

Abschlussbericht

Physikalisch-Chemischen Institutes (PCI)

Universität Heidelberg

Antragsteller: Dr. V. Ebert, Prof. Dr. J. Wolfrum

Institut für Umweltphysik (IUP)

Universität Heidelberg

Antragsteller: Dr. A. Zahn, Prof. Dr. U. Platt

Zum Forschungsvorhaben

01 LA 9816

Messung der stratosphärischen H₂O- und
CH₄-Konzentrationen mit Hilfe von NIR-
Diodenlasern

1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
2.1. Atmosphärische Rahmenbedingungen	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
4.1. Wissenschaftlicher Stand	7
4.2. Technischer Stand – Bisher eingesetzte Messverfahren	9
4.2.1. Messungen von H ₂ O in der Atmosphäre	9
4.2.2. Messungen von CH ₄ in der Stratosphäre	10
4.3. Verwendete Fachliteratur	11
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
6. Beschaffung und Charakterisierung von Komponenten	11
7. Labormessungen	12
7.1. Zweistrahlenspektrometer	12
7.1.1. Kenngrößen des Differenzspektrometers	15
8. Planung des optisch-mechanischen Gesamtsystems eines flugfähigen TDL-Spektrometers	15
8.1. Randbedingungen	16
8.2. Optik	16
8.2.1. Berechnung der Multirefleksionszelle eines flugfähigen TDL-Spektrometers	16
8.2.2. Optisches Layout	22
9. Konstruktion der feinmechanischen Komponenten	23
9.1. Konstruktion der Basisplatte	24
9.2. Buchsenflansch	24
9.3. Instrumentendeckel	25
9.4. Strahlteilerhalterung	25
9.5. Spiegelhalterungen	26
9.6. Befestigung der Herriottspiegel	26
9.7. Line-lock-Zellen	27

9.8.	Halterung des hinteren Herriottzellenspiegels	27
9.9.	Kompensationssystem	28
10.	Zusammenbau des Spektrometers	29
11.	Temperatur und Drucktest	30
12.	Bildverarbeitungssoftware zur Justage und Validierung der Herriottzelle	30
13.	Aufbau einer Multireflexionszelle vom White-Typ	32
13.1.	Simulationsprogramme für White- und Herriott-Zellen	32
14.	Aufbau des Bordrechnersystems	33
14.1.	Anforderungen an das Bordrechnersystem	34
14.1.1.	Beschreibung des Systems	35
14.2.	Weitere Elektronik-Komponenten	38
14.3.	Software der Basisstation	39
15.	Messkampagne	43
15.1.	Messergebnisse des Testfluges in Aire-sur-l'Adour 2001	44
16.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	46
17.	Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	46
18.	Geplante Publikation	46
19.	Referenzen	47

1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben diente dem Bau und dem Einsatz eines flugtauglichen, diodenlasergestützten Prototyps zur Messung atmosphärischer Spurengase auf einer ballongetragenen Plattform. Durchstimmbare Diodenlaser (tunable diode laser = TDL) werden seit einigen Jahren mit wachsendem Erfolg bei unterschiedlichen industriellen Techniken eingesetzt. Durch die enorme technische Weiterentwicklung von TDLs im Laufe der letzten Jahre, insbesondere im nahen infraroten (NIR) Wellenlängenbereich, können jedoch erst jetzt leistungsfähige, leichte und preiswerte NIR-TDL-Spektrometer gebaut werden, die auch für den Flugbetrieb geeignet sind. Durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Laseransteuertechniken reicht deren Einsatzbereich vom Boden bis in die obere Stratosphäre.

Obwohl auch für andere Spurengase hervorragend geeignet, sollte die NIR-TDL-Technik vorerst 'nur' auf Wasserdampf (H_2O) und Methan (CH_4) in der Atmosphäre angewandt werden. Es war geplant, einen Prototypen zu bauen, der eine maximale Masse von ca. 40kg aufweisen sollte und daher bereits auf kleinen Ballonen ($< 10.000 \text{ m}^3$) oder zum Mitflug auf vorhandenen Ballonplattformen eingesetzt werden kann. Dabei sollte das Gerät derart konzipiert werden, dass mit Hilfe geringer Modifikationen (z.B. Einbau von TDLs in einem anderen Spektralbereich) auch andere Spurengase (z. B. NO_2 , NH_3 , C_2H_2 , HF , CO_2 , H_2S etc.) nachgewiesen werden können. Die Entwicklung von kleinen, leichten und damit sowohl im Bau als auch im Einsatz preiswerten flugtauglichen Messgeräten, die zudem viele Spurengase nachweisen können, erscheint uns als ein wichtiger, zukunftsweisender Schritt in der Atmosphärenforschung.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1. Atmosphärische Rahmenbedingungen

Um die wissenschaftlichen Ziele zu erreichen, sollten sowohl Wasserdampf als auch Methan mit einer Genauigkeit von mindestens 0.1ppmv in der mittleren Stratosphäre nachgewiesen werden können. In Tab. 1 und 2 sind die atmosphärischen Rahmenbedingungen sowie die zu erwartende optische Dichte bei einem Lichtweg von 100m aufgelistet.

Ein Spektrometer mit einem TDL-System als Lichtquelle kann optische Dichten im Bereich von unter 10^{-6} nachweisen. Mit am IUP Bremen und PCI Heidelberg aufgebauten, Labor-Prototypen konnten Nachweisgrenzen von $(0.76-5) \cdot 10^{-6}$ erzielt werden. Allerdings ist eine derartige Auflösung bei Feldmessungen schwerer zu erreichen. Wird eine Auflösung von nur $5 \cdot 10^{-5}$ angenommen, können problemlos die geforderten Meßgrenzen von 0.1ppmv für H₂O und CH₄ in einer Höhe von 30km erreicht werden (siehe Tab. 1 und 2). Der hier berücksichtigte Absorptionsweg von 100m kann durch ein Vielfachreflexionssystem einfach erreicht und sogar übertroffen werden. Im Bau und beim Betrieb derartiger Systeme liegen beim PCI und IUP (beide Heidelberg) große Erfahrungen vor. Verfälschungen der Messungen infolge von Kontaminationseffekten an Lufteinlässen oder in der Meßzelle treten bei dem geplanten offenen NIR-TDL-System nicht auf.

Höhe	Druck	Temp.	[H ₂ O] ppmv	[H ₂ O] molec/cm ⁻³	σ cm ² /molec bei $\lambda = 1.396\mu\text{m}$	Optische Dichte ϵ bei 100m	Meßge- nauigkeit ppmv
9 km	307 hPa	230 K	50	$4.8 \cdot 10^{14}$	$4.5 \cdot 10^{-20}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$	0.01
14 km	141 hPa	216 K	15	$7.1 \cdot 10^{13}$	$7.8 \cdot 10^{-20}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	0.02
23 km	34 hPa	219 K	5	$5.6 \cdot 10^{12}$	$1.9 \cdot 10^{-19}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	0.02
30 km	12 hPa	226 K	5.5	$2.1 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{-19}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$	0.06

Tabelle 1: Messung von H₂O bei $\lambda = 1.39552\mu\text{m}$. Druck und Temperatur aus US Standard Atmosphere [1976] Wirkungsquerschnitt σ aus Rothman et al. [1987]. Als Absorptionstrecke wurde eine Gesamtlänge von $L = 100\text{m}$ angenommen. Der Spektrograph soll eine differentielle optische Dichte von $D_e = 5 \cdot 10^{-5}$ nachweisen können.

Höhe	Druck	Temp.	[CH ₄] ppmv	[CH ₄] molec/cm ⁻³	σ cm ² /molec bei $\lambda = 1.654\mu\text{m}$	Optische Dichte ϵ bei 100m	Meßge- nauigkeit ppmv
9 km	307 hPa	230 K	1.8	$1.7 \cdot 10^{13}$	$4.0 \cdot 10^{-20}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	0.01
14 km	141 hPa	216 K	1.7	$8.0 \cdot 10^{12}$	$6.5 \cdot 10^{-20}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	0.02
23 km	34 hPa	219 K	1.1	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.0 \cdot 10^{-19}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.05
30 km	12 hPa	226 K	0.7	$2.7 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^{-19}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	0.11

Tabelle 2: Messung von CH₄ bei $\lambda = 1.65372\mu\text{m}$. Druck und Temperatur aus US Standard Atmosphere [1976] Wirkungsquerschnitt σ aus Rothman et al. [1987]. Als Absorptionstrecke wurde eine Gesamtlänge von $L = 100\text{m}$ angenommen. Der Spektrograph soll eine differentielle optische Dichte von $D_e = 5 \cdot 10^{-5}$ nachweisen können.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Aufgrund ihrer Erfahrungen im Aufbau und Einsatz von NIR-TDL-Systemen, sowie der Interpretation von stratosphärischen Messdaten sind an dem Gesamtprojekt das Institut für Umweltphysik Bremen (IUP Bremen), das Physikalisch-Chemische Institut Heidelberg (PCI), sowie das Institut für Umweltphysik Heidelberg beteiligt (IUP Heidelberg).

Entsprechend ihren Forschungsschwerpunkten und den bereits vorhandenen Erfahrungen wurden die Aufgaben wie folgt verteilt:

IUP Bremen:

- Entwicklung und Aufbau der Auswerte- und Steuerelektronik
- Charakterisierung der verwendeten Laser zur Messung von H₂O
- Aufbau eines NIR-TDL-Laborgerätes zur Messung von H₂O
- Datenauswertung und Interpretation

PCI Heidelberg:

- Charakterisierung der verwendeten Laserdioden zur Messung von CH₄
- Aufbau eines NIR-TDL-Laborgerätes zur Messung von CH₄
- Aufbau und Test einer laborgestützten Multirefleksionszelle zur Messung von CH₄
- Konstruktion und Bau einer offenen Multirefleksionszelle
- Wartung und Kontrolle des Instrumentes vor und während der Flüge

IUP Heidelberg

- Anbindung an die Telemetrie für Ballontelemetrie (Datenübertragung)
- Bau einer Labormultirefleksionszelle
- Datenauswertung und Interpretation
- Aufbau des Flugrechners und Entwicklung der Steuersoftware, Anbindung an die Ballontelemetrie (Datenübertragung)
- Aufbau der Steuerelektronik

In einer ersten Entwicklungsphase wurden die Einzelkomponenten des Spektrometers in den beteiligten Instituten entwickelt und notwendige Labormessungen gemacht. In einer weiteren Projektphase wurden die gemachten Ergebnisse zur Entwicklung eines Spektrometerprototypen genutzt und erste Testmessungen mit dem Gesamtsystem gemacht. In der letzten Phase wurde die Flugversion des TDL-Spektrometers entwickelt und das Gesamtsystem getestet und in Betrieb genommen.

Die Messkampagne erfolgte außerhalb der Projektlaufzeit und wurde aus Mitteln der Institute finanziert.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1. Wissenschaftlicher Stand

Die gleichzeitige Messung von Wasserdampf und Methan in der unteren und mittleren Atmosphäre ist für das Verständnis physikalisch-chemischer Vorgänge in der Atmosphäre von höchster Wichtigkeit. Diese beiden Spurengase haben entscheidenden Einfluss sowohl auf den Strahlungshaushalt der Erde und damit auf das Klima auf unserem Planeten als auch auf die stratosphärische Ozonschicht.

Circa 62% des natürlichen Treibhauseffektes, also ca. 21°C, wird durch den atmosphärischen Wasserdampf verursacht [Houghton 1984]. Er ist ein wichtiger Partner für Gasphasenreaktionen (z.B. Bildung des Hydroxylradikals OH) sowie für heterogene Reaktionen auf Partikeloberflächen, wie troposphärische Wolken oder die selten zu beobachtenden stratosphärischen Cirrus-Wolken (CC) und Polaren-Stratosphären-Wolken (PSC). Heterogene Reaktionen sind oft um Größenordnungen schneller als die in der Gasphase [Tolbert 1994] und können deswegen zu drastischen Folgen, z.B. dem intensiven Ozonabbau in der polaren Stratosphäre (Ozonloch) infolge von Reaktionen chlorhaltiger Gase an PSC-Partikeln führen [Farman et al. 1985].

Leider ist der Wasserdampfaushalt der Atmosphäre, insbesondere der der Stratosphäre, nicht gut verstanden, wie die Bildung des Wasserdampfminimums (Hygropause) ca. 2-4km oberhalb des stratosphärischen Temperaturminimums (Tropopause). Auch sind die Prozesse, die zur Befeuchtung der Stratosphäre führen, insbesondere der Transport von H₂O in die Stratosphäre schlecht verstanden [Rosenlof et al. 1997, Zahn et al. 1997]. In der Stratosphäre gibt es deutlich mehr H₂O (> 50%) als über theoretische Überlegungen abgeleitet werden kann. Dieses fehlende Wissen ist zum großen Teil eine Folge des noch ungenügenden Datenmaterials, denn es gibt entweder präzise, jedoch schwere, aufwendige und deswegen selten eingesetzte Messgeräte (siehe Kap. 3) oder aber leichte und dafür ungenaue¹.

Ein verbessertes Verständnis des atmosphärischen Wasserdampfkreislaufes erscheint insbesondere nach der Entdeckung einer Zunahme des Wasserdampfes in der Stratosphäre äußerst dringlich [Oltmans and Hofmann 1995]. Diese Wasserdampfzunahme ist bisher nicht verstanden, kann jedoch die Folge eines erhöhten Wasserdampftransportes aus der Troposphäre infolge einer dortigen Temperaturerhöhung (anthropogener Treibhauseffekt) sein. Eine weitere Wasserdampfzunahme kann durch die Emission von Wasserdampf durch Flugzeuge in der Tropopausenregion und durch die anthropogenen Emission von Methan verursacht werden. Die CH₄-Konzentration ist von ca. 0.8ppmv im 17. Jahrhundert auf heute 1.75 ppmv angestiegen [Dlugokencky et al. 1994]². Ca. 10%, d.h. ca. 50Mt/Jahr, dieses Methans wird in der Stratosphäre abgebaut [Crutzen 1995], wobei als Endprodukt je zwei H₂O-Moleküle produziert werden. Die Zunahme der Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre kann weitreichende Folgen haben, z.B. die zunehmende CC- und PSC-Partikelbildung

¹Dies trifft auch auf die Wasserdampfmessungen von Satelliten zu. Deren Genauigkeit ist z.Z. auf ca. 0.5ppmv begrenzt.

²Innerhalb dieser Zeitspanne hat sich die Treibhauswirkung des CH₄ um ca. 0.42 Wm⁻² erhöht [IPCC 1990]. Zudem stellt das CH₄ einen starken Ozonbildner dar und ist für ca. 6 ppbv des troposphärischen Ozons verantwortlich [WMO 1991].

und damit die Verstärkung heterogener Reaktionen [Peter et al. 1991, Schumann 1994] sowie die Verstärkung des Treibhauseffektes und damit verbunden die Abkühlung der Stratosphäre.

Weitere 'Detailprobleme' wie die Quantifizierung von Dehydrierungsprozessen in der Stratosphäre, wie sie über der Antarktis während des Winterhalbjahres beobachtet wurde [Vömel et al. 1995a], können untersucht werden. Diese Dehydrierung und damit verbundene Denitrifizierung der Stratosphäre ist entscheidend mitverantwortlich für die Bildung des Ozonlochs, tritt aber auch in anderen Bereichen der unteren Stratosphäre auf [Jensen et al. 1996, Vömel et al. 1995b]. Die Ursachen der Dehydrierung, wie auch die damit zusammenhängende Bildung von stratosphärischen Wolkenpartikeln ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -Partikel, PSC des Typs I und II), die bis heute nur unzureichend verstanden ist, sollten mit Hilfe der geplanten Messungen besser verstanden werden.

Insbesondere in der Stratosphäre besteht eine enge Synergese zwischen den Spurengasen Wasserdampf und Methan, denn Methan wird in der Stratosphäre durch chemische Reaktionen mit OH, Cl und $\text{O}(^1\text{D})$ und der Photolyse durch UV-Strahlung abgebaut [Bergamaschi et al. 1996, LeTexier et al. 1988]; dabei werden (z.T. über das Zwischenprodukt H_2) zwei Wassermoleküle gebildet. Insofern ist die Summe der Spurengasmischungsverhältnisse $[\text{H}_2\text{O}] + 2\cdot[\text{CH}_4]$ in der Stratosphäre annähernd konstant. Folglich erlaubt die simultane Messung der stratosphärischen Vertikalprofile von H_2O und CH_4 Rückschlüsse über die Kopplung von stratosphärischer Chemie und vertikalen Transportprozessen. Dieses Wissen ist insbesondere in der äquatorialen Stratosphäre, aber auch in der winterlichen Stratosphäre bei der Bildung des Ozonlochs, von großer Bedeutung.

Aufgrund ihrer starken Absorption im infraroten Wellenlängenbereich gehören H_2O und CH_4 - neben CO_2 , O_3 und FCKWs- zu den wichtigsten klimarelevanten Spurengasen. Ein besseres Verständnis der vermuteten Erhöhung der stratosphärischen Wasserdampfbeladung [Oltmans and Hofmann 1995] infolge von Klimaveränderungen und der Wasserdampfemission durch hochfliegende Flugzeuge (Bildung von Cirruswolken) ist für das Erdklima und der Chemie in der Stratosphäre (Intensivierung heterogener Reaktionen durch vermehrte Wolkenbildung bei gleichzeitiger Abkühlung der Stratosphäre) von größter Bedeutung.

Eine genauere Bilanzierung der beiden wichtigsten stratosphärischen Quellen für die ozonwirksame HO_x -Spurenstofffamilie (OH, HO_2 , H_2O_2) wird durch die simultane hochaufgelöste Messung der Quellgase H_2O und CH_4 ermöglicht.

4.2. Technischer Stand – Bisher eingesetzte Messverfahren

4.2.1. Messungen von H₂O in der Atmosphäre

Bei Beginn des Projektes existierten bereits folgende Verfahren, mit denen der atmosphärische Wasserdampfgehalt in der Troposphäre und der Stratosphäre gemessen werden kann:

1. Das Lyman- α -Verfahren misst die Fluoreszenz, die angeregte OH-Radikale, die durch Dissoziation von Wasserdampf bei einer Wellenlänge von 121 nm entstehen, aussenden. Ein Problem dieser Methode ist, dass Korrekturen der Ergebnisse aufgrund der Absorption von Lyman- α -Strahlung durch andere Gase, wie O₂ und O₃, nötig sind. Diese Korrekturen steigen mit größeren Höhen [siehe z.B. Kley et al. 1979, Kelly et al. 1989]. Zur Zeit ist das Lyman- α -Verfahren das genaueste zur Messung kleiner H₂O-Mischungsverhältnisse.
2. Bei einem Taupunkt-Hygrometer wird die Temperatur eines Spiegels gerade so geregelt, dass eine Wasserdampfkondensation der darüberbefindlichen Luft erreicht wird. Aus der Temperatur des Spiegels kann direkt auf den Wasserdampfpartialdruck bzw. die Luftfeuchte geschlossen werden. Dieses Verfahren hat den entscheidenden Nachteil, dass es lange Ansprechzeiten (ca. 5 min) aufweist sowie für geringe H₂O-Konzentrationen (Stratosphäre: 5ppmv) sehr ungenau wird [Mastenbrook and Daniels 1980].

Die neueste Messtechnik basiert auf dem Verfahren der - auch in diesem Vorhaben vorgesehenen - Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie im infraroten Wellenlängenbereich. Bisher wurden meistens Bleisalz-Diodenlaser eingesetzt, die jedoch aufwendig (mindestens auf LN₂-Temperatur, 77K) gekühlt werden müssen. Dabei wurden drei Messgerätetypen (3., 4., 5.) entwickelt.

