

# Schlussbericht

für das Projekt mit dem Förderkennzeichen 50EE0023

## Validation von SCIAMACHY lv2-Daten mit DOAS-Messungen von der DLR-Falcon aus



Zuwendungsempfänger: Institut für Umweltphysik,  
Universität Bremen

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2000 – 31.12.2004

Bearbeiter  
Andreas Richter  
Ping Wang  
Marco Bruns  
John P. Burrows

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung des Projektes .....	4
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
2	Eingehende Darstellung .....	7
2.1	Erzielte Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen .....	7
2.1.1	Entwicklung des AMAXDOAS Instruments .....	7
2.1.2	SCIA-VALUE Kampagnen.....	9
2.1.3	Sensitivitätsstudien Profilretrieval .....	10
2.1.4	Anwendungen Profilretrieval .....	14
2.1.5	Algorithmenentwicklung Wellenlängenmethode.....	15
2.1.6	Validation von stratosphärischem O <sub>3</sub> .....	18
2.1.7	Validation von stratosphärischem NO <sub>2</sub> .....	20
2.1.8	Validation von troposphärischem NO <sub>2</sub> .....	21
2.1.9	Validation von stratosphärischem OCIO.....	23
2.1.10	AMAXDOAS Messungen von SO <sub>2</sub> .....	25
2.1.11	AMAXDOAS Messungen von HCHO .....	27
2.2	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	29
2.3	Erfolgte / geplante Veröffentlichungen.....	29
2.4	Referenzen.....	29
3	Erfolgskontrollbericht .....	32
3.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen.....	32
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens.....	32
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	32
3.3.1	Erfindungen und Patentanmeldungen .....	32
3.3.2	Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende.....	32
3.3.3	Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	32
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	32
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer .....	33
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.....	33
4	Liste der Veröffentlichungen: .....	34
4.1	Diplom und Doktorarbeiten .....	34
4.2	In Vorbereitung .....	34
4.3	Rezensiert .....	34
4.4	Konferenzbeiträge .....	34
4.5	Poster.....	35

---

4.6	Vorträge.....	35
-----	---------------	----

# 1 Kurze Darstellung des Projektes

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes „Validation von SCIAMACHY lv2-Daten mit DOAS-Messungen von der DLR-Falcon aus“ wurden Messungen mit dem AMAXDOAS-Instrument auf der DLR-Falcon durchgeführt, die zur Validation von Messungen des Satelliteninstrumentes SCIAMACHY verwendet werden sollten. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Spurengasen, die im UV und im sichtbaren Spektralbereich nachgewiesen werden können. Das AMAXDOAS ist vom Messprinzip her ähnlich wie SCIAMACHY aufgebaut, und kann daher dieselben Spurengase ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $HCHO$ ,  $OCIO$ ,  $BrO$ ,  $H_2O$ ,  $O_4$ ) messen, wie sie SCIAMACHY in den Kanälen 2 und 3 nachweisen kann. Ein besonderer Vorzug des AMAXDOAS Gerätes ist es, dass es troposphärische und stratosphärische Spurengassäulen trennen kann, und für starke Absorber sogar Profilinformaton ableiten kann. Dadurch sind AMAXDOAS Messungen ideal für die Validation von troposphärischen Produkten von SCIAMACHY.

Die Aufgabenstellung des Projektes lässt sich zusammenfassend in mehrere Schritte aufteilen:

1. Entwicklung und Bau des AMAXDOAS Gerätes
2. Entwicklung bzw. Verbesserung von Algorithmen zur Auswertung der Daten
3. Durchführung der Messkampagnen
4. Auswertung der Daten
5. Vergleich mit SCIAMACHY Messungen, Validation

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Scanning Imaging Spectrometer for Atmospheric CHartography (SCIAMACHY) ist ein UV/vis/IR Spektrometer auf dem am 1. März 2002 gestarteten Europäischen Umweltsatelliten ENVISAT. SCIAMACHY beobachtet das von der Atmosphäre und der Erdoberfläche gestreute bzw. reflektierte Licht in Nadir-, Limb- und Okkultationsmessungen. Aus diesen Messungen lassen sich Säulen und Vertikalprofile einer großen Zahl von atmosphärischen Parametern wie zum Beispiel Temperatur, Ozonverteilung, Bewölkung oder  $CO_2$ -Konzentrationen ableiten. Diese Daten sind für eine ganze Reihe von aktuellen Forschungsthemen interessant, und liefern Beiträge zu Umweltpolitisch relevanten Problemen wie dem stratosphärischen Ozonabbau, die Zunahme von Treibhausgasen und Luftverschmutzung durch anthropogene Emissionen.

