.12.2000								
10_25_07	10 ²⁵	9 ⁵¹	50 50	12470 m		125 K 890 K	13000 K	Emis. Abs.
10_44_11	10 ⁴⁴	11 ¹⁰	110 110	12470 m		125 K 890 K	13000 K	Abs. Emis.
11_18_12	11 ¹⁸	12 ¹²	121 125 124	12470 m	8° 15° 25°	149 K 119 K 109 K	13000 K	Seq.
14_26_28	14 ²⁶	15 ²²	135 138 140	11860 m	8° 15° 25°	173 K 139 K 125 K	13000 K	Seq.

Tabelle E.1: Messungen 2000 (CCD-Beleuchtungszeit 15 ms)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

- Prof. Dr. Hans-Peter Röser für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit
- Prof. Dr. Volker Schindler für seine Teilnahme am Rigorosum als Prüfer
- Dr. Heinz-Wilhelm Hübers für die Begutachtung dieser Arbeit
- Dr. Manfred Birk für die Themenstellung und die Betreuung der Arbeit vor Ort
- Dr. Dieter Hausamann und Dr.-Ing. Peter Haschberger und meinen Kollegen Dr. Georg Wagner, Dr. Erwin Lindenmeier, Ulrich Mair
- Peter Schneider (Satsoft) für die technische Unterstützung
- meinen ehemaligen Kollegen Dr. Ruth Titz, Dr.-Ing. Roland Nitsche, Dr. Christoph R. Englert
- der Zentralwerkstatt des DLR in Oberpfaffenhofen -vor allem Heinz Rödiger- für die gute Zusammenarbeit und Peter Tasler für die Erledigung der mechanischen Arbeiten
- der Flugabteilung in Oberpfaffenhofen, insbesondere Heinrich Brockstieger und Christian Hinz
- meinem Geschäftspartner Dr. Hansjörg Maurer für die ausdauernde Hilfsbereitschaft