3. Der Prototyp eines IR-TDL-Spektrometers kam an Bord eines Flugzeuges zum Einsatz [Silver and Stanton 1987]. Der Laser (mittleres Infrarot: $\lambda = 6.5 \mu\text{m}$) musste mit flüssigem Stickstoff auf 77 K gekühlt werden, eine geschlossene Vielfachreflektionszelle (White-Typ) zur Verlängerung des Absorptionsweges wurde auf konstantem Druck (5 Torr) gehalten. Die Autoren berichten von Messfehlern infolge der H₂O-Ausgasung des Flugzeuges und des Einlasssystems sowie von Instabilitäten des Kühlsystems oberhalb einer Flughöhe von ca. 4.5 km.
4. Ohne eine Messzelle arbeitet ein Ballonexperiment (BLISS), bei dem mit Hilfe von TDLs im mittleren Infrarot ($\lambda = 5\text{-}8\mu\text{m}$) simultan die Konzentrationen von sechs Spurengasen gemessen werden, unter anderem auch von H₂O und CH₄ [Webster and May 1987]. Die Absorption findet in einem offenem Weg unterhalb des Ballons statt, wobei das Laserlicht von einem Retroreflektor, der im Abstand von 250-350 m unterhalb des Ballons hängt, wieder in den Korb zurückreflektiert wird. Hauptproblem dieses Instrumentes stellt die aufwendige Kühlung der verwendeten Laserdioden auf 77 K mit flüssigem Stickstoff bzw. auf 20 K mit flüssigem Helium dar. Bisher wurden diese Messungen nur in dem Höhenbereich von 26-40 km vorgenommen, so dass der sehr interessante Bereich der Tropopause und der unteren Stratosphäre nicht untersucht wurde.
5. Bei dem modernsten TDL-System zur H₂O-Messung wird im nahen Infrarot (NIR) gearbeitet und die H₂O-Absorption bei $\lambda = 1.316\mu\text{m}$ ausgenutzt [Silver and Hovde 1994]. Mit einem flugzeuggestützten Messgerät wurden bereits erste Flüge durchgeführt. Es handelt sich hier um ein automatisiertes Gerät, das zur Verlängerung der Absorptionsstrecke eine lichtleitergekoppelte,

geschlossene Vielfachreflektionszelle (Herriott-Typ) verwendet. Das Hauptproblem bei diesem Gerät ist darin begründet, dass zuerst das Messgas (Umgebungsluft) in die Messzelle geleitet werden muss, wobei Ausgasungen aus dem Einlasssystem sowie Depoteffekte in der Messzelle die Messergebnisse verfälschen. Zudem muss der Druck innerhalb der Zelle konstant gehalten werden, was erheblichen technischen Aufwand erfordert.

Bei den soeben beschriebenen Geräten handelt es sich um in-situ-Messgeräte, d.h. sie messen vor Ort den Wasserdampfgehalt der umgebenden Luft. Fernerkundungsexperimente, z.B. auf Satelliten, mit entsprechend geringeren Messgenauigkeiten ($\geq 10\%$) wurden ebenfalls eingesetzt, z.B.:

6. bei dem ATMOS-Experiment, das im Jahr 1985 an Bord des „Spacelab“ für sieben Tage im All war [Gunsen et al. 1990]. Aus Sonnenspektren wurde der Wasserdampfgehalt mit Hilfe eines Inversionsmodells bestimmt. Abgesehen von den extrem hohen Kosten hat diese Methode den Nachteil, dass die räumliche und zeitliche Auflösung im Vergleich zu in-situ-Messungen wesentlich geringer ist. Kleinskalige Feinstrukturen [siehe z.B. Kley et al. 1980] sind damit nicht erfassbar. Ähnliche Nachteile weisen die satellitengestützten H₂O-Messgeräte SAGE II und HALOE auf [Rosenlof et al. 1997].

4.2.2. Messungen von CH₄ in der Stratosphäre

Auch bei den Methanmessungen kann zwischen in-situ und fernerkundenden Messverfahren unterschieden werden:

1. Mit Hilfe des bereits erwähnten ATMOS-Gerätes wurden auch Methanmessungen durchgeführt. Auf die Nachteile dieser Methode wurde bereits hingewiesen.
2. Als weiteres Verfahren zur Messung der stratosphärischen Methankonzentration werden mit Hilfe von ballongetragenen Tieftemperatur-Sammlern („Whole-Air-Cryogenic-Sampler“) Luftproben ausgefroren [Schmidt et al. 1991] oder Crap-Sammler verwendet, die ohne Kühlmittel arbeiten, jedoch nur sehr kleine Proben sammeln können. Die Methankonzentration dieser Proben wird im Labor mit gaschromatographischen Methoden gemessen. Nachteil dieser Messtechnik ist die geringe räumliche und zeitliche Auflösung, das große Gewicht des Kryosammlers sowie die hohen Verbrauchskosten (Kühlmittel: Neon, aufwendige Einlasssysteme) [siehe z.B.: Schmidt 1988].
3. Aber auch mit IR-TDL-Systemen wurde bereits erfolgreich atmosphärische Methanmessungen durchgeführt. Das BLISS-System hat jedoch für die in diesem Vorhaben angestrebten Ziele einige (bereits erwähnte) bauartbedingte Nachteile.
4. Das flugzeuggestützte Diodenlasersystem zur Messung von Methan ALIAS arbeitet - wie die meisten TDL Instrumente - mit Bleisalzlaser im mittleren Infrarot ($\lambda = 8\mu\text{m}$), was bedeutet, dass die Diodenlaser mit Stickstoff gekühlt werden müssen. Zudem wird bei dem ALIAS-Instrument eine geschlossene Absorptionszelle verwendet, die zu den bereits erwähnten Kontaminationsproblemen führen kann [Webster et al. 1994].

4.3. Verwendete Fachliteratur

Eine Liste der verwendeten Fachliteratur findet sich im Anhang.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der über den gesamten Zeitraum des Projektes intensiven Zusammenarbeit der drei direkt beteiligten Institute (Institut für Umweltphysik Heidelberg, Institut für Umweltphysik Bremen, Physikalisch-Chemisches Institut Heidelberg) spielten Kooperationen insbesondere bei der Durchführung des Ballonfluges eine wichtige Rolle.

Entsprechend der grundlegenden Konzeption des Gerätes zum Mitflug auf vorhandenen Ballon-Messplattformen wurde der Ballonflug im Rahmen des Projektes in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von C.Schiller am Institut für Stratosphärische Chemie des Forschungszentrums Jülich durchgeführt. Diese Gruppe betreibt die TRIPLE-Gondel, die als Plattform für die Erstflug des Gerätes diente. Diese Plattform erwies sich als besonders geeignet, da ihre Trajektorie sowie ihr struktureller Aufbau speziell für In-situ-Messgeräte konzipiert sind. Die in dieser Arbeitsgruppe vorhandenen langjährigen Erfahrungen mit der Durchführung von wissenschaftlichen Ballonflügen, insbesondere in Bezug auf in-situ-Messgeräte, haben sich für das Projekt als sehr nützlich erwiesen.

Die flugtechnische Seite wurde von der französischen Weltraumorganisation CNES (Centre Nationale d'Études Spatiales) betreut. Dies betrifft die Durchführung des Fluges selbst, Steuerung des Ballons gemäß wissenschaftlicher und anderer Vorgaben wie z.B. Flugsicherung, den Betrieb der Telecommand- und Telemetrie-Verbindungen, Vorausberechnung von Wetterbedingungen und Flugtrajektorien sowie die Bereitstellung der Infrastruktur für die Vorbereitungsphase des Fluges.

Geplant ist auch, die beim Erstflug gewonnenen Methan-Profildaten mit den Ergebnissen eines anderen Experimentes an Bord der selben Gondel, des Luftsammlers BONBON, zu vergleichen. Hierdurch ergibt sich voraussichtlich noch eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt (Gruppe A.Engel), die dieses Gerät betreibt.

6. Beschaffung und Charakterisierung von Komponenten

Zur absorptionsspektroskopischen Messung von Methan im NIR-Bereich wurden drei DFB-Laserdioden des Herstellers Siemens angeschafft und charakterisiert, die auf einer Wellenlänge von 1648 nm emittieren.

Im Gegensatz zu den sonst verwendeten Lasern der Firma Sensors Unlimited wurden Diodenlaser der Firma Siemens verwendet. Der Vorteil der Siemens-Dioden besteht in dem größeren Stromtuningkoeffizienten, d.h. man kann mit einer kleineren Variation des Betriebsstromes die Emissionswellenlänge über die gesamte Methanabsorptionslinie abstimmen.

Zur absorptionsspektroskopischen Messung der CH₄-Konzentration wurden Photodetektoren ausgewählt und angeschafft, die einen erweiterten Empfindlichkeitsbereich aufweisen. Im Vergleich zu Standarddetektoren, deren „Cut-off“-Wellenlängen im spektroskopisch relevanten Bereich liegen, was eine genügend empfindliche Messung erschwert, weisen die angeschafften Detektoren eine „Cut-off“-Wellenlänge von ca. 1830 nm auf. Damit eignen sie sich für eine Messung bei der gewählten Wellenlänge von 1650 nm. Dadurch sollten in der Literatur erwähnte Störungen durch die starke Temperaturempfindlichkeit der Cut-off-Wellenlänge minimiert werden.

Im einzelnen handelt es sich um drei InGaAs-Detektoren der Firma EG & G, die zur Minimierung des Detektorrauschens mit Peltierkühlern ausgestattet sind.

7. Labormessungen

7.1. Zweistrahl-Spektrometer

Im Rahmen von Labormessungen wurde am PCI ein Zweistrahl-Spektrometer mit einer Multireflexionszelle aufgebaut. Zum Einsatz kam eine astigmatische Herriott-Multireflexzelle, die bei einer Basislänge von 55 cm und 182 Reflexen eine Absorptionsstrecke von 100 m bietet. Um die innerhalb der Zelle entstehenden Fringes zu kompensieren, wurde diese in leichte Vibration versetzt.

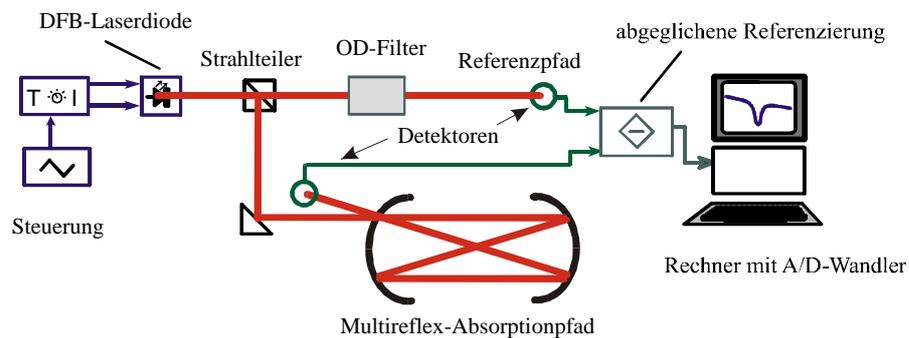


Abbildung 1: Zweistrahl Laborphotometer

Es wurden Messungen bei 1 atm und im Hinblick auf den eventuellen Einsatz in der Stratosphäre bei 0.04 atm durchgeführt. Aus praktischen Gründen erfolgten die Messungen jedoch jeweils bei Raumtemperatur. In Abbildung 2 bis Abbildung 5 sind das zeitliche Verhalten des Spektrometersignals über einige Minuten und die abgetastete Absorptionslinien dargestellt.

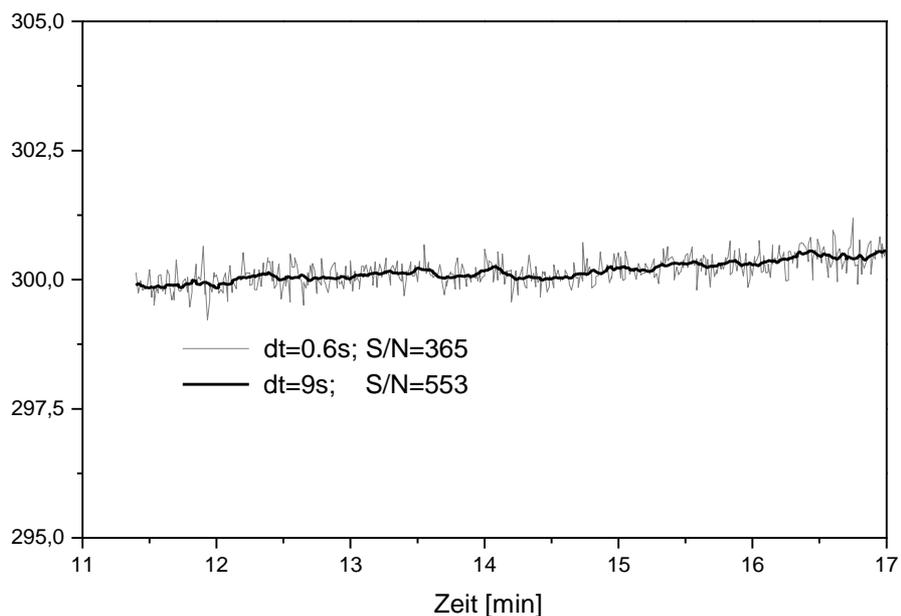


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des Spektrometersignals über einige Minuten (1atm, 1.8 ppm Methan)

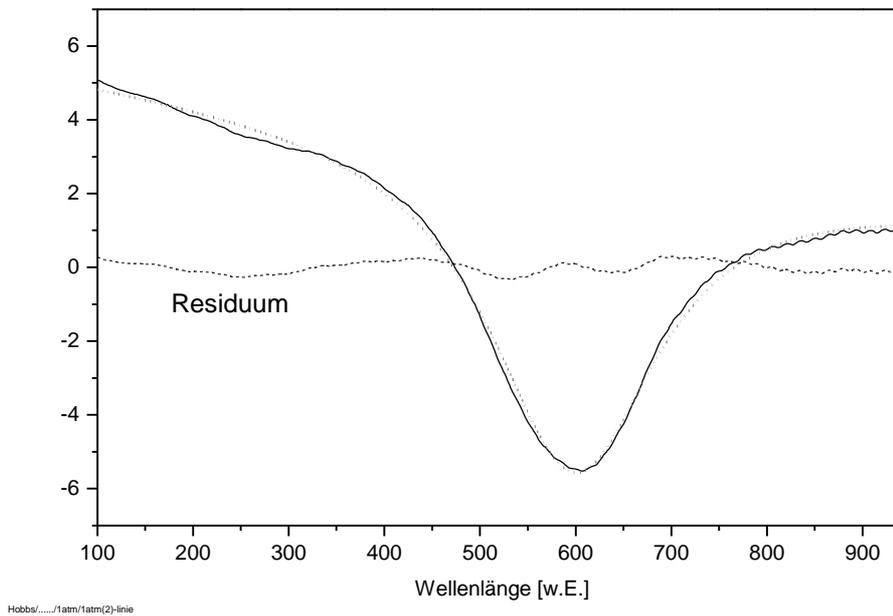


Abbildung 3: Abgetastete Absorptionslinie und angepasstes Lorentzprofil (1atm, 1.8 ppm Methan, 300K)

Die leichte Drift des Spektrometersignals kann auf eine Variation des atmosphärischen Luftdrucks zurückgeführt werden, da die Messreihe mit offener Zelle durchgeführt wurde.

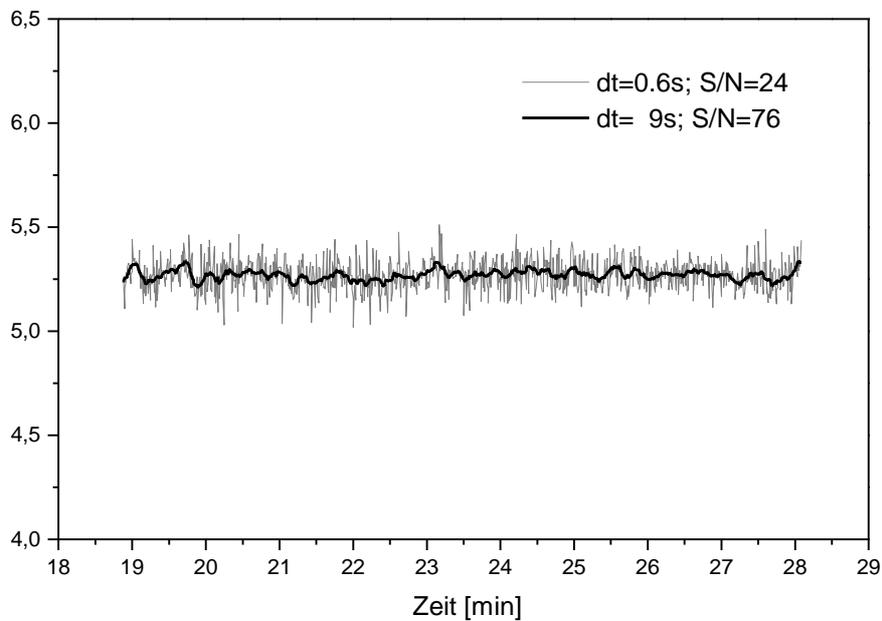


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Spektrometersignals über einige Minuten (0.04atm, 1.8 ppm Methan, 300K)

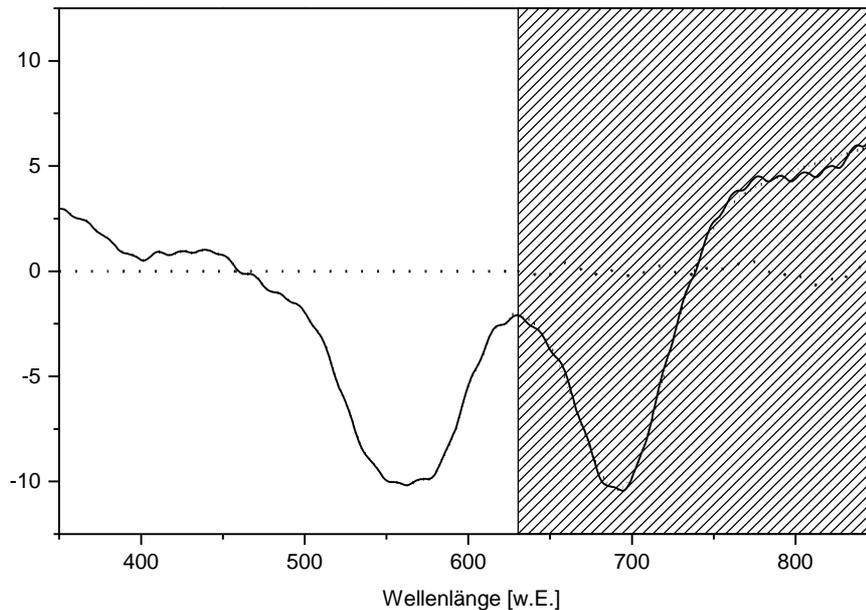


Abbildung 5: Abgetastete Absorptionslinie und angepasstes Lorentzprofil (0.04atm, 1.8 ppm Methan, 300K)

Aufgrund der verringerten Druckverbreiterung treten die vier Methanlinien bei 0,04 atm in zwei Untergruppen separiert auf. Die Anpassung eines Untergrundprofils und eines Gaußprofils wurde nur in dem grau unterlegten Bereich durchgeführt.

Zur Überprüfung der Linearität der Spektrometersignale wurden diese in Abbildung 6 gegen die Teilchenzahldichte aufgetragen. Die Absorptionszelle wurde mit Prüfgas der Konzentrationen 100 ppmV, 20 ppmV bzw. mit Umgebungsluft gefüllt und auf Drücke von 0,027 ; 0,041 bzw. 0,042 atm evakuiert (je +/- 0,001 atm).

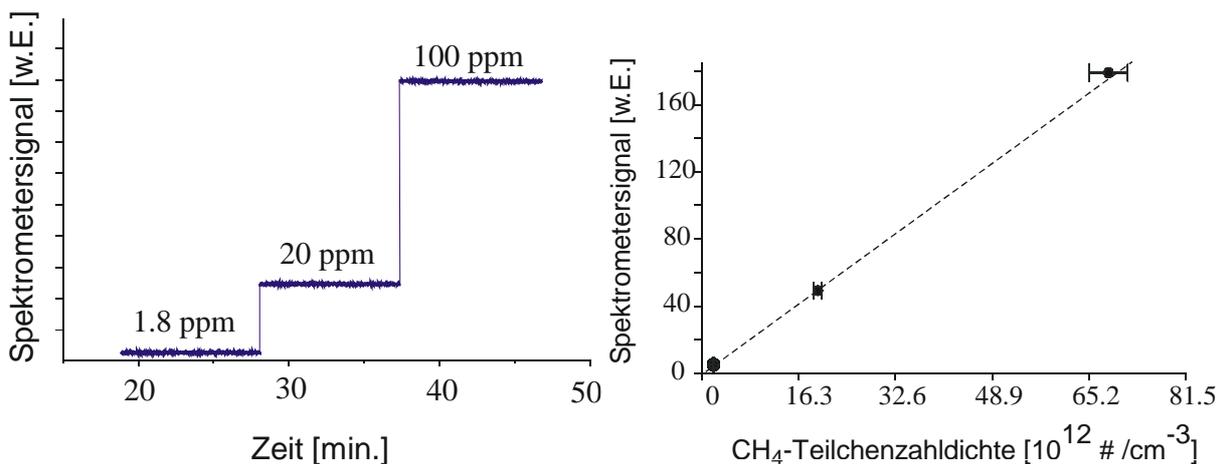


Abbildung 6

Linearität und zeitliche Stabilität des Spektrometersignals über die Konzentrationsstufen 1,8 ppm – 20 ppm – 100ppm. Da die Messungen bei unterschiedlichem Druck durchgeführt wurden, ist das Spektrometersignal gegen die Teilchenzahldichte von Methan aufgetragen. Die angegebene Unsicherheit erklärt sich aus der Ungenauigkeit der Kenntnis des Gesamtdrucks in der Absorptionszelle.