Wie alle Fernerkundungsmessungen müssen auch die Daten von SCIAMACHY kontinuierlich validiert werden. Das kann nur durch eine Kombination verschiedener Messmethoden und Plattformen gewährleistet werden, wie sie im Rahmen der Deutschen SCIAMACHY-Validationsprojekte erfolgt.

Die in diesem Projekt vorgenommenen AMAXDOAS-Messungen von der DLR-Falcon aus können bestimmte Aspekte der Validation von SCIAMACHY in besonders guter Weise erfüllen:

- Aufgrund des ähnlichen Messprinzips eine großer Teil der SCIAMACHY Zielgrößen vom AMAXDOAS-Instrument abgedeckt.
- Die Messmethode ist etabliert und liefert Validationsmessungen mit guter Genauigkeit.
- Durch die schnellen Breiten- und Längenschnitte mit dem Flugzeug lassen sich zeitnahe SCIAMACHY-Messungen unter sehr unterschiedlichen geophysikalischen Parametern validieren.

- Durch die Flughöhe in der Nähe der Tropopause lassen sich stratosphärische und troposphärische Säulen trennen, wodurch sich die troposphärischen SCIAMACHY-Produkte direkt validieren lassen.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Projektes wurde entscheidend beeinflusst durch die mehrmalige Verschiebung des ENVISAT-Starts, wegen der auch die Validationskampagnen entsprechend verschoben werden mussten. Darüber hinaus war (und ist) die Qualität der operationellen SCIAMACHY-Produkte so unbefriedigend, dass eine sinnvolle Validation erst gegen Ende des Projektes und für ausgewählte Spurengase möglich wurde.

Der grobe Ablauf des Projektes ist in Tabelle 1 skizziert. Während im ersten Teil des Projektes der Aufbau des Instrumentes und die Integration in die DLR-Falcon im Vordergrund stand, begann im zweiten Teil die Entwicklung fortgeschrittener Auswertelgorithmen. Dabei lag der Schwerpunkt auf unterschiedlichen Verfahren zur Ableitung von Vertikalinformation, wobei zum Einen die verschiedenen Blickrichtungen, zum Anderen Messungen bei verschiedenen Wellenlängen verwendet wurden. Nach der Durchführung der beiden sehr zeitintensiven Messkampagnen wurde zunächst eine Standard-Auswertung vorgenommen, und parallel dazu die innovativen Algorithmen weiter verfeinert und in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Im letzten Teil des Projektes wurden SCIAMACHY-Daten validiert, wobei allerdings - wie schon erwähnt- aufgrund der unbefriedigenden Datenlage nur Teilaspekte bearbeitet werden konnten.

09.2000 - 06.2001	Konstruktion und Aufbau des AMAXDOAS Instrumentes, Integration in die DLR-Falcon
05.2001	Erster technischer Testflug
07.2001 - 12.2001	Fertigstellung des Instrumentes, Flugzulassung, Testmessungen vom Boden aus
01.2002 - 06.2002	Mehrere Testflüge
07.2002 - 12.2002	Erste ENVISAT Validationskampagne, erste Datenauswertung
01.2003 - 06.2003	Zweite ENVISAT Validationskampagne, EUPLEX Kampagne, Fortführung Datenauswertung
07.2003 - 12.2003	Entwicklung eines Profilretrievals aus AMAXDOAS-Daten, Vergleich der AMAXDOAS-Messungen mit GOME Daten
01.2004 - 06.2004	Entwicklung eines Verfahrens zur Ableitung von Vertikalinformation aus Messungen bei verschiedenen Wellenlängen, Fortführung der Auswertung
07.2004 - 12.2004	Validation von troposphärischen NO <sub>2</sub> -Säulen von SCIAMACHY, Vorbereitung des Endberichtes

**Tabelle 1: Übersicht über den Projektablauf**

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Obwohl das AMAXDOAS für das Projekt neu entwickelt und konstruiert wurde, bauen sowohl das Instrument, als auch die Auswertung der Messdaten auf einer Reihe von existierenden Geräten und Algorithmen auf.