7.1.1. Kenngrößen des Differenzspektrometers

Kenngröße	
zeitliche Auflösung [s]	0,6 9
Absorptions-Nachweisgrenze	1,8 10 ⁻⁵ bei 1 atm; 0,6 s 4,7 10 ⁻⁶ bei 1 atm; 9 s 4,9 10 ⁻⁶ bei 0,04 atm; 0,6 s 1,6 10 ⁻⁶ bei 0,04 atm; 9 s
Methan-Nachweisgrenze [ppb]	5 bei 1 atm; 0,6 s 1,3 bei 1 atm; 9 s * 75 bei 0,04 atm; 0,6 s 24 bei 0,04 atm; 9 s
Methan-Nachweisgrenze [ppm m]	0,5 bei 1 atm; 0,6 s 0,3 bei 1 atm; 9 s 7,5 bei 0,04 atm; 0,6 s 2,4 bei 0,04 atm; 9 s

Tabelle 3 Kenndaten des Zweistrahl-Spektrometers mit abgeglichener Referenzierung und Multireflexionszelle. Erfassung der 2_{n3}-R5 Liniengruppe von Methan mit $a=0,36$ [1/ (cm atm)] bei $p=1\text{atm}$; bzw. einer Untergruppe mit $a=0,16$ [1/ (cm atm)] bei $p=0,04$ atm. Der mit * gekennzeichnete Wert wurde für eine driftkorrigierte Messreihe erzielt.

Dieses Spektrometer ermöglichte eine erstmals in der NIR-Diodenlaserspektroskopie erreichte Nachweisempfindlichkeit von bis zu 1,3 ppb Methan. Vergleichbare Nachweisgrenzen sind unserer Kenntnis nach mit Diodenlaserspektrometern bisher nur durch die Erfassung der stärkeren Methanübergänge bei 3-4 μm erreicht worden.

8. Planung des optisch-mechanischen Gesamtsystems eines flugfähigen TDL-Spektrometers

Das Gesamtsystem des TDL-Spektrometers unterteilt sich in den optischen Teil, der die Diodenlaser, die Multireflexionszelle und Sensoren umfasst, den elektrischen Teil, der aus Signalgenerierung und –detektion sowie der Stromversorgung besteht, und der Datenerfassung und –auswertung (Software). Die Planung des optisch-mechanischen Systems erfolgte ausgehend von der Multireflexionszelle, da deren Design den Laserstrahlverlauf (Ein-/Auskoppelwinkel und –positionen) und damit das optische Gesamtlayout bestimmt. Weitere optische Komponenten sind

- Zwei Diodenlaser verschiedener Wellenlänge incl. Kollimationsoptik zur Messung der beiden Spezies Methan und Wasser,
- zwei Linelock-Zellen zur Wellenlängenstabilisierung der Diodenlaser,
- für jede Spezies je drei Detektoren zur Messung der Signale I (Absorptionssignal), I_0 (Ausgangsleistung) und I_{ref} (Linelock-Signal),
- verschiedene Umlenkspiegel und Strahlteiler, die sich aus dem optischen Layout ergeben.

8.1. Randbedingungen

Das Gesamtkonzept des Spektrometers muss in Hinblick auf die zu erwartenden Randbedingungen, wie z.B. Druck und Temperatur, entwickelt werden. Aus Gesprächen mit Dr. C. Schiller vom FZK ging hervor, dass je nach Einsatzgebiet und Jahreszeit während eines Ballonfluges Temperaturen zwischen +30 °C am Boden und –90 °C in der Tropopause auftreten. Der Druck richtet sich nach der geplanten Einsatzhöhe und liegt grob zwischen Normaldruck und 10 hPa.

Im Laufe einer Ballonmesskampagne ist das Instrument während des Starts und der Landung größeren Beschleunigungen ausgesetzt, so dass einer konsequenten Leichtbauweise zugunsten günstiger Mitfluggelegenheiten Grenzen gesetzt sind. Nicht zuletzt darf man vergessen, dass ein Ziel des Projektes die Entwicklung eines Spektrometers für den häufigen Einsatz ist und daher größere Schäden zu vermeiden sind.

8.2. Optik

8.2.1. Berechnung der Multirefleksionszelle eines flugfähigen TDL-Spektrometers

Die Absorptionszelle bildet die zentrale optische Komponente des Spektrometers. Um ein möglichst stabiles System zu erhalten, d.h. eine Multirefleksionszelle, die sowohl mechanisch, als auch optisch stabil ist, wurde entschieden eine Absorptionszelle vom Herriott-Typ zu verwenden. Diese Konstruktion zeichnet sich durch wenige im wesentlichen identische optische Komponenten und durch eine einfache Justage in Verbindung mit hoher Justagetoleranz aus.

Während eine einfache sphärische Herriott-Zelle, die nur für einen Einstrahl Aufbau verwendet wird, relativ einfach zu konstruieren ist und auch nachträglich noch die Variation von Parametern, wie z.B. der Basislänge, zulässt, stellt eine Zelle für einen Mehrstrahl Aufbau wesentlich höhere Ansprüche an die Auslegung.

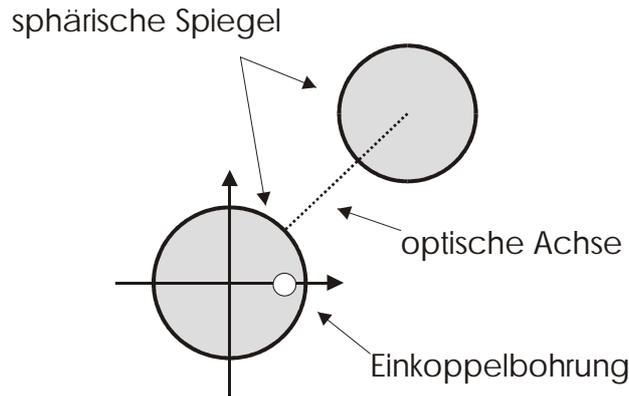
Folgende Parameter wirken sich auf die Auslegung einer Herriott-Zelle aus:

- die Länge der Absorptionsstrecke,
- die gewünschte Reflexzahl auf den beiden Zellenspiegeln,
- der Laserstrahlspottdurchmesser auf der Spiegeloberfläche,
- die Basislänge, also der Abstand zwischen den beiden gegenüberliegenden Zellenspiegeln,
- die Brennweite der sphärischen Spiegel; sie wird durch die Basislänge und die zu erzielende Absorptionsstrecke beeinflusst,
- die Ein-/Auskoppelwinkel des Laserstrahls,
- die Position und die Größe der Bohrungen im Ein-/Auskoppelspiegel.

Bei einem Mehrstrahl Aufbau steigt die Komplexität, da die Geometrieparameter für die beiden Laserstrahlen nicht unabhängig voneinander sind und ein entsprechendes Optimum gefunden werden muss.

Festlegung des Koordinatensystems

Für die mathematische Beschreibung des Laserstrahlverlaufes wird ein kartesisches Koordinatensystem verwendet, dessen Ursprung durch den Schnittpunkt der optischen Achse mit den beiden Spiegeln des Resonators festgelegt wird:



Berechnung der Brennweite eines geeigneten sphärischen Spiegels:

Zuerst sollen, basierend auf den gegebenen Parametern des zu fliegenden Instrumentes, wie z.B. der maximalen Länge von ca. 70 cm für das Gesamtsystem, die Krümmungsradien der Spiegel berechnet werden. Sie basieren auf folgenden Annahmen:

- die Zelle lässt sich als idealer Resonator beschreiben, d.h. die Brennweiten der beiden Spiegel (im Folgenden mit 1 und 2 indiziert) sind identisch,
- die Position des n-ten Spots auf der Spiegeloberfläche lässt sich nach

$$x_n = x_0 \cdot \cos n\mathbf{q} + \frac{L \cdot g_2}{\sqrt{[g_1 \cdot g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)]}} \cdot \left(x_0' - \frac{x_0}{R_1} \right) \cdot \sin n\mathbf{q}$$

Gleichung 1

berechnen.

Hierbei sind:

- x_0 die Eintrittskordinaten des Laserstrahls bzw. der Mittelpunkt der Ein-/Austrittsöffnung,
- x_n die Koordinaten des n-ten Spots auf der Spiegeloberfläche, der Spiegelmittelpunkt definiert die Koordinaten (0/0),
- L der Abstand der Spiegel voneinander (Basislänge),
- x' die Steigung des Laserstrahls in x-Richtung,
- R_1 der Krümmungsradius des sphärischen Spiegels, wobei $R=2f$ (f: Brennweite),
- g_1, g_2 Resonatorparameter, g muss für einen stabilen Resonator zwischen -1 und 1 liegen,
- \mathbf{q} Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Spots auf einem Spiegel.

Die Resonatorparameter g werden durch

$$g = 1 - \frac{L}{R} = \cos \mathbf{q}$$

Gleichung 2

gegeben. Entsprechend dem eindimensionalen Fall lässt sich das System auf ein zweidimensionales System erweitern. Unter der Annahme, dass keine astigmatischen Spiegel verwendet werden, erzeugt der Laser im Regelfall auf den Spiegeloberflächen ein elliptisches Spotmuster. Unter der

Voraussetzung, dass für die Eintrittskordinaten bzw. bei gegebenen Koordinaten für die Laserstrahlsteigungen gilt

$$x_0 = \frac{Lg_2}{\sqrt{[g_1g_2(1-g_1g_2)]}} \cdot \left(y' - \frac{y_0}{R_1} \right) \text{ und } y_0 = x' - \frac{x_0}{R_1} = 0$$

Gleichung 3

folgt, dass sich die Spotposition für einen idealen Resonator nach n Durchläufen zu

$$x_n = x_0 \cos n\mathbf{q} \text{ und } y_n = x_0 \sin n\mathbf{q}$$

Gleichung 4

berechnet. Der Laserstrahl erzeugt dann ein kreisförmiges Spotmuster mit dem Radius $r = x_0$, was zur optimalen Ausnutzung der Spiegeloberfläche bzw. zur Maximierung der Zelldurchläufe Voraussetzung ist. In diesem Fall sind die Spots auch äquidistant.

Aus den geometrischen Randbedingungen des flugfähigen Messinstrumentes ergibt sich eine Länge von 70 cm und ein Durchmesser von ca. 25 cm für das Gesamtsystem, sowie eine Basislänge der Herriott-Zelle von ca. 500 mm. Es wird eine möglichst lange Absorptionsstrecke gewünscht, woraus mit Rücksicht auf praktikable Spotabstände eine Anzahl von $N=140$ Durchläufen des Strahls durch die Zelle resultiert. Der Winkel \mathbf{b} zwischen zwei geometrisch benachbarten (d.h. nicht entlang des optischen Weges) Spots auf einem Spiegel ist durch

$$\mathbf{b} = \frac{4p}{N+1}$$

Gleichung 5

gegeben. Der Winkel \mathbf{q} zwischen zwei aufeinander folgenden Spots auf einem Spiegel ist, wie bereits erläutert, durch den Resonatorparameter \mathbf{g} bestimmt. Für äquidistante Spots muss \mathbf{q} ein ganzzahliges Vielfaches von \mathbf{b} sein. Daraus folgt $\mathbf{q} = J \cdot \mathbf{b}$. Der Parameter J kennzeichnet die Anzahl der kompletten Umläufe, bevor der Laserstrahl aus dem Resonator austritt. Die Anzahl von eindeutigen Werte des Winkels \mathbf{q} wird durch die ganzzahligen Werte von J bestimmt, die keine Teiler von $(N+1)$ im Bereich von

$$1 \leq J \leq (N+1)/4$$

Gleichung 6

sind.

Für einen symmetrischen Resonator, der aus zwei Spiegeln gleicher Brennweite aufgebaut ist, erhält man die doppelte Anzahl an erlaubten \mathbf{g} -Parametern für jeden zulässigen Winkel \mathbf{q} .

$$g = \pm \left[\frac{\cos(J \cdot \mathbf{b}) + 1}{2} \right]^{0,5}$$

Gleichung 7

Man kann J und N zu Familien zusammenfassen [McMannus et al., 1990], wobei die Familie

$$N = 4J \pm 4$$

Gleichung 8

den größten Gangunterschied zwischen dem ausgekoppelten Strahl und den Nachbarspots besitzt, was die schmalsten Fringes bei einem teilweisen Überlapp der Strahlen zur Folge hat. Diese Spotmuster sind folglich zu bevorzugen. Aus Gleichung 8 und Gleichung 6 folgt für ein gegebenes N von 140 ein J von 34. Durch Verknüpfen von Gleichung 5 und Gleichung 7 erhält man einen Krümmungsradius für die sphärischen Spiegel von 529,48 mm.

Ein anderer Ansatz geht davon aus, dass jedem Spot ein Index J und eine Winkelkoordinate Ψ zugeordnet wird (Einkoppeln $J=0$, Auskoppeln $J=N$ mit $\Psi=0$). Nach jeder Reflexion ändert sich Ψ um einen festen Betrag θ . Nach *Herriott et al.* ist $\cos q = (1 - L/R)$ ($= g$). Da der Wert von R näherungsweise L entspricht, wird der Wert von $\cos \theta$ klein, bzw. θ nähert sich $\pi/2$. Der Spiegelabstand wird so gewählt, dass der Laserstrahl den Resonator nach N Durchläufen wieder verlässt, woraus sich die Bedingung ergibt, dass θ der Wiedereintrittsbedingung $Nq_R = \pm 2pM$ ($N, M = \text{integer}$) folgt. Der Wert M gibt hier wieder die Anzahl der kompletten Umläufe des Laserstrahls an, bevor er die Zelle wieder verlässt. Durch Einführung einer alternativen Winkelvariablen $f \equiv q_R - p/2$ wird unter der Näherung das $q \approx p/2$ f klein. Die Wiedereintrittsbedingung kann so zu $f = 2p(M/N - 1/4) = \sin^{-1}(L/R - 1) \approx L/R - 1$ umgeformt werden. Folglich entspricht der Wert von f ungefähr dem auf R normierten Wert der Abweichung des Spiegelabstandes L von dem konfokalen Spiegelabstand R .

Wahl der Spiegelsubstrate

Bei der Auswahl geeigneter Spiegel wurden neben den durch die Aufgabenstellung bestimmten Parametern auch Hersteller- und Kostenfaktoren berücksichtigt. Es wurden von verschiedenen Anbietern Angebote für Zerodur-Spiegelsubstrate eingeholt, deren Preise sich um bis zu einem Faktor 10 unterscheiden.

Diskussion gewichtsreduzierter Spiegel

Es wurden ausführliche Gespräche mit einem der größten Hersteller für weltraumtaugliche Optik geführt, um die Möglichkeit einer Gewichtsreduzierung zu diskutieren. Im Ergebnis zeigte sich, dass eine entsprechende Bearbeitung, wie z.B. das Fräsen einer massenreduzierenden und stabilitätserhaltenden Wabenstruktur in die Spiegelrückseite, nur vor der Politur möglich ist. Dies setzt ein Zurückgreifen auf einen teuren Hersteller, der eine entspr. Bearbeitung anbietet, voraus. Weiter zeigte sich, dass eine maximale Gewichtsreduzierung um nur 50 Prozent möglich ist (das entspricht ca. 280 g pro Spiegel). Aufgrund der hohen Kosten und des vorhandenen Gewichtseinsparungspotentials an anderen Stellen des Spektrometers wurde auf eine gewichtsreduzierende Bearbeitung der Spiegelsubstrate verzichtet.

Auswahl geeigneter Spiegel

Die Auswahl geeigneter Spiegelsubstrate erfolgt nach den beim Hersteller vorhandenen Standardwerkzeugen zur Politur der Substrate, da eine Änderung der Basislänge eine entsprechende Anpassung an die Krümmungsradien der Spiegel ermöglicht. Dadurch werden unnötige Werkzeugkosten beim Hersteller vermieden.

Eine mögliche Brennweite für Zerodursubstrate betrug bei dem günstigsten Hersteller 262 mm. Die äußerste Bohrung zum Ein- und Auskoppeln des Laserstrahls befindet sich 50 mm entfernt von der optischen Achse der Zelle (siehe Bohrschema). Bei einer gewählten Durchlaufzahl von $N=136$ ($M=35$) ergibt sich ein Spotabstand von 4,6 mm, woraus eine Absorptionsstrecke von 74,8 m resultiert. Die Basislänge beträgt 550,5 mm. Aufgrund sphärischer Abberation weichen die effektiven Brennweiten der Spiegel mit steigendem Spiegeldurchmesser jedoch erheblich voneinander ab, was im Prinzip eine jeweils angepasste Basislänge für die Methan- und Wassermessung erfordert. In der Praxis ist dies nicht möglich, da die beiden Strahlengänge zwischen denselben Spiegeln einer Zelle mit fester Basislänge verlaufen. Folglich ist die Auslegung einer Zelle für ein Zweistrahlenspektrometer, das mit separaten Strahlengängen arbeitet, erheblich erschwert, da die Basislänge durch den ersten Strahlengang auf dem äußeren Spotmusterradius festgelegt ist. Die Austrittsposition des zweiten Strahls auf dem kleineren Spotmusterradius weicht von der Eintrittsposition ab, was im ungünstigsten Fall ein Auskoppeln des Laserstrahls aus der Zelle verhindert.

Durch die Wahl eines geeigneten zweiten Spotmusterdurchmessers wird jedoch ein anderes Spotmuster erreicht, bei dem die Ein- und Auskoppelkoordinaten wieder zusammen fallen. Durch Simulation mittels eines speziell für diese Aufgabenstellung entwickelten 3D-Raytracingprogrammes unter LabView[®] wurden die erhaltenen Werte validiert (vgl. Abbildung 7).

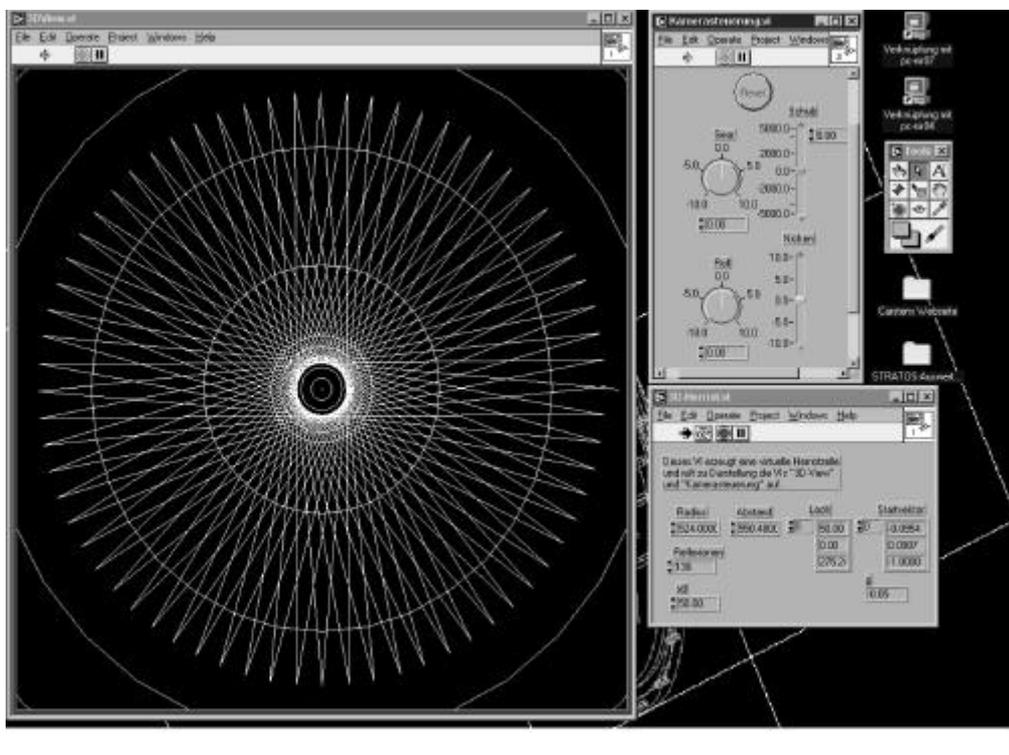


Abbildung 7: Screenshot der Raytracingsoftware

Aufgrund der Ausnutzung der ursprünglich problematischen sphärischen Abberation ergibt sich jetzt durch deren Ausnutzung die Möglichkeit einen Zweistrahl Aufbau zu realisieren, bei dem mit einer Herriott-Zelle zwei verschiedene Absorptionsstrecken erreicht werden. Dadurch kann mit einer Absorptionszelle simultan die Messung von zwei unterschiedlich stark absorbierenden Molekülen erfolgen. So beträgt die Absorptionsstrecke bei Einkoppelung des zweiten Laserstrahls 41 mm entfernt von der optischen Achse 36,3 m (im Vergleich zu 74,8 m für das erste Spotmuster auf dem 50 mm Radius).

Zusätzlich ist durch das Anbringen einer dritten Bohrung 32 mm von der optischen Achse entfernt die Realisierung zweier alternativer Strahlengangpaare möglich. Bei diesem kleinen Radius ist der Einfluss der sphärischen Abberation jedoch so gering, dass sich gleiche Durchlaufzahlen mit nahezu identischen Absorptionsstrecken ergeben.

Für den Ein-/Auskoppelspiegel ergeben sich hieraus folgende Daten:

Substratdurchmesser 127 mm, Krümmungsradius 524 mm, Dicke 18 mm, Masse ca. 577 g, drei Kegelbohrungen mit je 4 mm Durchmesser zur Einkoppelung der Laser.

r [mm] (Bohrung)	N	M	Abs.strecke [m]	Basislänge [mm]	Spotabstand [mm]
50	136	35	74,8	550,5	4,6
41	66	17	36,3	550,5	7,8
41	96	25	53,7	559,8	5,4
36	96	25	53,7	559,8	4,7
41	88	23	49,5	562,8	5,8
36	88	23	49,5	562,8	5,1

Tabelle 4: Gegenüberstellung der möglichen Absorptionslängen mit dem beschriebenen Zellenaufbau. Zwei zusammengehörende Absorptionswege für die Methan- und Wassermessung sind untereinander farblich unterlegt. Der Strahlengang auf dem jeweils äußeren Radius wird für die Methanmessung verwendet.

Die Auswahl des Spotmusters mit einer Durchlaufzahl von N=136 und einer Umlaufzahl von M=35 bewirkt, dass die der Ein-/Auskoppelbohrung benachbarten Spots den größtmöglichen Wegunterschied zum auskoppelnden Strahl aufweisen (35,5 m für N=66 und 36,6 m für N=70). Dadurch erreicht man, dass auftretende Fringes eine minimale FSR (free spectral range) von $\Delta\nu \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ aufweisen.

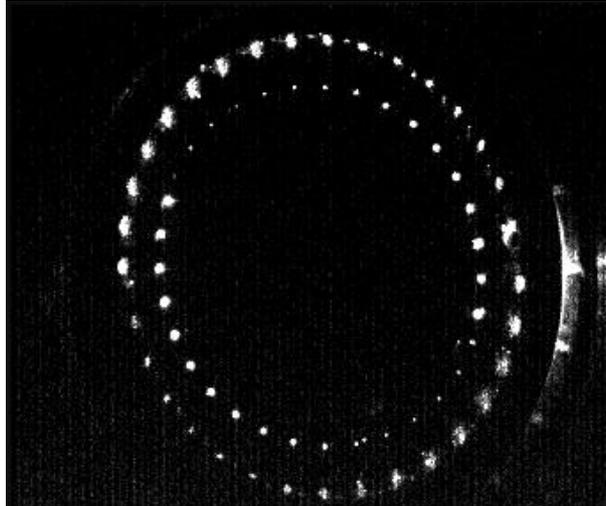


Abbildung 8: Spotmuster auf dem Einkoppelspiegel (mit einem HeNe-Laser aufgenommen)

Abbildung 8 zeigt die zuvor berechneten Spotmuster mit einem Durchmesser von 100 mm (Methan) bzw. 82 mm (Wasser) auf dem 5“-Spiegel. Das Bild wurde mit einer CCD-Kamera mit Hilfe eines HeNe-Lasers aufgenommen. Die Zerodur[®]-Substrate wurden mit Gold gecoatet. Auf eine Schutzschicht wurde zugunsten höherer Reflektivität verzichtet.

8.2.2. Optisches Layout

Die Positionierung der einzelnen optischen und feinmechanischen Komponenten des Spektrometers basiert auf der Berechnung des Strahlenganges der beiden Laserstrahlen. Im einzelnen sind auf der Basisplatte für jede zu messende Spezies folgende Komponenten angebracht (ausgehend vom Laser):

- Laserkopf mit Kollimationsoptik (Nr. **1**)
- Strahlteilerhalterung mit Justagemöglichkeit (Nr. **2**)
- zwei Umlenkspiegel zum I_0 -Detektor und zum $I_{ref.}$ -Detektor (line-lock) (Nr. **3** und **4**)
- zwei Detektoren (I_0 , $I_{ref.}$) (Nr. **5** und **6**)
- eine Line-lock-Zelle (Nr. **7**)
- ein Umlenkspiegel (Nr. **8**)
- ein kombinierten Ein-/Auskoppelspiegel (Nr. **9**)
- optionale Ein-/Auskoppelfenster (Nr. **10**)
- ein Umlenkspiegel zum I-Detektor (Nr. **11**)
- ein I-Detektor zur Messung des Absorptionssignals (Nr. **12**).

In der folgenden Graphik wird maßstabsgetreu der Strahlengang des TDL-Spektrometers auf der Basisplatte und die daraus berechneten Positionen der optischen Elemente wiedergegeben. Aufgrund der gegebenen Randparameter, wie z.B. ein möglichst geringes Gewicht und geringe Abmessungen, wurde der Aufbau enorm erschwert, da sich beim Aufbau eines Prototypen herausgestellt hatte, dass nur bei den Laserköpfen auf kommerzielle Produkte zurück gegriffen werden kann.

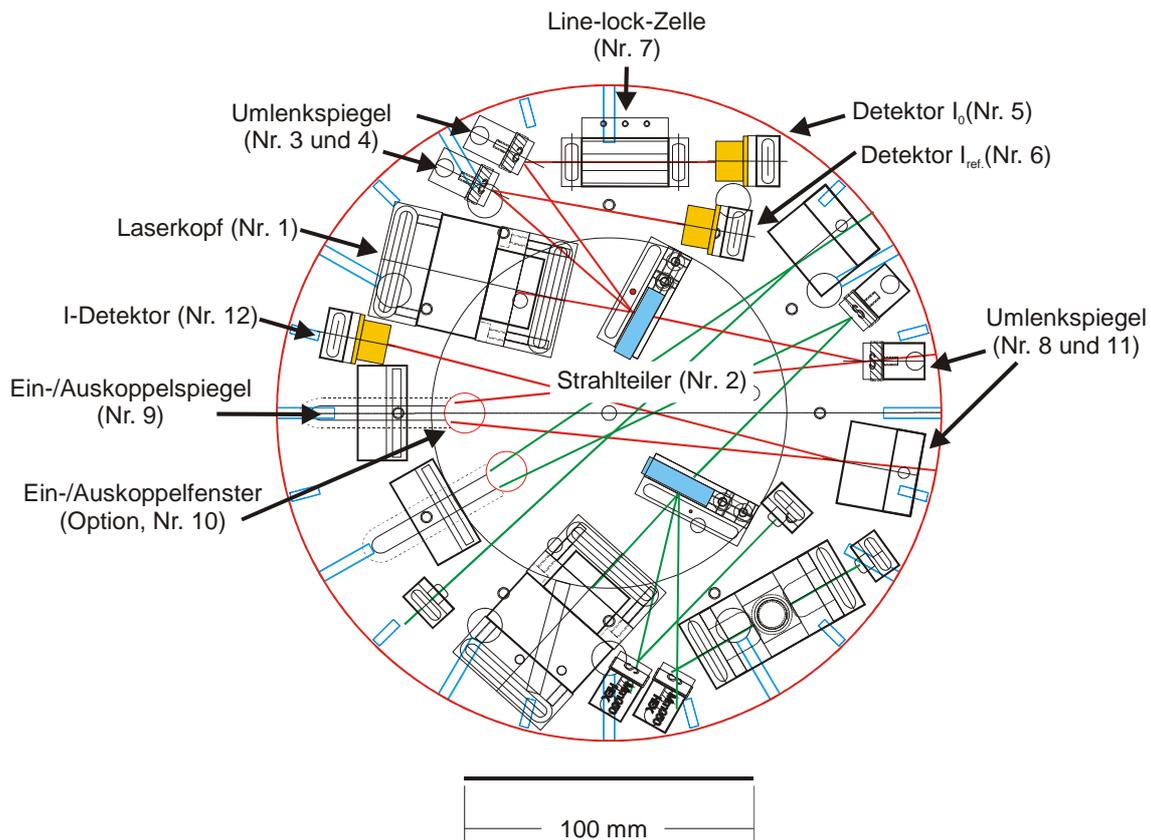


Abbildung 9: Layout im „optischen Kopf“

Der Laserstrahl durchläuft ausgehend von der Kollimationsoptik (Nr. 1) einen gekielten Strahlteiler (Nr. 2), trifft über einen Umlenkspiegel (Nr. 8) auf den Einkoppelspiegel (Nr. 9) und wird von dort in die Multireflexionszelle eingekoppelt. Nach 136 (Methan) bzw. 66 Reflexionen (Wasser) wird der Laserstrahl wieder ausgekoppelt und durch einen weiteren Umlenkspiegel (Nr. 11) auf den I-Detektor (Nr. 12), der das Absorptionssignal der stratosphärischen Spurengase detektiert, gelenkt.

Die beiden Teilreflexe des gekielten Strahlteilers werden über zwei separate Umlenkspiegel (Nr. 3 und 4) auf den I_0 -Detektor (Nr. 5), sowie nach Durchlaufen der Line-lock-Zelle (Nr. 7) auf den I_{ref} -Detektor (Nr. 6) gelenkt.

9. Konstruktion der feinmechanischen Komponenten

Die Konstruktion der feinmechanischen Komponenten erfolgte nach der Entwicklung und dem Test eines Prototypen, auf den hier nicht näher eingegangen werden soll (vgl. 3. Zwischenbericht). Die mit diesem gemachten Erfahrungen sind direkt in den Bau der finalen Version eingeflossen.

Der mechanische Teil des Spektrometers besteht aus folgenden Baugruppen:

1. Der „optische Kopf“

Der sog. „optische Kopf“ dient der Aufnahme der beiden Diodenlaser, der Strahlformungsoptiken, der Umlenkspiegel, Strahlteiler, der Line-lock-Zellen, sowie der Detektoren. Er stellt als größte Baugruppe ein tragendes Element des Spektrometers dar. An den optischen Kopf schließt sich direkt die Multireflexionszelle an.

2. Die Multireflexionszelle

Die Konstruktion der Multirefleksionszelle, bzw. der mechanischen Bauteile zur Stabilisierung dieser, musste unter Berücksichtigung der beschriebenen Anforderungen, insbesondere der zu erwartenden Temperaturunterschiede erfolgen.

3. Sonst. optische Komponenten

Zu den „sonstigen Komponenten“ gehören Halterungen für Umlenkspiegel, Strahlteiler, Detektoren, Kollimatorgehäuse und Line-locking-Zellen.

9.1. Konstruktion der Basisplatte

Die Basisplatte stellt die Grundlage des optischen Kopfes dar. Sie besteht wie die meisten tragenden Bauteile des TDL-Spektrometers aus einer Aluminiumlegierung. Auf der Seite der Multirefleksionszelle wurde die Aufnahme des Herriott-Einkoppelspiegels direkt in die Basisplatte integriert. Unter dem Spiegel befindet sich eine in die Basisplatte eingelassene Heizplatte, die über ein Thermocoax-Heizelement beheizt wird. Um den thermischen Kontakt zur Basisplatte zu minimieren, wird diese Heizplatte durch Edelstahlfedern gegen die Rückseite des Langwegzellenspiegels gedrückt und zentriert. Zusammen mit einem in der Spiegelhalterung befestigten Pt 1000-Element lässt sich über einen PID-Regler die Spiegeltemperatur regeln, so dass eine Kondensation von Wasser auf den Spiegel während des Fluges verhindert wird.

Die hintere Herriottspiegelhalterung wird auf Rohren aus PERNIFER-36[®] befestigt um eine Änderung der Basislänge durch thermisch bedingte Längenänderungen zu minimieren. Diese werden auf der Einkoppelseite durch angeschweißte Gewindeenden aus PERNIFER-36[®] mit der Basisplatte verschraubt und durch Stiftschrauben gesichert.

Auf der Komponentenseite der Basisplatte wurde an den beiden Öffnungen zum Ein-/Auskoppeln der Laserstrahlen T-Nuten in die Basisplatte gefräst, in denen die Halterungen der Ein-/Auskoppelspiegel geführt werden. Auf diese Art ist eine präzise Justage und zugleich stabile Verbindung mit der Basisplatte möglich. Alle anderen optische Komponenten werden mit Edelstahlschrauben an der berechneten Position befestigt. Um eine optionale Befüllung des optischen Kopfes mit trockenem Schutzgas zu ermöglichen, können in die Ein-/Auskoppelöffnungen der Basisplatte Fenster versenkt eingeschraubt werden.

9.2. Buchsenflansch

Die elektrische Verbindung des Spektrometers mit der externen Steuerelektronik und Datenerfassung stellte sich als aufwendig heraus. Insgesamt mussten für zwei Laser mit Temperaturkontrolle, sechs Signaldetektoren (teilweise mit Temperaturkontrolle), die Grundplatten-, Wasser-line-lock-Zellen- und Spiegelheizungen, sowie diverser Temperaturfühler ca. 60 Leitungen auf engstem Raum verlegt werden. Die Verbindung der Zuleitungen mit dem Spektrometer wurde als Steckverbindung ausgelegt, um die Leitungslängen einfach auf verschiedene Gondeln anpassen und damit immer möglichst kurz halten zu können. Zum Anschluss der Laser, Detektoren, sowie der Heizungen für den optischen Kopf und die Wasser-line-lock-Zelle wurden mehrpolige Buchsen (Lemo[®]) radial an den einen Flansch auf der Grundplatte angebracht. Dieser Flansch wurde mit einer O-Ring-Dichtung auf der Grundplatte verschraubt, ein zweiter O-Ring auf der anderen Flanschseite dient als Dichtung zum Spektrometerdeckel.

Die Herriottzellenspiegelheizungen und die dazugehörigen Temperaturfühler wurden über Einbaubuchsen in der hinteren Herriottspiegelhalterung kontaktiert. Alle Leitungen sind mit Silikon oder Teflon isoliert.

9.3. Instrumentendeckel

Der Instrumentendeckel setzt auf dem Flanschring auf und wird gegenüber diesem durch einen O-Ring abgedichtet. In den Deckel wurde ein Ventil zum optionalen Befüllen mit Schutzgas eingelassen. Der Deckel wurde aus einem Stück gefertigt.

9.4. Strahlteilerhalterung

Der Strahlteiler hat die Aufgabe den Laserstrahl vor Eintritt in die Messzelle in drei Strahlen aufzuteilen. Durch Verwendung eines keilten Fensters entstehen beim Durchgang des Laserstrahls durch nur ein optisches Element zwei Teilreflexe, die sich separieren lassen. Dadurch lässt sich ein zusätzliches optisches Element, das zu zusätzlichen optischen Störeffekten führen kann, und damit auch Platz und Gewicht einsparen. Die beiden Nebenreflexe werden zur Messung des I_0 -Signals sowie zum „line-locking“ verwendet (s.o.). Da der Keilwinkel zur Verhinderung eines zu großen Versatzes des Hauptstrahles gering gehalten wurde, ist die Separation der Teilreflexes gering. Ihr Abstand hat nur die Mindestgröße um noch durch zwei 0,5°-Umlenkspiegel einzeln umgelenkt werden zu können.

Der Strahlteiler besitzt aufgrund der Keilung keine Symmetrieachse. Dies hat zur Folge, dass eine Drehung des Strahlteilers um die optische Achse des Hauptstrahles die Richtung der beiden Teilreflexe ändert. Aus diesem Grund wurde eine extrem leichte und platzsparende Halterung konstruiert, die eine Drehung des eingebauten Strahlteilers und damit eine Justage der Teilreflexhöhe zulässt.

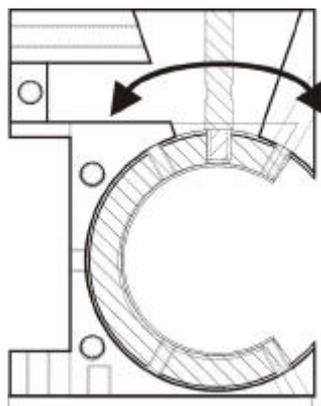


Abbildung 10: Strahlteilerhalterung

Durch Verstellen einer Feingewindeschraube, die gegen eine Edelstahlfeder wirkt, kann der Strahlteiler im eingebauten Zustand justiert werden. Um den engen Platzverhältnissen im TDLSpektrometer gerecht zu werden, wurde die Größe der Halterung auf ein Minimum reduziert, so dass andere Laserstrahlen unter der Justagevorrichtung durchgeführt werden können.

9.5. Spiegelhalterungen

Beim Aufbau des Prototypen wurden zur Aufnahme der Umlenk- und Einkoppelspiegel kommerzielle Halterungen verwendet. Leider haben sich diese jedoch als zu labil erwiesen, so dass die Gefahr einer Dejustage während des Ballonfluges bestand.

Da keine anderen, geeigneten kommerziellen Optikhalterungen verfügbar waren, wurden Halterungen für 1"- und 0,5"-Spiegel mit Festkörpergelenken konstruiert.

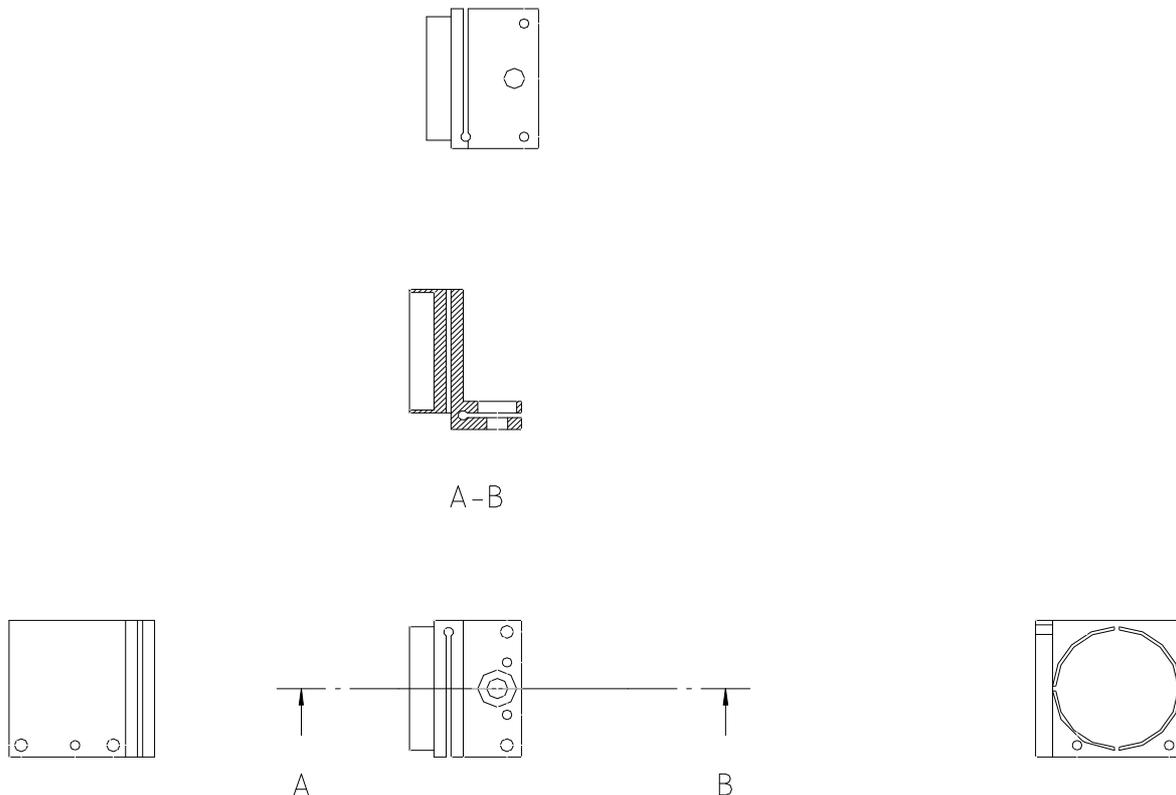


Abbildung 11: Festkörpergelenk

Spiegelaufnahme und Justagegelenke bilden zusammen eine Einheit und sind aus einem Stück gefertigt. Die Einstellung erfolgt durch Schrauben in Zug- bzw. Druckrichtung, so dass auch eine Fixierung im justierten Zustand möglich ist. Die Halterung für 1"-Spiegel lässt sich um zwei Achsen feinjustieren, die Halterung für 0,5"-Optik kann aus geometrischen Gründen um eine Achse feinjustiert, sowie um die Hochachse auf ihrem Sockel gedreht werden. Da die Festkörpergelenke über einen weiten Temperaturbereich möglichst elastisch sein müssen, wurde an Stelle von Aluminium Titan verwendet.