DOAS-Messungen vom Boden aus haben eine lange Tradition, und werden bereits seit über 30 Jahren zur Messung von stratosphärischem und troposphärischem NO<sub>2</sub> verwendet (z.B. Noxon 1975, Solomon et al., 1987). Seitdem wurden die Instrumente kontinuierlich weiter entwickelt, und eine Vielzahl von Messungen verschiedener Spurengase an Standorten in der ganzen Welt durchgeführt und veröffentlicht, unter anderem auch von der Universität Bremen

(Eisinger et al., 1997, Richter 1997, Richter et al., 1999, Winterrath et al., 1999, Wittrock et al., 2001) . Flugzeuggestützte DOAS-Geräte wurden bereits zwischen 1991 und 1995 erfolgreich auf der TRANSALL eingesetzt (z.B. Wahner et al., 1989a und 1989b, Schiller et al., 1990, Wahner et al. 1990a und 1990b, Erle et al., 1999; Pfeilsticker and Platt, 1994). Diese Messungen erfolgten in eine Blickrichtung und waren auf den Nachweis von stratosphärischen Spurengasen ausgerichtet. In jüngerer Zeit gab es aber auch Instrumente, die nicht oder nicht nur in Zenitblickrichtung messen, sondern auch andere Blickrichtungen (Nadir, Horizontbeobachtung) verwenden, um Informationen über troposphärische Spurengase oder die Konzentration in Flughöhe abzuleiten. (McElroy et al., Petritoli et al., 2002, Melamed et al., 2003).

Die Methode der Differentiellen Optischen Absorptionsspektroskopie (DOAS) wurde schon von Noxon (1975) verwendet, und wurde in den darauf folgenden Jahren sowohl für aktive (z.B. Platt 1994), als auch für passive Absorptionsmessungen (Solomon et al., 1987) in der Atmosphäre verwendet. Insbesondere werden auch die Messungen von GOME und SCIAMACHY mit Hilfe der DOAS-Methode ausgewertet (Burrows 1999, Bovensmann 1999) . Eine der Grundideen von DOAS ist die Trennung der Bestimmung der integrierten Absorption entlang des Lichtweges und die Berücksichtigung der Lichtwegverlängerung. Zur deren Berücksichtigung werden so genannte Airmass-Faktoren bestimmt, indem der Strahlungstransport zwischen Sonne und Messgerät modelliert wird. Die dazu notwendigen Programme waren zu Beginn des Projektes bereits verfügbar (Rozanov et al., 1997), mussten jedoch noch an die spezielle Geometrie der AMAXDOAS-Messungen angepasst werden.

Die Ableitung von Profilinformatoren aus DOAS-Messungen ist eine für Bodenmessungen bereits etablierte Methode (z.B. Preston et al., 1997). Dabei wird die Änderung der vertikalen Empfindlichkeit bei einer Änderung des Sonnenstandes verwendet. Für die Messungen des AMAXDOAS sind jedoch Änderungen des Lichtweges unter verschiedenen Blickwinkeln bei gleichem Sonnenstand von Interesse, sodass die existierenden Methoden nicht unmittelbar übernommen werden konnten. Die Messgeometrie ist der von Limb-Messung mit SCIAMACHY ähnlich, für die zum Zeitpunkt der Antragstellung Auswertalgorithmen allerdings erst entwickelt wurden. Die zur Inversion verwendete Methode der Optimal Estimation (Rodgers 1976, 1990, 2000) ist eine Standardmethode die in einer Vielzahl von früheren Arbeiten verwendet wurde.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in allen Phasen in enger Kooperation mit dem Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg durchgeführt. Das AMAXDOAS-Instrument besteht aus zwei Teilen, dem UV-Kanal (Uni Bremen) und dem vis-Kanal (Uni-Heidelberg), Auch die Entwicklung der Auswertung und die Durchführung der Flüge erfolgte in enger Kooperation.