9.6. Befestigung der Herriottspiegel

Die beiden Langwegzellenspiegel stellen den wichtigsten und zugleich auch empfindlichsten Teil des TDL-Spektrometers dar. Aufgrund der zu erwartenden Temperaturunterschiede sind die Spiegelsubstrate aus Zerodur gefertigt, dessen mittlerer Ausdehnungskoeffizient um den Faktor zehn kleiner ist als der geeigneter Metalle und Legierungen ($10^{-7}/K$ im Vergleich zu $10^{-6}/K$ für PERNIFER 36[®]).

Da in dem zu erwartenden Temperaturbereich kein Klebstoff zuverlässig arbeitet, kommt nur eine mechanische Befestigung mittels Überwurfring in Frage, der über den Spiegel geschraubt wird. Um der Gefahr einer Deformation der Spiegeloberfläche bzw. Deformation des Substrates durch eine thermisch bedingte Kontraktion dieses Ringes entgegen zu wirken, wurde die Auflagefläche des Überwurfringes, die mit dem Spiegel in Kontakt steht, segmentiert (s.u.). Bei einer Abkühlung können diese Segmente nachgeben ohne den Spiegel zu deformieren und bei einem Temperaturanstieg wieder zurück federn. Durch diese Art der Befestigung wird das Spiegelsubstrat über einen weiten Temperaturbereich konstant eingespannt und zentriert.

9.7. Line-lock-Zellen

Die beiden Line-lock-Zellen enthalten die zu messenden Spezies Methan und Wasser in so hohen Konzentrationen, dass sie zu einer sehr leicht auswertbaren Absorption führen. Die Signale aus den Line-lock-Zellen werden über die I_{ref} -Detektoren ausgewertet und dienen zur Stabilisierung der Laserwellenlänge.

Da bei den zu erwartenden Temperaturen der Dampfdruck von Wasser zu gering für eine Messung ist, wurde eine Line-lock-Zelle mit Temperaturkontrolle des eingeschlossenen Probevolumens konstruiert. Durch eine Heizfolie kann der Glaskörper, der das Probevolumen beinhaltet beheizt werden.

9.8. Halterung des hinteren Herriottzellenspiegels

Der Halterung des hinteren Multireflexzellenspiegels kommt eine besondere Bedeutung zu, da das Spotmuster der Herriottzelle nur mit ihrer Hilfe durch eine Änderung der Basislänge und ein Verkappen des Spiegels justiert werden kann (wenn man vom Einkoppelwinkel der Laserstrahlen, der auf der Basisplatte bestimmt wird, absieht). Die Spiegelaufnahme besteht aus einer gewichtsoptimierten Aluminiumaufnahme, auf dem der Spiegel durch einen bereits beschriebenen Überwurfring befestigt wird. Diese Aufnahme wird durch Federn gegen Feingewindeschrauben, die in einem Winkel von 120° angeordnet sind, gezogen und kann so um alle Achsen justiert werden. Durch ein gleichzeitiges und gleichsinniges Verstellen der Feingewindeschrauben kann die Basislänge feinjustiert werden.

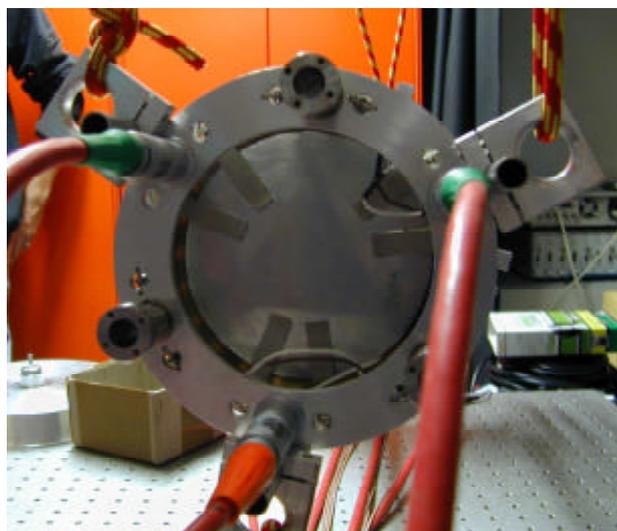


Abbildung 12: hintere Herriott-Spiegelaufnahme mit Spiegelheizung

Auf der Rückseite der Spiegelhalterung ist das Heizelement zu erkennen, das mit sechs Titanfedern zentriert und gegen den Spiegel gedrückt wird.

9.9. Kompensationssystem

Durch die Wahl des Herriott-Zellendesigns für die Multireflexionszelle konnte eine optisch stabile Zelle aufgebaut werden. Die Forderung nach einer langen Absorptionsstrecke bei einem gleichzeitig kompakten Instrumentendesign führt jedoch dazu, dass der Abstand der Laserspots auf den Spiegeln sehr eng beieinander liegen (vgl. Abbildung 8). Daraus folgt, dass die der Einkoppelbohrung benachbarten Spots sehr nah an der Bohrung liegen. Verändert sich die Basislänge der Herriottzelle durch thermisch bedingte Kontraktion, so dreht sich das Spotmuster und die Spots rücken zusammen, bis das Muster kollabiert. Unter ungünstigen Bedingungen wird dann einer der Auskoppelbohrung benachbarten Spots ausgekoppelt. Der letzte Zellendurchlauf hingegen wird nicht oder nur teilweise ausgekoppelt und läuft unkontrolliert weiter in der Multireflexzelle um.

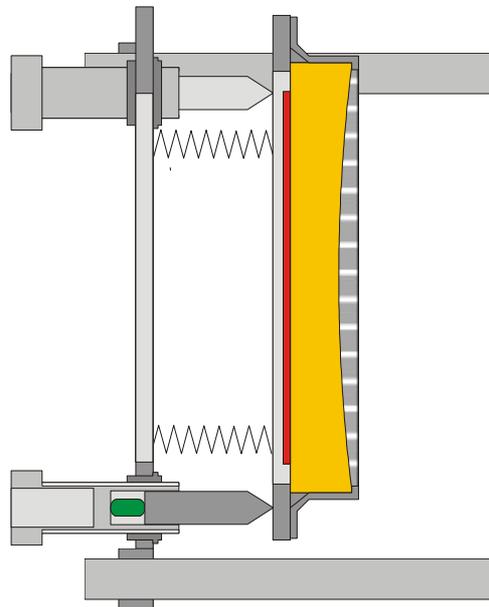


Abbildung 13: Schnitt durch das Kompensationssystem

Es muss daher dafür gesorgt werden, dass sich die Basislänge nur soweit ändert, dass der austretende Laserstrahl ungestört ausgekoppelt werden kann. Trotz Verwendung eines Materials, das einen sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist, kann dies bei extrem tiefen Temperaturen nicht sicher gestellt werden. Es wurde daher ein passives Kompensationssystem entwickelt (vgl. Abbildung 13), das in die Lagerung des hinteren Herriottspiegel integriert wurde:

In die Feingewindeschrauben (PERNIFER 36[®]) sind Aluminiumstößel integriert, auf denen der Spiegel gelagert ist. Die Länge der Stößel wurde entsprechend dem Verhältnis der Ausdehnungskoeffizienten PERNIFER 36[®]/Aluminium gewählt. Ziehen sich die Rohre aufgrund von Abkühlung in $-x$ -Richtung zusammen, so ziehen sich die Aluminiumstößel um den gleichen Betrag in $+x$ -Richtung zusammen und kompensieren damit die Basislängenänderung. Dieses System hat sich in der Praxis als außerordentlich zuverlässig erwiesen.

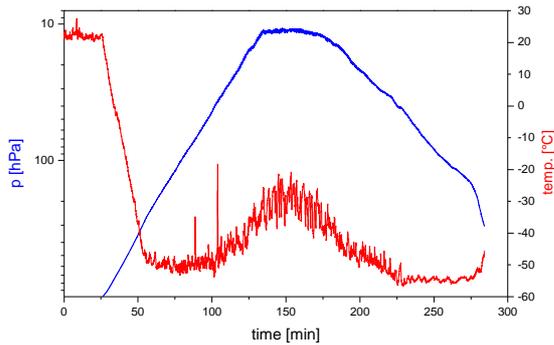


Abbildung 15: Druck- und Temperaturverlauf

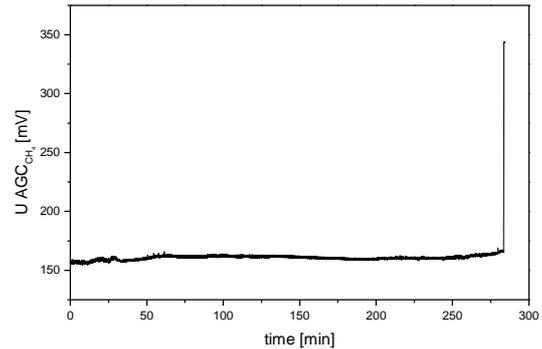


Abbildung 14: AGC-Steuersignal

Auf Abbildung 14 ist der Verlauf des AGC-Verstärkersteuersignals des Methansignaldetektors während des Ballonfluges dargestellt. Der mögliche Wertebereich liegt zwischen 1,5 V und 3,6 V. Der konstante Verlauf bis zur Landung zeigt, dass sich die Lichtintensität auf dem Signaldetektor nicht geändert hat, was ein Indiz für ein funktionierendes Kompensationssystem über den gesamten Temperaturbereich (vgl. Abbildung 15) ist.

10. Zusammenbau des Spektrometers

Die Spektrometerbaugruppen wurden montiert und mit Hilfe der unten beschriebenen Bildverarbeitungssoftware justiert.

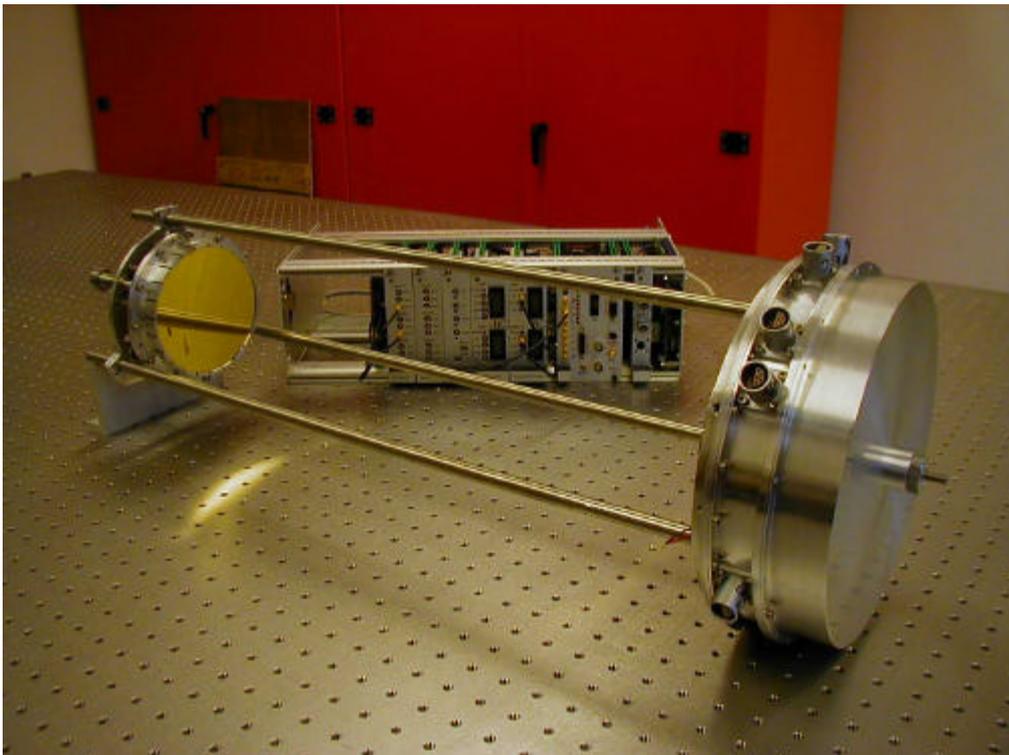


Abbildung 16: TDL-Spektrometer mit Flugelektronik

Auf Abbildung 16 ist das fertige TDL-Ballonspektrometer einschließlich der kompletten Elektronik gezeigt (es fehlen das Batteriemodul und die Versorgungskabel). Der optisch-mechanische Teil des Spektrometers wiegt nur 6,6 kg.

11. Temperatur und Drucktest

Da sich die zu erwartende thermische Belastung der Spektrometerkomponenten während des Ballonfluges über einen weiten Temperaturbereich erstrecken, wurde das Instrument vor der Messkampagne ausgiebig getestet. Es spielen dabei zwei gegensätzlich wirkende Effekte eine Rolle: Das Instrument durchquert während der Start- und Abstiegsphase Zonen extrem kalter Luft (Tropopause), in der je nach Jahreszeit und Ort Temperaturen von bis zu -90 °C erreicht werden können.



Abbildung 17: Drucktest

Aufgrund des abnehmenden Luftdrucks kann die vom Instrument erzeugte Eigenwärme (Diodenlaser, Datenerfassung, Elektronik), sowie die Erwärmung durch Sonneneinstrahlung nicht mehr im ausreichendem Maß abgeführt werden.

Da sich diese beiden Effekte und deren Einfluss auf das Spektrometer nur relativ grob berechnen lassen, wurde ein Funktionstest bei Normaldruck und einer Temperatur von -25 °C , sowie ein Unterdrucktest bei Raumtemperatur durchgeführt. Insbesondere das Temperaturverhalten der beiden Lasergehäuse ist von Bedeutung, da dieses einen direkten Einfluss auf die Wellenlängenstabilität hat. Sowohl beim Unterdruck- als auch beim Temperaturtest stellte sich heraus, dass die Lasertemperaturen auf ihren Sollwerten gehalten werden konnten.

12. Bildverarbeitungssoftware zur Justage und Validierung der Herriottzelle

Zur korrekten Bewertung der gemessenen Absorptionssignale ist eine genaue Kenntnis der Absorptionsstrecke notwendig. Die Länge der Absorptionsstrecke wird durch die Anzahl der Laserstrahldurchläufe durch die Multireflexionszelle und damit durch das Spotmuster auf den Spiegeln

bestimmt. Da beide Parameter mit einer Änderung der Basislänge stark variieren, ist eine exakte Justage des Spiegelabstandes der Herriottzelle zwingend erforderlich.

Bei jeder Reflexion des Lasers auf der Spiegeloberfläche tritt ein Verlust der Strahlintensität auf. Bei einer Reflektivität der Oberfläche von 98 % verbleiben nach 136 Reflexen (für z.B. die Methanmesslinie) nur noch $98^{136} \% = 6 \%$ der Lichtintensität zur Detektion des Signals. Aufgrund dieser Abschwächung lassen sich die Justierlaserspots höherer Umlaufzahlen auf den Spiegeln nicht mehr mit dem Auge erkennen und sich die Herriottzelle nicht mehr zuverlässig justieren. Auch mit Hilfe von CCD-Kameras ist durch den eingeschränkten Dynamikbereich keine Verfolgung aller Reflexe mehr möglich.

Um dennoch eine korrekte Justage der Herriottzelle zu ermöglichen, wurde eine Bildverarbeitungssoftware entwickelt, die die genaue Anzahl der Laserspots und damit der Langwegzellendurchläufe des Lasers errechnet. Das Spotmuster wird mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgenommen.

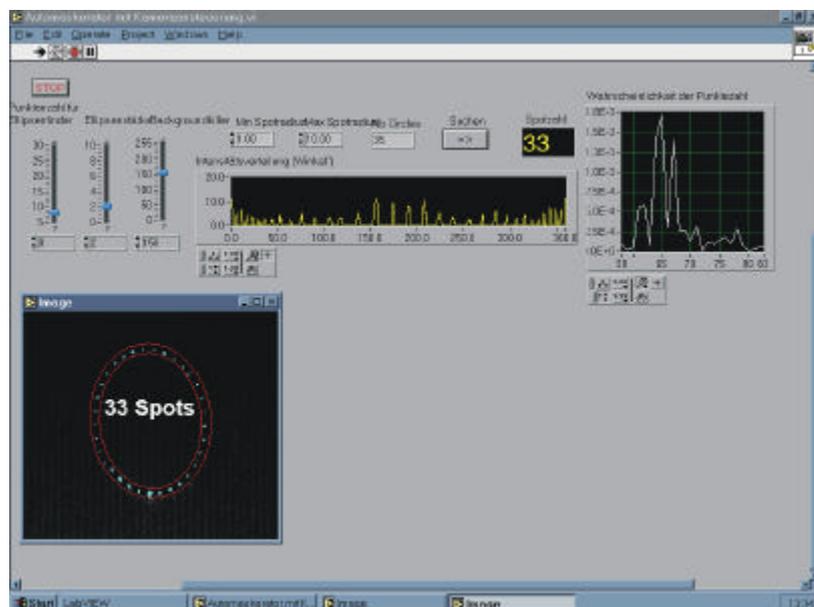


Abbildung 18: Screenshot der Bildverarbeitungssoftware

Das Programm basiert darauf, dass alle Lichtreflexe bei richtiger Justage in gleichmäßigem Winkelabstand auf einem Vollkreis zu liegen kommen. Bedingt sowohl durch die schräge Abbildung mit einer seitlich beobachtenden CCD-Kamera als auch durch leichte Dejustage erscheint der Reflexkreis im Bild als Ellipse. Durch Auswahl der hellsten, eindeutig erkennbaren Reflexe wird in einem ersten Schritt die Form der Ellipse bestimmt und eine Bildmaske errechnet, um die weitere Bildverarbeitung auf den relevanten Bereich einzuschränken und Störungen durch Staub und andere Bildteile weitgehend zu unterdrücken. Nach einer Anpassung des Kontrasts werden zusammenhängende Bildteile durch eine Konturerkennung klassifiziert und ihre Mittenpositionen bestimmt. Dabei werden neben einem Großteil tatsächlicher Reflexe auch Störungen markiert. Anhand der bestimmten Ellipsenform werden die errechneten Reflexpositionen auf einen Idealkreis transformiert und in Winkelpositionen umgerechnet. Durch eine Fourieranalyse kann dann auf den wahrscheinlichsten Winkelabstand bzw. die wahrscheinlichste Reflexzahl geschlossen werden. Das Verfahren erwies sich in der Praxis als sehr zuverlässig.

Mit Hilfe dieser Software war es möglich, die beiden errechneten Spotmuster für die Methan- und Wassermessungen und damit auch die Herriottzellenparameter (Spiegelbrennweite, Basislänge und Position der Ein-/Auskoppelbohrungen) zu validieren. Auf Abbildung 8 kann man die beiden Spotmuster der Laser erkennen. Der äußere der beiden Spotmusterkreise wird durch 68 Reflexe des „Methanlasers“, der innere Spotmusterkreis durch 33 Reflexe des „Wassermesslasers“ gebildet.

Vom äußeren Methanspotmuster sind nicht alle Spots zu sehen. Besonders die zum zweiten Umlauf gehörenden Spots sind nur teilweise sichtbar, was durch die ungleichmäßige Verteilung der sichtbaren Reflexe deutlich wird. Durch die entwickelte Software ist es nun erstmals möglich eine Herriottzelle auch mit großen Umlaufzahlen elegant und zuverlässig zu justieren.

13. Aufbau einer Multireflexionszelle vom White-Typ

In der ersten Projektphase wurde am IUP Heidelberg eine Multireflexionszelle vom White-Typ mit einer Basislänge von 2 Metern entwickelt. Diese war u.a. für die Kalibration des TDL-Spektrometers bzw. die genaue Messung von Linienstärken und -profilen vorgesehen.

Die Optik der Zelle besteht aus einem sphärischen so genannten Feldspiegel (100 x 100 mm) am vorderen, sowie zwei Rückspiegeln (Durchmesser 80 mm) am hinteren Ende der Zelle. Außerdem enthält die Baugruppe des vorderen Endes drei Suprasil-Quarzprismen mit speziell optimierten Kantenwinkeln, um die Durchlaufzahl der Zelle zusätzlich zu vervielfachen.

Die Pläne für die Zellenstruktur, insbesondere die Kantenwinkel der drei Prismen, wurden mit Hilfe des unten erwähnten Simulationsprogramms weiter optimiert, um eine maximale Transmission zu erreichen. Außerdem wurde der mechanische und optische Aufbau einer Ein- und Auskoppeloptik entwickelt. Die Zellenstruktur kann zudem in ein Glasrohr eingebracht werden, um Messungen unter vermindertem Luftdruck oder bei speziellen Gasatmosphären (z.B. Kalibriergasen) vor zu nehmen.

Die optischen Baugruppen der White-Zelle sind in Abb. A1-A5 im Anhang dargestellt.

13.1. Simulationsprogramme für White- und Herriott-Zellen

Es wurden zwei Programme in Visual Basic entwickelt, um den Strahlengang von Multireflexionszellen vom White- bzw. Herriott-Typ zu berechnen. Beide Programme verwenden einen echten geometrischen Raytracing-Algorithmus, so dass auch Aberrationen, wie z.B. Abweichungen durch sphärische Aberration bei der Herriott-Zelle, korrekt simuliert werden können.

Das Programm für Herriott-Zellen verfügt über folgende Möglichkeiten:

- Berechnung und grafische Anzeige der Spotpositionen auf vorderem und hinterem Spiegel für eine vorgegebene Zellgeometrie (Krümmungsradius der Spiegel R , Basislänge b), Strahleinkoppelposition (x_0, y_0, z_0) und Steigung des eingekoppelten Strahles (x_0', y_0') .
- Berechnung (Design) der notwendigen Zellengeometrie und der Strahleinkopplung für eine vorgegebene Durchlaufzahl N und Umlaufzahl M , mit Korrektur von sphärischer Aberration und effektiver Zellenlänge
- Interaktive Simulation der Auswirkungen von Geometrieabweichungen der Zelle (Spiegelverkipfung bzw. Translation, Änderung der Zellenlänge)
- Auswahl geeigneter Zahlenpaare (N, M) mit bezüglich Interferenzringes günstigen Eigenschaften (N gerade, $N=4M\pm 4$, $N/2$ und M teilerfremd)

- Berechnung der Entwicklung der Spotgröße auf den Spiegeln in Abhängigkeit von der Fokussierung des Strahles bei Einkopplung, nach den Prinzipien der Gaußschen Strahloptik. Diese Berechnung ist relevant für die Abschätzung der Stärke von Interferenzfringes und erlaubt evtl., diese durch eine geeignete Art der Fokussierung zu minimieren.

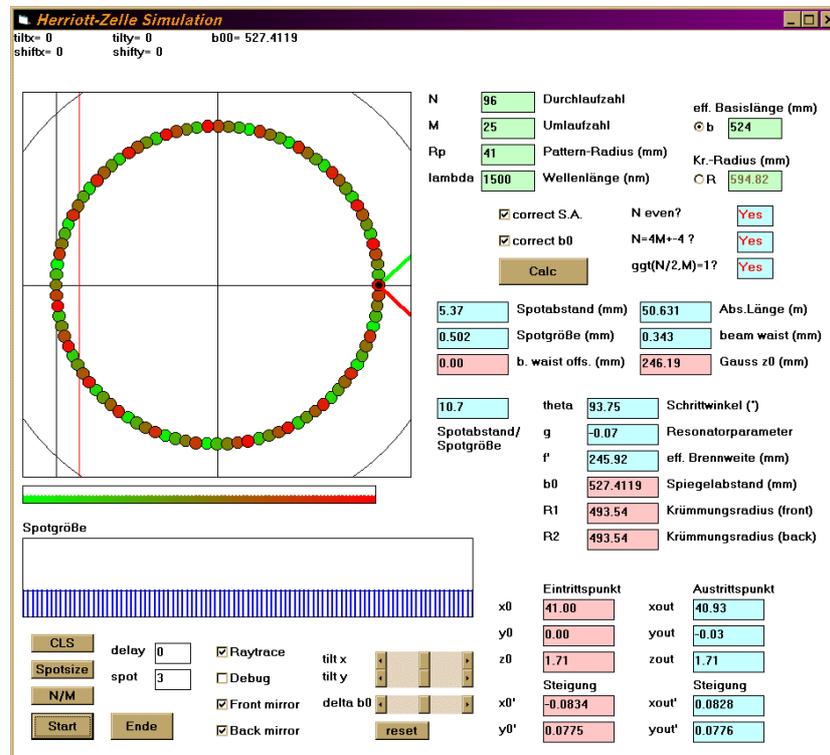


Abbildung 19: „Screenshot“ der Bildschirmanzeige des Programms. Im vorliegenden Fall sind die Daten für eine Herriott-Zelle mit N=96 Durchläufen angezeigt.

14. Aufbau des Bordrechnersystems

Das Bordrechnersystem dient der Aufnahme aller Messdaten des Systems, die zunächst in analoger Form vorliegen, der Vorverarbeitung und der Formatierung der Daten für die Telemetrieübertragung sowie die Datenspeicherung an Bord. Außerdem übernimmt der Bordrechner zum Teil die Steuerung von Systemkomponenten, z.T. von Heizelementen zur Temperaturstabilisierung.

Der Bordrechner wurde aus PC104-Industriekomponenten zusammen gestellt, wobei die CPU-Kühlung der Rechnerkarte (im Original ein Miniatur-Kühler mit Ventilator) durch ein eigenes, ausschließlich auf Wärmeleitung basierendes System ersetzt wurde, um die Rechnerkarte für den Einsatz bei niedrigem Luftdruck tauglich zu machen.

Als Betriebssystem wird ein Linux-System mit Real-Time-Kernel (Version 2.0.37.RT.1.1) eingesetzt. Dabei mussten das Dateisystem und die Dienstprogramme (Skripte) in größerem Umfang modifiziert werden, um sie an den verwendeten Rechner und die Anforderungen anzupassen.

Dabei konnte auch erreicht werden, dass der Rechner an ein normales Netzwerk (LAN) angeschlossen werden kann, was die Bedienung und Datenübertragung im Rahmen der Programmierung und der Flugvorbereitungen am Boden, sowie das Auslesen der Daten nach dem Flug wesentlich erleichtert.

Der Rechner enthält außerdem ein GPS-Navigationsmodul sowie ein Elektronikmodul zur Aufbereitung von Sensorsignalen.

14.1. Anforderungen an das Bordrechnersystem

Das Bordrechnersystem muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Simultane Datenaufnahme von TDL-Spektren auf bis zu 8 Kanälen, mit 16 Bit Auflösung und möglichst hoher Abtastrate, um eine möglichst gute Unterdrückung von mechanischen Störungen (Schwingungen der Zellenstruktur) zu erreichen
- Mittelung der Spektren
- Aufnahme von max. 32 Analogkanälen an Sensordaten für Lufttemperatur, -Druck und Systemüberwachung. Hierzu zählen z.B. interne Temperaturen des Systems und Betriebsspannungen.
- Steuerung von mehreren Heizelementen, z.T. als Proportionalsteuerung über PWM (Pulsweitenmodulation)
- Aufnahme von Positionsdaten vom GPS-System (Satellitennavigation)
- Telemetrikommunikation über zwei serielle Schnittstellen mit unterschiedlicher Baudrate
- Speicherung der Messdaten an Bord für den Fall eines Ausfalls der Telemetrie, d.h. es muss ausreichend Speicherkapazität für die gesamten Messdaten eines Fluges vorhanden sein.
- Alle Aufgaben müssen parallel zueinander und in Echtzeit koordiniert ablaufen.
- Der niedrige Luftdruck (bis 3 mbar) und die niedrige Außentemperatur bei den Ballonflügen stellen besondere Anforderungen an die Temperaturkontrolle der Elektronik, da die Kühlung durch Luftkonvektion größtenteils wegfällt. Die Elektronik muss daher durchgehend so ausgelegt sein, dass allein Wärmeleitung und Strahlungskühlung ausreichen, um eine Überhitzung der Bauteile zu verhindern.

14.1.1. Beschreibung des Systems

Hardware

Das Bordrechnersystem wurde weitestgehend miniaturisiert und hat die Form eines Standardeinschubs für ein Elektronickrack (Höhe 3 HE = ca. 135 mm, Tiefe ca. 160 mm, Breite 14 TE = 71 mm). Daher kann er zusammen mit der am IUP Bremen gebauten TDL-Auswerteelektronik im selben Rack Platz finden, so dass Abmessungen und Gewicht der Elektronikeinheit minimiert werden.

Das Bordrechnermodul enthält folgende Komponenten:

- Rechner: Typ Seco M411, PC/104-Format, Prozessor AMD 5x86 mit max. 133 MHz Taktfrequenz und 8 MB Arbeitsspeicher
- Massenspeicher: IDE-Flashdisk Typ Silicon Tech SLFLD25-224, 2.5"-Format, Kapazität 224 MB
- ADC-Karte für TDL-Daten: Typ Analogic AIM16-1/104, PC/104-Format, Auflösung 16 Bit, 16 Kanäle (davon max. 8 benutzt), max. Summenabtastrate 100 kHz. Wichtig für diese Anwendung ist, dass die Karte in der Lage ist, mehrere Kanäle im sog. Burst-Mode (quasi-simultan) ohne zusätzliche Wartezeit aufzunehmen.
- ADC-Karte für Sensordaten: Typ Diamond DMM-32, PC/104-Format, Auflösung 16 Bit, 32 Kanäle
- GPS-Modul Rockwell/Conexant Jupiter, 12 Kanäle, externe Aktivantenne. Dieses Modul hat sich besonders für den Balloneinsatz und ähnliche Anwendungen bewährt.
- Signalaufbereitungsplatine (s. Anhang 4): Eigenbau, zur Umwandlung der Signale von Temperatur- und Drucksensoren in Spannungssignale, die von der ADC-Karte weiterverarbeitet werden können. Die Platine enthält außerdem einen RS232-Pegelwandler für das GPS-Modul und einen Spannungswandler zur Versorgung der Drucksensoren.

Thermische Auslegung

Die gesamte Bordelektronik ist in einem Standard-Elektronik-Rack mit den Abmessungen 442 x 132 x 245 mm (B x H x T) untergebracht. Dieses soll bei Außentemperaturen zwischen -50°C und -100°C möglichst auf einer Temperatur zwischen 0°C und 40°C gehalten werden. Es wird daher mit einer Isolierschicht von einigen Zentimetern Hartschaum (Styrodur C) umschlossen. Die Dicke der Isolierung wird dabei so gewählt, dass der Wärmeverlust größtenteils durch die Wärmeproduktion der Elektronik (ca. 30 Watt) ausgeglichen wird. Eventueller zusätzlicher Wärmebedarf kann durch Heizwiderstände bereitgestellt werden, die vom Bordrechner auf Basis der internen Temperatursensoren angesteuert werden.

Um das Risiko eines Elektronikausfalls bei einem möglichen Überschreiten des Temperaturbereichs zu verringern, wurden Bauteile ausgewählt, die mindestens für den Arbeitstemperaturbereich -25°C bis $+70^{\circ}\text{C}$, soweit möglich -40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$ spezifiziert sind. Zudem wurde bei der Entwicklung der Elektronik darauf geachtet, dass die Verlustleistung der Bauelemente jeweils weit unterhalb des vom Hersteller spezifizierten Maximalwertes bleibt. Dies ist notwendig, da die Wärmeabfuhr aus dem o.g. Grund eingeschränkt ist.

Eine besondere Anforderung stellt die Kühlung der CPU dar, da in dieser auf kleiner Fläche ca. 5 Watt Leistung umgesetzt werden. Der serienmäßige Fingerkühlkörper des Rechners kann diese Leistung bei niedrigem Luftdruck nicht abführen und wird daher durch einen Aluminiumblock ersetzt, der die Wärme durch Wärmeleitung direkt an ein Blech des Einschubgehäuses weiterleitet. Durch einen zusätzlichen Temperaturfühler kann die CPU-Temperatur ständig überwacht werden.

Bordrechner-Software

Besondere Anforderungen werden auch an die Software des Bordrechners gestellt. Ihre Aufgabe ist die Aufnahme von Messdaten, deren Vorverarbeitung, soweit für eine kompakte Datenspeicherung notwendig ist, die Kommunikation mit der Bodenstation sowie die parallele Steuerung aller Gerätekomponten wie Heizungen, ADC-Karten und Laser-Linelock bei gleichzeitig laufender Datenaufnahme. Auch ist, wie auch bei den Hardwarekomponenten, eine hohe Betriebssicherheit gefordert, da ein Ausfall (Programm- oder Systemabsturz) zum Totalverlust der Messdaten eines Fluges führen könnte.

Um ein paralleles, zeitrichtiges Auslesen der ADC-Karten sowie eine exakte Zuordnung der GPS-Zeitsignale zu den aufgenommenen Messdaten bei gleichzeitiger Weiterverarbeitung der Daten zu erreichen, wurde als Betriebssystem RTLinux (Real Time-Linux) gewählt. Dieses ermöglicht durch einen Real-Time-Scheduler, kritische Routinen wie das Auslesen der ADC-Karten zeitrichtig auszuführen und in sehr kurzer Zeit auf externe Ereignisse zu reagieren (sog. Hard-Real-Time-System), während für die unkritischen Teile der Software die gesamten Linux-Betriebssystemfunktionen weiterhin zur Verfügung stehen.

Die Software des Bordrechners besteht aus zwei Teilen, die beide in der Programmiersprache C wurden:

(a) so genannte Real-Time-Module, die auf Kernel-Ebene unter dem Real-Time-Scheduler laufen und zeitkritische Aufgaben durchführen. Hierzu gehören:

- Aufnahme der TDL-Messdaten und deren Vorverarbeitung (Mittelung)
- Software-Regelschleife zur Stabilisierung der Linienposition (Linelock): Extraktion der Linienposition aus dem Spektrum der Linelock-Zelle, Integration des Signals, Ausgabe eines Korrektursignals über DAC
- Aufnahme der Housekeeping-Daten, d.h. Temperatur- Druck-, Spannungs- und Stromwerte und andere wichtige Parameter zur Überwachung des Systemzustandes
- Aufnahme der GPS-Navigationsdaten und zeitliche Koordination mit den Messdaten
- Leistungsregelung der Heizwiderstände durch softwaregesteuerte Pulsweitenmodulation
- Auf dieser Ebene müssen Ausführungsprioritäten festgelegt und das zeitliche Zusammenspiel der einzelnen Module koordiniert werden, um Datenverluste durch Timing-Probleme auszuschließen.

(b) Host-Programm:

Ein nicht zeitkritisches Host-Programm, das als normale Linux-Anwendung ausgeführt wird, übernimmt die Daten von den Real-Time-Modulen, führt z.T. eine nicht zeitkritische Weiterverarbeitung durch (z.B. die langsame PID-Regelschleife für die Temperaturregelung),

formatiert die Daten für die Telemetrieübertragung, archiviert sie auf der Flash-Disk und führt Bodenkommandos aus.

Auf dieser Ebene spielen Timingfragen keine entscheidende Rolle, da der Linux-Kernel grundsätzlich auf der niedrigsten Prioritätsebene ausgeführt wird, ist eine Störung der obigen RT-Module durch das Host-Programm ausgeschlossen.

Der Datenaustausch zwischen den Realtime-Modulen und dem Host-Programm erfolgt über so genannte Realtime-Fifos, d.h. Zwischenspeicher mit „First-in First-out“-Arbeitsweise, welche sicherstellen, dass keine Daten verloren gehen, wenn das Host-Programm kurzzeitig unterbrochen wird.

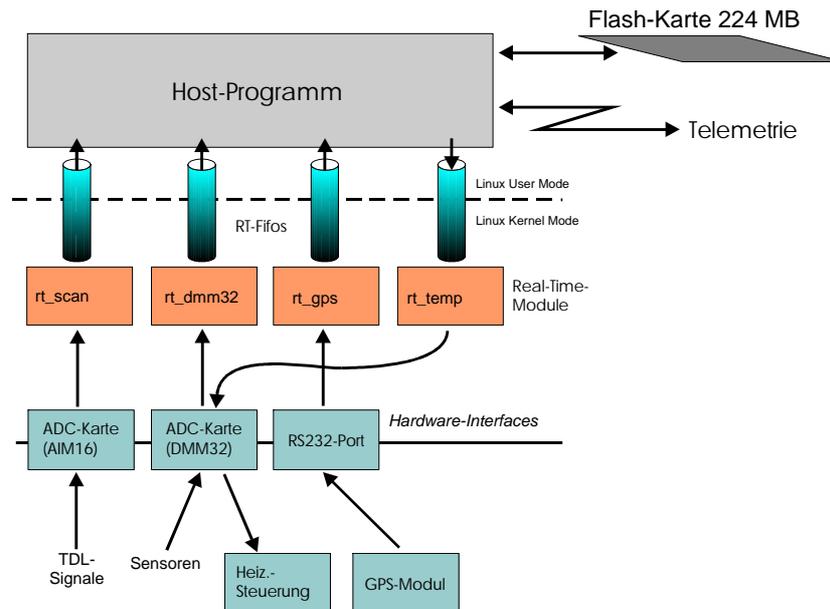


Abbildung 20: Struktur der Bordrechner-Software

Stabilisierung von Lasertemperatur und Linienposition

Die Temperatur der Laserdioden wird zunächst durch eine analoge Regelschleife vom P-Typ (proportionale Regelcharakteristik) stabilisiert. Um die verbleibende Temperaturabweichung dieser Regelschleife sowie eventuelle Langzeitdrift der Laserdiode auszugleichen und den Wellenlängen-Scanbereich um die Absorptionslinie zentriert zu halten, wird eine zweite, in Software realisierte Regelschleife vom I-Typ (Integrierte Regelcharakteristik) eingesetzt, die die tatsächliche, im Signal der Line-Lock-Zelle beobachtete Linienposition als Regelgröße verwendet und diese somit stabilisiert. Nach jedem Mittelungszyklus der Datenaufnahme wird die Linienposition aus dem Signal der Line-Lock-Zelle numerisch extrahiert; deren integrierte Regelabweichung wird über einen 12-bit DAC-Ausgang zur Korrektur des Temperatur-Sollwerts der primären P-Regelschleife verwendet. Zur Extraktion der Linienposition aus dem Spektrum wird ein speziell entwickelter „Schwerpunkt“-Algorithmus verwendet, der sich dadurch auszeichnet, dass er weder einen Fit-Algorithmus noch Fließkomma-Arithmetik benutzt und daher innerhalb eines kurzen, vorhersagbaren Zeitintervalls berechnet werden kann. Er ist außerdem sehr stabil gegenüber Rauschen oder Spikes im Eingangssignal. Mit Hilfe dieses Regelungsschemas konnte die Linienposition auch unter Flugbedingungen innerhalb weniger MHz stabil gehalten werden.

Batterien und Stromversorgung

Entgegen der ursprünglichen Planung wurde das System mit einer eigenständigen Stromversorgung, d.h. eigenen Batterien betrieben. Hierfür wurde auch ein spezielles, an die Batterien und das Messgerät angepassten Spannungsversorgungs-Modul entwickelt.

Spannungsversorgungsmodul

Das Spannungsversorgungsmodul stellt aus der Batteriespannung, die je nach Ladezustand, Strombelastung und Temperatur der Batterien zwischen 20V und 30V liegt (nominell 28V), die verschiedenen vom System benötigten stabilen Betriebsspannungen zur Verfügung:

- Rechner, Peltier-Endstufen für die Laser: $+ 5V \pm 5\%$, max. 5A
- Peltier-Endstufen für die Laser: $- 5V$, max. 1.5 A
- Analog-Elektronik: $\pm 8.2 V$, max. 0.6 A
- Drucksensoren: $+ 15V$, max. 30 mA

An die verwendeten Komponenten, insbesondere die Spannungswandler, müssen dabei Anforderungen hoher Zuverlässigkeit sowie hoher Temperaturfestigkeit (-40°C bis $+100^{\circ}\text{C}$) gestellt werden. Außerdem müssen hohe Anforderungen der Störabstrahlung eingehalten werden, was zusätzliche Filternetzwerke erforderlich macht.

Insbesondere die Herstellung der Spannungen $\pm 8.2 V$ stellte ein besonderes Problem dar, da Spannungswandler in für diesen Spannungsbereich nicht mit den gewünschten Eigenschaften auf dem Markt erhältlich sind. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, dass ein handelsüblicher Wandler der Firma Ericsson für $\pm 12 V$ beschafft und gemäß unseren Anforderungen modifiziert wurde.

Batterien

Gemäß des zu erwartenden durchschnittlichen sowie maximalen Stromverbrauchs wurde ein Batteriemodul aus Lithium-MnO₂-Zellen (insgesamt max. 40 Stück, Typ Friwo M20HR, Gesamtkapazität nominell 1200 Wh) verwendet. Dieser Zellentyp weist neben der guten Tieftemperatur-Eigenschaften eine hohe Strombelastbarkeit auf, was wegen der Impulsbelastung durch die pulsweitengeregelten Heizwiderstände wichtig ist.

Das gesamte Batteriemodul ist getrennt vom Elektronik-Gehäuse angeordnet und ebenfalls isoliert, um die Temperatur im Arbeitsbereich der Batterien zu halten.