Die Konstruktion der Flugzeigracks und die Integration des AMAXDOAS-Instruments auf der DLR-Falcon erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Flugbetrieb der DLR-Oberpfaffenhofen. Die Gesamtkoordination der Flüge und der Messungen auf der Falcon erfolgte durch das IAP der DLR-Oberpfaffenhofen.

Innerhalb der Universität Bremen gab es eine enge Kooperation zwischen den beiden DOAS-Validationsprojekten sowie mit der SCIAMACHY-Arbeitsgruppe, von der wissenschaftliche Datenprodukte aus SCIAMACHY-Daten bereitgestellt wurden.

Im Rahmen des europäischen Projektes FORMAT ([www.nilu.no/Format](http://www.nilu.no/Format)) wurde das AMAXDOAS-Instrument zur Messung von Formaldehyd und Stickstoffdioxid als Ursachen von Sommersmog eingesetzt. Das AMAXDOAS Instrument wurde hierzu in eine Partenavia 68 eingebaut, um mit langsamer Fluggeschwindigkeit und in niedrigen Höhen die Abluffahnen einzelner Punktquellen, wie Kraftwerke oder ganzer Städte, messen zu können. Die Messflüge wurden zeitlich und räumlich mit zwei weiteren Flugzeugen (dem Ultraleicht vom

IFU und der Dimona von der Schweizer Firma Metair) koordiniert. Durch die Zusammenarbeit konnten zusätzliche Messdaten gewonnen werden, die auch zur Validation von SCIAMACHY-Datenprodukten zur Verfügung stehen.

Am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg wurde im gleichen Zeitraum unter Leitung von I. Pundt an einem Projekt zur kleinräumigen Verteilung von Spurengasen geforscht. Hierbei werden die durch verschiedene Lichtstrahlen gemessenen Säulendichten mittels mathematischer Verfahren ähnlich der Tomographie invertiert um daraus die genaue Konzentrationsverteilung zu errechnen. Eine enge Zusammenarbeit mit dem DOAS-Tomographie Projekt war von Beginn der beiden Projekte an möglich, und überaus erfolgreich.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

#### 2.1.1 Entwicklung des AMAXDOAS Instruments



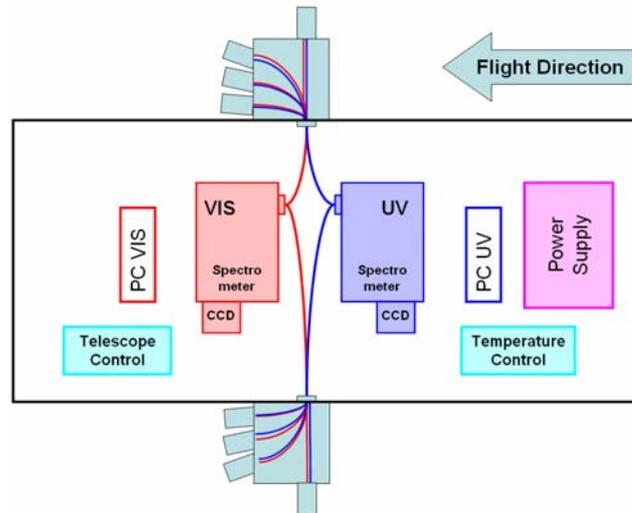
**Abbildung 1: Die DLR-Falcon und die Blickrichtungen der Instrumente während der SCIA-VALUE Kampagnen**

Zu Beginn des Projektes musste das AMAXDOAS-Instrument entwickelt und konstruiert werden. Dabei waren eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen:

- Abdeckung des Spektralbereiches von 320 - 560 nm bei einer spektralen Auflösung von 0.5 - 1 nm
- Simultane Messung in bis zu 10 Blickrichtungen
- Gute thermische Stabilität
- Hoher Lichtdurchsatz
- Geringes Gewicht und Volumen
- Flugzulassung