Das Batteriemodul erlaubt eine Betriebszeit des Gerätes von ca. 8-16 Stunden (abhängig vom Strombedarf der Heizwiderstände und damit der Außentemperatur) für Startvorbereitungen und Flug.

14.2. Weitere Elektronik-Komponenten

Sensordatenaufbereitung

Dieses Modul dient zur Aufbereitung der Signale der Drucksensoren, von Temperatursensoren verschiedenen Typs (Halbleitersensoren LM335, KTY10 sowie Platin-Widerstandssensoren PT100 und PT1000). Es ist mit hochgenauen Festwiderständen und Präzisions-Operationsverstärkern aufgebaut; eine Hardware-Abgleichmöglichkeit ist nicht vorgesehen, da die Kalibration numerisch in der Software des Bordrechners vorgenommen wird.

Das Modul wurde im Rahmen des Projektes entwickelt, gebaut und erfolgreich getestet.

Heizungssteuerung

Ein eigenes Modul in Form eines Eurokarten-Einschubes dient zur Ansteuerung der Heizwiderstände und Peltier-Elemente, die an verschiedenen Stellen des Systems zur Temperaturkontrolle verwendet werden.

Das Modul erlaubt eine Steuerung von 6 unabhängigen Kanälen, wobei zur Minimierung von Energieverlusten die Heizwiderstände direkt aus der relativ hohen Batteriespannung von ca. 28V betrieben werden. Die Steuerung erfolgt durch Pulsweitenregelung über MOSFETs, wodurch eine verschleißfreie Arbeitsweise (ohne bewegliche Teile) und eine sehr geringe Verlustwärmeentwicklung erreicht wird.

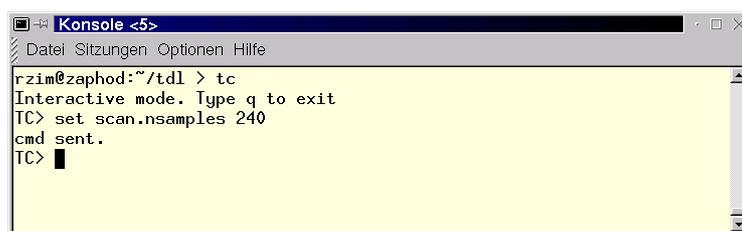
Weiterhin erlaubt das Modul eine Messung der Heizströme, wodurch die korrekte Arbeitsweise der Heizungen während des Fluges überwacht werden kann.

14.3. Software der Basisstation

Als Basisstation dient ein handelsüblicher PC, der unter einem Standard-Linux-System betrieben wird. Die Software ist aus mehreren Einzelprogrammen aufgebaut, die verschiedene Steuerungs-, Verarbeitungs-, und Anzeigeaufgaben übernehmen und im Folgenden beschrieben werden. Die Software wurde in den Programmiersprachen C und C++ erstellt; soweit die Programme eine grafische Benutzeroberfläche verwenden, kam hierfür die Bibliothek QT zum Einsatz. Für die numerische Datenverarbeitung, insbesondere bei der Datenauswertung, kamen z.T. angepasste Routinen aus [Numrec] zum Einsatz.

tc (Telekommando)

Über dieses Programm werden während des Fluges sowie in der Testphase Telemetrikommandos an das Bordsystem geschickt. Diese Kommandos werden vom Bediener im Klartext eingegeben; auf eine grafische Benutzeroberfläche wurde hier bewusst verzichtet, damit der Bediener die maximale Kontrolle über das Bordsystem behält.



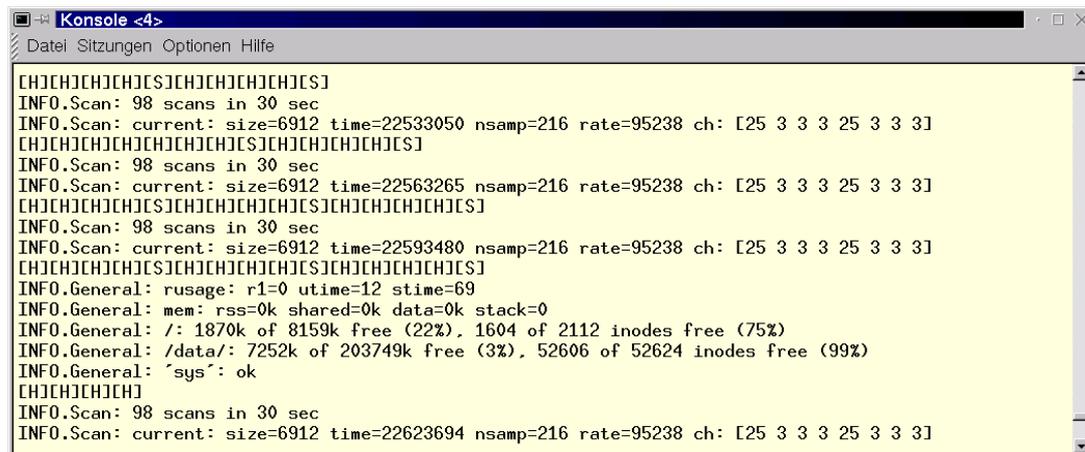
```
Konsole <5>
Datei Sitzungen Optionen Hilfe
rзим@zaphod:~/td1 > tc
Interactive mode. Type q to exit
TC> set scan.nsamples 240
cmd sent.
TC> █
```

Abbildung 21: Screenshot des Telekommando-Programmfensters

receiver (Empfangsprogramm für Telemetrie)

Der binäre Telemetrie-Datenstrom, der verschiedene Arten von Datenblöcken in gemultiplexter Form enthält (z.B. Blöcke mit Spektren, Housekeeping-Daten, GPS-Daten oder Diagnosemeldungen), wird von diesem Programm wieder in die einzelnen Datenströme zerlegt, die dann auf der lokalen Festplatte in getrennten Dateien abgelegt werden. Über eine Prüfsumme wird dabei auch die Integrität der Daten überprüft, um eine Verfälschung durch Übertragungsfehler auszuschließen; solche traten allerdings in der Praxis selten auf. Die von 'receiver' geschriebenen Dateien können, auch noch

während dem Empfang, direkt von den Anzeigeprogrammen 'houseview' und 'scanview' eingelesen werden.



```
Konsole <4>
Datei Sitzungen Optionen Hilfe
[CH]CH[CH]CH[CH]S[CH]CH[CH]CH[CH]S]
INFO.Scan: 98 scans in 30 sec
INFO.Scan: current: size=6912 time=22533050 nsamp=216 rate=95238 ch: [25 3 3 3 25 3 3 3]
[CH]CH[CH]CH[CH]CH[CH]CH[CH]S[CH]CH[CH]CH[CH]S]
INFO.Scan: 98 scans in 30 sec
INFO.Scan: current: size=6912 time=22563265 nsamp=216 rate=95238 ch: [25 3 3 3 25 3 3 3]
[CH]CH[CH]CH[CH]S[CH]CH[CH]CH[CH]S]CH[CH]CH[CH]CH[CH]S]
INFO.Scan: 98 scans in 30 sec
INFO.Scan: current: size=6912 time=22593480 nsamp=216 rate=95238 ch: [25 3 3 3 25 3 3 3]
[CH]CH[CH]CH[CH]S[CH]CH[CH]CH[CH]S]CH[CH]CH[CH]CH[CH]S]
INFO.General: rusage: r1=0 utime=12 stime=69
INFO.General: mem: rss=0k shared=0k data=0k stack=0
INFO.General: /: 1870k of 8159k free (22%), 1604 of 2112 inodes free (75%)
INFO.General: /data/: 7252k of 203749k free (3%), 52606 of 52624 inodes free (99%)
INFO.General: `sys`: ok
[CH]CH[CH]CH[CH]
INFO.Scan: 98 scans in 30 sec
INFO.Scan: current: size=6912 time=22623694 nsamp=216 rate=95238 ch: [25 3 3 3 25 3 3 3]
```

Abbildung 22: Screenshot des receiver - Programmfesters

tmdump (Programm für Protokollrechner)

Dieses Programm wird auf einem zweiten Rechner gestartet, der über die RS232-Schnittstelle ebenfalls mit dem Telemetrie-Datenstrom versorgt wird. Es protokolliert diesen Datenstrom ohne Verarbeitung mit, um die Telemetriedaten im Originalzustand zu sichern und eine 'Fallback'-Möglichkeit zur Datenauswertung bei gestörter Übertragung oder (allerdings bisher nicht aufgetretenen) Fehlfunktionen des Programms 'receiver' zu schaffen.

houseview (Anzeige der Housekeeping-Daten)

Dieses Programm dient zur Echtzeit-Anzeige der Housekeeping-Daten während des Fluges zur Überwachung der Systemfunktion sowie bei der nachträglichen Datenauswertung. Außer der numerischen Anzeige (im oberen Teil des Fensters) können beliebige Werte zur grafischen Ausgabe selektiert werden. Insgesamt können folgende Daten angezeigt werden:

- Zeit ab Hochfahren des Bordrechners (time), als Referenzgröße
- Temperaturwerte an 16 verschiedenen Punkten des Systems (T_...)
- Der umgebende Luftdruck (p_air_hi)
- Betriebsspannungen (U_neg_..., U_pos_...), zur Überwachung der Stromversorgung
- Spannungen an den Laser-Peltier-Elementen (U_peltier_...), zur Überwachung der Temperaturregelung
- Verstärkungseinstellung der AGC-Verstärker (AGC_...), zur Überwachung der optischen Transmission der Herriott-Zelle
- Aktuelle Einstellungen der PWM-gesteuerten Heizwiderstände
- Aktuelle Regelparameter der Laser-Stabilisierung (Line Lock)

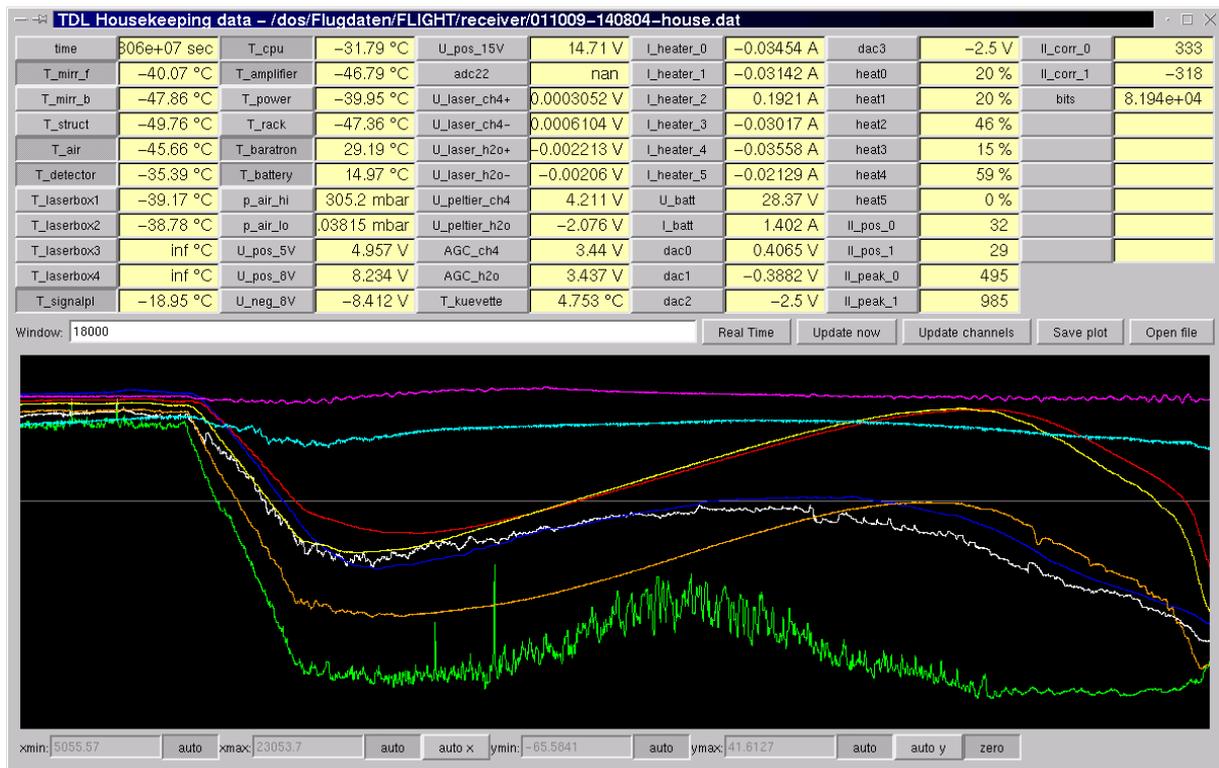


Abbildung 23: Screenshot des houseview-Programms

Die grafische Darstellung zeigt den zeitlichen Verlauf verschiedener Temperaturen während der Mission in Aire-sur-l'Adour 2001 beginnend einige Zeit vor dem Start bis kurz nach Wiedereintritt in die Troposphäre (Herunterfahren des Bordrechners); der plötzlich einsetzende Temperaturabfall markiert den Zeitpunkt des Ballonstarts. Die grüne Kurve stellt die Temperatur der umgebenden Luft dar.

scanview (Anzeige und Auswertung der TDL-Daten)

Dieses Programm stellt den komplexesten Teil der Boden-Software dar. Es dient sowohl zur visuellen Überwachung der aufgenommenen Spektren in Echtzeit während des Fluges, z.T. auch in vorverarbeiteter Form, als auch zur endgültigen Auswertung der gespeicherten Daten inklusive Berechnung von Höhenprofilen der Spurengase.

Die Rohsignale, auf deren Grundlage das Programm arbeitet, werden zunächst skaliert (Y-Achse: Spannungseinheiten, X-Achse: Wahlweise Zeit, Frequenzabweichung, Wellenzahlabweichung oder Datenpunkte). Dann werden sie in OD- (optische Dichte)-Spektren umgerechnet und mit einem unten näher beschriebenen Fit-Algorithmus ausgewertet.

Dabei können die Daten in allen Verarbeitungsschritten grafisch dargestellt werden:

- Die Rohdaten von den acht ADC-Eingängen
- Die daraus berechnete optische Dichte (OD-Spektrum)
- Das nach Fit-Parametern berechnete OD-Spektrum
- Das berechnete OD-Spektrum minus den polynomischen Untergrund
- Das gemessene OD-Spektrum minus den polynomischen Untergrund
- Den polynomischen Untergrund einzeln
- Das Fit-Residuum.

Angezeigt werden ferner die Parameter der Datenaufnahme, die Aufnahmezeit, Lufttemperatur und -Druck, die optische Dichte im Maximum der Absorptionslinie („Peak“) und die mittlere Stärke des Fit-Residuums („RMS“ – Root Mean Square, quadratisches Mittel).

Zum Feinabgleich des Auswertalgorithmus können verschiedene Berechnungsparameter variiert werden; insbesondere können die Vorgabewerte für die Fit-Parameter festgelegt und jeder Parameter als „fest“ oder „variabel“ definiert werden.

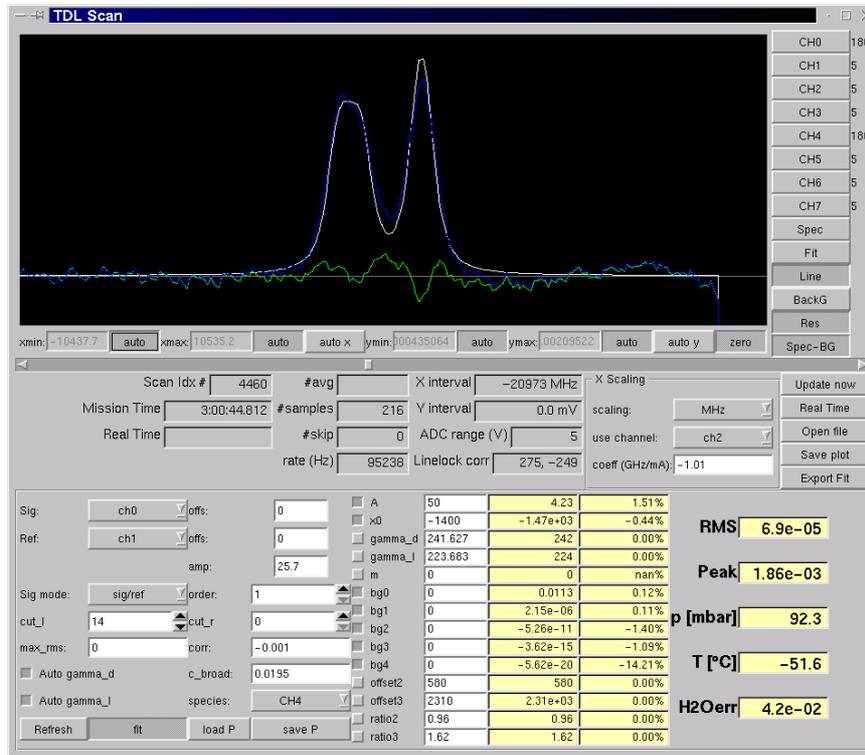


Abbildung 24: Screenshot des scanview-Programms

Im Screenshot ist ein während dem Flug Aire-sur-l'Adour 2001 aufgenommenes Methan-Spektrum in der Stratosphäre (bei 92 mbar) zu sehen; es handelt sich um eine Gruppe von drei Absorptionslinien verschiedener Stärke. Kurven zeigen die optische Dichte nach Subtraktion des polynomischen Untergrundes, die nach den Fit-Parametern berechnete Form der Absorptionslinie, und das Residuum des Fits.

Eine spezielle Exportfunktion erlaubt, die Auswertprozedur mit den definierten Parametern auf die kompletten Eingangsdateien (d.h. alle Spektren des Fluges) anzuwenden und die Ergebnisse in eine Datei im ASCII-Format zu schreiben. Aus dieser können dann z.B. Höhenprofile von Spurenstoff-Mischungsverhältnissen extrahiert werden.

15. Messkampagne



Abbildung 25: Start und Landung

Die Messkampagne fand zusammen mit den Arbeitsgruppen von Dr. C. Schiller (Forschungszentrum Jülich) und Dr. A. Engel (Goethe Universität Frankfurt vom 20. September bis zum 15. Oktober 2001 bei der CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) in Aire sur l'Adour statt. Der Start erfolgte gegen 16:00 Ortszeit, die Landung erfolgte gegen 21:00 Uhr. Die Abflugmasse der Ballongondel betrug ca. 440 kg. Während des Fluges konnte die Funktion des Spektrometers durch eine Telemetrie- anbindung überwacht werden, die auch die Steuerung der verschiedenen Heizungen ermöglichte. Die Messdaten wurden im Instrument gespeichert sowie mit reduzierter Datenrate zum Boden übertragen, was eine gewisse Sicherheit für den Fall eines Totalverlustes bot. Während der Messungen, die in einer maximalen Höhe von 31,5 km MSL (main sea level) stattfanden, kühlte sich die Umgebungsluft auf bis zu -55 °C ab (vgl. Abbildung 14: AGC-Steuersignal

Die Trennung der Gondel vom Ballon erfolgte aus Sicherheitsgründen (eine Stadt war in der Nähe), nicht wie geplant in einer Höhe von 10 km, sondern schon in einer Höhe von 12 km. Die Landung erfolgte an drei Fallschirmen, wobei die Gondel über ein Feld gezogen wurde und auf dem Kopf zum liegen kam. Alle Instrumente blieben weitgehend unbeschädigt. Die Bergung erfolgte am nächsten Tag.

15.1. Messergebnisse des Testfluges in Aire-sur-l'Adour 2001

Wasserdampf

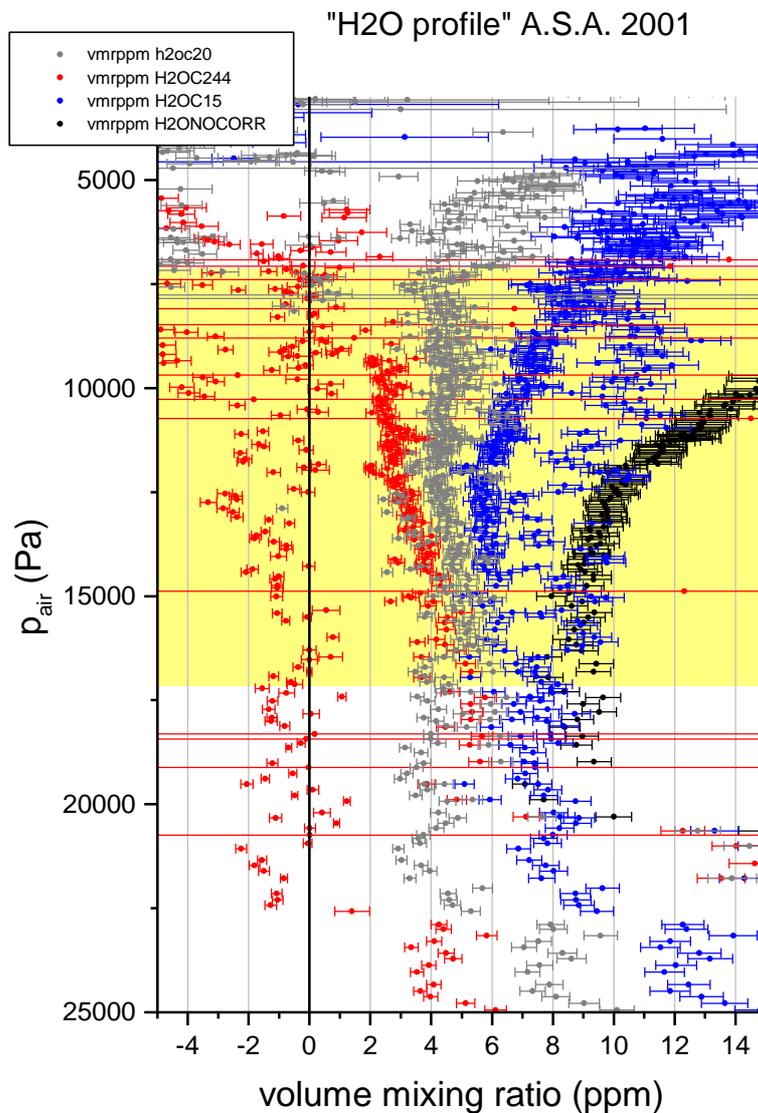


Abbildung 26: Wasserdampfprofile Aire-sur-l'Adour 2001

Beim Testflug konnte gezeigt werden, dass die Messung von Wasserdampfabsorptionen bzw. -Konzentrationen grundsätzlich funktioniert. Die Messung der stratosphärischen Wasserdampfkonzentration war jedoch bei diesem Flug durch ein Kontaminationsproblem stark beeinträchtigt; im Gehäuse („optischen Kopf“ des Messgerätes) war noch Wasserdampf aus der Troposphäre enthalten, der durch sein zusätzliches, nicht genau bekanntes Absorptionssignal das Messergebnis verfälschte und z.T. eine Messung unmöglich machte. Durch ein Korrekturverfahren konnte dieses Problem bei der Auswertung teilweise kompensiert werden, so dass man im Höhenbereich von 80-160 mbar plausible Messwerte im Bereich 4-5 ppm enthält. Eine wissenschaftliche Verwertung dieser Ergebnisse ist von uns jedoch nicht vorgesehen, da wir sie nicht als gesichert ansehen.

Für zukünftige Einsätze des Gerätes existieren bereits Pläne für Massnahmen, um die Kontamination zu vermeiden.

Methan

CH₄ profile A.S.A. 2001

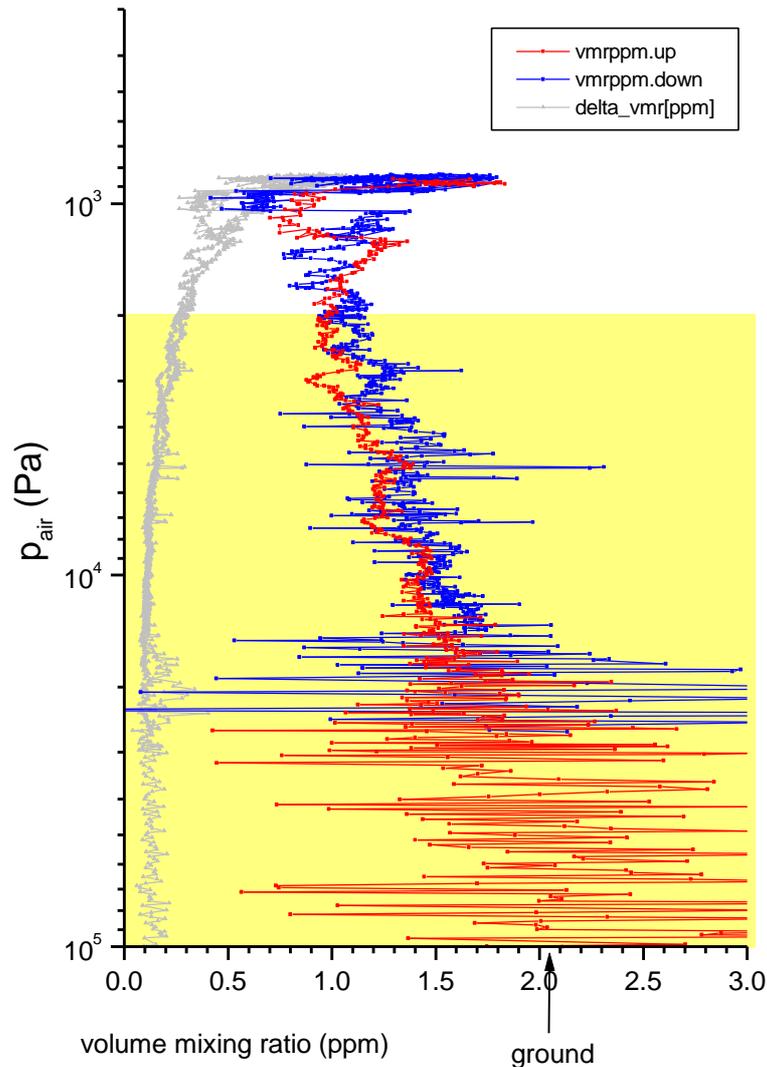


Abbildung 27: Methanprofile Aire-sur-l'Adour 2001; die rote Kurve zeigt das Mischungsverhältnis beim Aufstieg, die blaue beim Abstieg, die graue den 1-sigma-Fehler

Ein Methanprofil konnte bereits beim Testflug erfolgreich gemessen werden. Die bei der bisherigen Auswertung erhaltenen Werte sind lediglich insgesamt um einen Faktor von ca. 1.2 zu hoch gegenüber bisherigen Methanmessungen. Wir führen dies auf die noch nicht gesicherte bekannte Linienstärke der von uns verwendeten Absorptionslinien zurück. Zukünftige, genauere Messungen der Linienstärken, die wir evtl. auch selbst durchführen werden, werden eine bessere Kalibration der bereits gemessenen und zukünftiger Daten erlauben.

Die starke Variabilität der Methanwerte im Bereich der Troposphäre ist auf die in diesem Bereich noch relativ starken Vibrationen der Ballongondel zurückzuführen. Durch eine verbesserte Schwingungsdämpfung der Messzellenaufhängung kann dieses Problem bei zukünftigen Flügen voraussichtlich verringert werden.

16. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Nachdem die bekannten Probleme ausgeräumt sind, sollen mit unserem Gerät weitere Flüge unternommen werden. Durch Einfließen der sehr wichtigen Erfahrungen aus dem Testflug erwarten wir, dass die Qualität der bei diese Flüge erhaltenen Messdaten wesentlich besser sein wird. Insbesondere wird das Gerät nach erfolgter exakter Messung der Linienstärken auch in ihrer absolute Größe verlässliche Daten liefern können.

Weitere Flüge auf der TRIPLE-Plattform sind vorgesehen. In diesem Zusammenhang sollen unsere Daten insbesondere der Validierung des Fernerkundungsinstruments SCIAMACHY des am 1.März 2002 erfolgreich gestarteten Satelliten ENVISAT dienen.

Da das Gerät entsprechend seiner Konzeption sehr klein und leicht ist (Das Gesamtgewicht konnte mit ca. 20 kg gegenüber den unsprünglichen Konzeption sogar halbiert werden), und weitgehend autark arbeiten kann (nach den Erfahrungen des Testflugs wäre sogar ein Betrieb ohne Telemetrie/Telecommand-Verbindung denkbar), sind außer regelmäßigen Mitflügen auf TRIPLE auch Mitflüge auf anderen, kleineren Plattformen oder eigene Flüge mit kleinen Ballonen relativ problemlos machbar.

Während des Projektes wurden an den beteiligten Instituten wichtige Erfahrungen gesammelt, die auch in die Entwicklung neuer, anders ausgerichteter NIR-TDL-Geräte – z.B. für Messungen am Boden, auf Flugzeugen sowie zur Messung anderer Spurengase, z.B. CO₂ –einfließen können

17. Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Am Institut Pierre-Simon de Laplace, Service d'Aeronomie, CNRS, Frankreich, wurde ebenfalls In-Situ-Messgerät (Spectromètre à Diodes Laser Accordables, SDLA) für trophosphärisches und stratosphärisches CH₄ und H₂O aufgebaut, das auf dem gleichen Prinzip beruht. Es werden ebenfalls (dort allerdings fasergekoppelte) Diodenlaser im gleichen Wellenlängenbereich sowie eine sphärische Herriott-Zelle verwendet. Im Unterschied zu unserem Gerät basiert das Gerät auf einer dedizierte Ballon-Nutzlast mit eigener Telecommand/Telemetrie-Einrichtung und einem Gesamtgewicht von ca. 100 kg. Eine Beschreibung des Geräts und Messergebnisse sind in [Durry 1999,2000] veröffentlicht.

18. Geplante Publikation

Eine Veröffentlichung des Gerätekonzeptes und der Erfahrungen in Applied Optics ist z.Zt. in Vorbereitung. Es ist außerdem Thema der Promotionsarbeiten zweier beteiligter Projektwissenschaftler (Carsten Giesemann, PCI Heidelberg, und Rainer Zimmermann, IUP Heidelberg).

19. Referenzen

- Bergamaschi, P., C. Brühl, C.A.M. Brenninkmeijer, G. Saueressig, J.N. Crowley, J.U. Gross, H. Fischer, and P.J. Crutzen, Implications of the large carbon kinetic isotope effect in the reaction $\text{CH}_4 + \text{Cl}$ for the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of stratospheric CH_4 , *Geophys. Res. Lett.* 1996
- Bjorklund, G.C., Frequency-Modulation Spectroscopy: A new method for measuring weak absorptions and dispersions, *Opt. Lett.* 5, 15-17, 1980
- Bomse, D.S, Stanton, A.C., Silver, J.A., *Frequency modulation and wavelength modulation spectroscopies: comparison of experimental methods using a lead-salt diode laser*, *Appl. Opt.* 31 (6), pg. 718-731 (1992)
- C. S. Edwards, G. P. Barwood, P. Gill, B. Schirmer, H. Venzke, and A.Melling, *Development of an IR Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer for Trace Humidity Measurements at Atmospheric Pressure*, *Appl. Opt.* 38 (21), pg. 4699-4704 (1999)
- Carlisle, C.B., and D.E. Cooper, Tunable Diode Laser Frequency Modulation Spectroscopy Through an Optical Fiber : High-Sensitivity Detection of Water Vapor, *Appl. Phys. Lett.* 56 (9), 805-807, 1990
- Cooper, D.E., and T.F. Gallagher, Double Frequency Modulation Spectroscopy: High Modulation Frequency With Low-Bandwidth Detectors, *Appl. Opt.* 24, 1327-1334, 1985
- Crutzen, P., On the role of CH_4 in atmospheric chemistry: sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources, *Ambio* 24, 52-55, 1995
- Dlugokencky, E.J., K.A. Masarie, P.M. Lang, P.P. Tans, L.P. Steele, and E.G. Nisbet, A dramatic decrease in the growth rate of atmospheric methane in the northern hemisphere during 1992, *Geophys. Res. Lett.* 21, 45-48, 1994
- Durry, G. and G. Megie, „In situ measurements of H_2O from stratospheric balloon by diode laser direct-differential absorption spectroscopy at $1.39\ \mu\text{m}$ “, *Appl. Opt.* 39, 5601-5608 (2000)
- Durry, G., and G. Megie, „Atmospheric CH_4 and H_2O monitoring with near-infrared InGaAs laser diodes by the SDLA, a balloonborne spectrometer for tropospheric and stratospheric in situ measurements“, *Appl. Opt.* 38 7342–7354 (1999)
- Durry, G., I. Pouchet, N. Amarouche, T. Danguy, and G. Megie, „Shot-noise-limited dual-beam detector for atmospheric trace-gas monitoring with near-infrared diode lasers“, *Appl. Opt.* 39, 5609-5619 (2000)
- Farman, J.C., B.G. Gardiner, and J.D. Shanklin, Large losses of total ozone in antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature* 315, 207-210, 1985
- Grossmann, B.E. and E.V. Browell, *"Spectroscopy of Water Vapor in the 720-nm Wavelength Region: Line Strengths, Self-Induced Pressure Broadenings and Shifts, and Temperature Dependence of Linewidths and Shifts,"* *J.Mol.Spectrosc.* 136, 264-294 (1989)
- Grossmann, B.E. and E.V. Browell, *"Water-Vapor Line Broadening and Shifting by Air, Nitrogen, Oxygen, and Argon in the 720-nm Wavelength Region,"* *J.Mol.Spectrosc.* 138, 562-595 (1989).
- Gunson, M.R. et. al., Measurements of CH_4 , N_2O , CO , H_2O , and O_3 in the middle atmosphere by the atmospheric trace molecule spectroscopy experiment on Spacelab 3, *J. Geophys. Res.* 95, 13867-13882, 1990
- Herriott, D.R. et al., *Off-axis paths in spherical mirror resonators*, *Appl. Opt.* 3, pg. 523-526 (1964)
- Herriott, D.R., Schulte, H.J.; *Folded optical delay lines*; *Appl. Opt.* 4 (8), pg. 883-889 (1965)
- Hobbs, C.D., *Reaching the shot noise limit for \$10*, *Optics & Photonics News* April 1991

- Houghton, J., *The global climate*, Cambridge University Press, 1984
- Humlicek, K., *JQSRT* 27, pg. 437 (1982)
- Humlicek, K., R.L. Longbothum, *JQSRT* 21, pg. 309 (1979)
- Jensen, E.J., O.B. Toon, L. Pfister, and H.B. Selkirk, Dehydration of the upper troposphere and lower stratosphere by subvisible cirrus clouds near the tropical tropopause, *Geophys. Res. Lett.* 23, 825-828, 1996
- Johnson, T.J. et al., Measurements of Line Strengths in the HO₂ v₁ overtone band at 1.5µm Using an InGaAsP Laser, *J. Phys. Chem.* 95, 6499-6502, 1991
- Khalil M.A.K., and Rasmussen R.A., Atmospheric Methane: Recent Global Trends, *Environ. Sci. Technol.* 24, 549-553, 1990
- Kitaoka, Y., Sato, H., Mizuuchi, K., Yamamoto, K., Kato, M., *Intensity noise of laser diodes with optical feedback*, *IEEE J. of Quantum Electr.* 32 (5), pg. 822-828 (1996)
- Kley, D., E.J. Stone, W.R. Henderson, J.W. Drummond, W.J. Harrop, A.L. Schmelkopf, and R.H. Winkler, In-situ measurement of the mixing ratio of water vapor in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.* 36, 2513-2524, 1979
- Kley, D., J.W. Drummond, and A.L. Schmelkopf, *On the structure and microstructure of stratospheric water vapor*, *Atmos. Water Vapor*, Academic Press Inc, 315, 1980
- L.S. Rothman, R.R. Gamache, A. Goldman, L.R. Brown, R.A. Toth, H.M. Pickett, R.L. Poynter, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Barbe, N. Husson, C.P. Rinsland, and M.A.H. Smith, *"The HITRAN database: 1986 Edition"*, *Appl. Opt.* 26, 4058-4097 (1987).
- Langley, L.N., Shore, K.A., Mørk, J., *Dynamical and noise properties of laser diodes subject to strong optical feedback*, *Opt. Lett.* 19 (24), pg. 2137-39 (1994)
- LeTexier, H., S. Solomon, and R.R. Garcia, The role of molecular hydrogen and methane oxidation in the water vapour budget of the stratosphere, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 114, 281-295, 1988
- McManus, J.B., Keabian, P.L., *Appl. Opt.* 29, 898(1990)
- Mastenbrook H.J., and Daniels R.E., Measurements of stratospheric water vapor using a frost point hygrometer, *Atmosph. Water Vapor*, 1980
- Mörschel, U., E. Klein, D. Kley, and U. Schmidt, A new balloon borne stratospheric hygrometer, In *Proc. 10th ESA Symposium on European rocket and balloon programmes and related research* (edited by Kaldeich B.), pp. 201-205, ESA Publications Division, ESTEC, 1991
- Oltmans, S.J., and D.J. Hofmann, Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994, *Nature* 374, 146-149, 1995
- Oltmans, S.J., and D.J. Hofmann, Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994, *Nature* 374, 146-149, 1995
- Peter, T., Increase in PSC formation probability caused by high-flying aircraft, *Geophys. Res. Lett.* 18, 1465-1468, 1991
- Petermann, K., *Laser diode modulation and noise*; Kluwer Academic Publishers (1991)
- Pfeilsticker, K., and U. Platt, Airborne measurements during the arctic stratospheric experiment: observations of O and NO₂, *Geophys. Res. Lett.* 21(13), 1375-1379, 1994
- Philip C. D. Hobbs, *Ultrasensitive laser measurements without tears*, *Appl. Opt.* 36 (4), 903-920 (1996)
- Press, William H., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T. and Flannery, Brian P., *Numerical Recipes in C - the art of scientific computing*; Cambridge University Press

- Rosenlof, K.H., A.F. Tuck, K.K. Kelly, J.M. Russell III, and P. McGormick, Hemispheric asymmetries in water vapor and inferences about transport in the lower stratosphere, *J. Geophys. Res.* 102 (D11), 13213-13234, 1997
- Rothman, L.S. et al., The Hitran database: 1986 edition, *Appl. Opt.* 26, 19, 4058, 1987
- Rothmann, L. et al., HITRAN molecular absorption database, 2000 edition, www.hitran.com (2000)
- Schreier, F., *Voigt and complex error function*; *JQSRT* 48, pg. 743-762 (1992)
- Scott, D. C., R. L. Herman, C. R. Webster, R. D. May, G. J. Flesch, and E. J. Moyer, *Airborne Laser Infrared Absorption Spectrometer (ALIAS-II) for In Situ Atmospheric Measurements of N₂O, CH₄, CO, HCl, and NO₂ from Balloon or Remotely Piloted Aircraft Platforms*, *Appl. Opt.* 38 (?), pg. 4609- 4622 (1999)
- Silver, J.A., and D.C. Hovde, Near-infrared diode laser airborne hygrometer, *Rev. Sci. Instrum.* 65 (5), 1691-1694, 1994
- Silver, J.A., *Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods*, *Appl. Opt.* 31 (6), pg. 707-717 (1992)
- Tolbert, M.A., Laboratory studies of heterogeneous reactions, in low-temperature chemistry of the atmosphere, ed. G.K. Moortgat et al., NATO ASI Series 121, Springer, 1994
- Toth, R.A., "Extensive measurements of H₂¹⁶O line frequencies and strengths: 5750-7965 cm⁻¹," *Appl. Opt.* 33, 4851-4867 (1994).
- W. R. Trutna, R. L. Byer, *Appl. Opt.* **19**, 301 (1980)
- Vömel, H., S.J. Oltmans, D. Kley, and P.J. Crutzen, New evidence for stratospheric dehydration mechanism in the equatorial Pacific, *Geophys. Res. Lett.* 22(23), 3235-3238, 1995b
- Vömel, H., S.J. Oltmans, D.J. Hofmann, T. Deshler, and J.M. Rosen, The evolution of the dehydration in the Antarctic stratospheric vortex, *J. Geophys. Res.* 100 (D7), 13919-13926, 1995a
- Webster, C.R. et al., Aircraft (ER-2) laser infrared absorption spectrometer (ALIAS) for in-situ stratospheric measurements of HCl, N₂O, CH₄, NO₂, and HNO₃, *Appl. Opt.* 33, 454-472, 1994
- Webster, C.R., and R.D. May, Simultaneous in Situ Measurements and Diurnal Variations of NO, NO₂, O₃, jNO₂, CH₄, H₂O, and CO₂ in the 40- to 26-km Region Using an Open Path Tunable Diode Laser Spectrometer, *J. Geophys. Res.* 92, 11931-11950, 1987
- Werle, P., Slemr, F., Gehrtz, M., Bräuchle, C.; *Wideband noise characteristics of a lead-salt diode laser: possibility of quantum noise limited TDLAS performance*; *Appl. Opt.* 28 (9), pg. 1638-42 (1989)
- White, J.U., *Long Optical Paths of Large Aperture*, *J. Opt. Soc. Am.* 32 (1942)
- White, J.U., *Very Long Optical Paths in Air*, *J. Opt. Soc. Am.* 66 (5) (1942)
- Zahn, A., V. Barth, K. Pfeilsticker, and U. Platt, Deuterium, Oxygen-18, and Tritium as tracers for water vapour transport in the lower stratosphere and tropopause region, in press, *J. Atmos. Chem.*, 1997