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Gerät mit zwei getrennten Acton 300i Gitterspektrometern konzipiert, die jeweils über einen gekühlten 2-dimensionalen CCD-Detektor verfügen. Die beiden Spektrometer sind thermisch isoliert und werden über eine Heizung thermostatisiert. Das Licht wird über insgesamt vier Quarzfaserbündel eingekoppelt, die sich auf einer Seite jeweils in mehrere Enden aufteilen, während sie auf der anderen Seite in Form eines Spaltes angeordnet sind. Jeweils zwei Quarzfaserbündel werden an den spaltförmigen Enden zusammengefügt und vor dem Eingangsspalt eines Spektrometers befestigt. Die anderen Enden führen zu den einzelnen Teleskopen, die oberhalb und unterhalb des Flugzeuges angebracht sind. Je nach Fragestellung können dabei verschiedene Lichtleiterkonfigurationen verwendet werden, die zwischen zwei und 10 simultane Blickrichtungen ermöglichen. Die Teleskope sind in Aluminiumtöpfen außerhalb des Flugzeuges angebracht, und verfügen jeweils über eine Quarzlinse mit 42 mm Brennweite um das Gesichtsfeld auf ca.  $0.2^\circ$

einzuschränken. Zusätzlich befindet sich in jedem Einzelteleskop ein Shutter, mit dem es bei direkter Sonneneinstrahlung verschlossen werden kann. Eine solche Vorrichtung ist notwendig um Teleskop und Detektor vor Beschädigungen zu schützen.

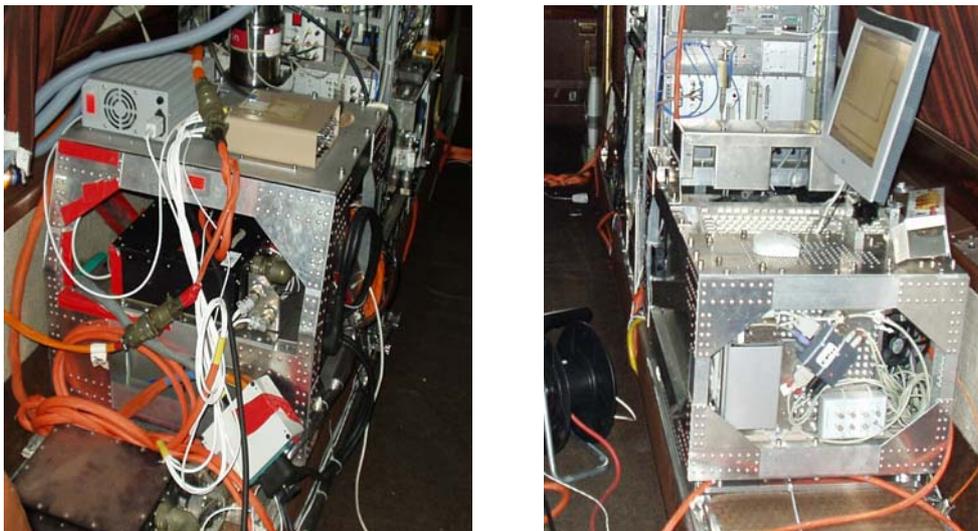


**Abbildung 2: Blockdiagramm des AMAXDOAS Instruments, hier für 8 Blickrichtungen.**

Um eine gute Nachweisgrenze zu erreichen, muss das AMAXDOAS möglichst stabil betrieben werden und das Instrument gut charakterisiert werden. Um dies zu erreichen wurden

- die Spektrometer thermostatisiert
- eine unterbrechungsfreie Stromversorgung eingebaut
- vor und nach jedem Flug Kalibrationsmessungen durchgeführt

Die unterbrechungsfreie Stromversorgung ist deshalb notwendig, weil in der Falcon üblicherweise die Stromversorgung während des Tankvorgangs vor dem Start aus Sicherheitsgründen unterbrochen wird, und abhängig vom Standort die Stromversorgung nicht lange genug vor dem Start eingeschaltet werden kann. Da das AMAXDOAS jedoch einen längeren Vorlauf (mehrere Stunden) zum Erreichen der vollen thermischen Stabilität benötigt, ist eine unabhängige Stromversorgung notwendig.

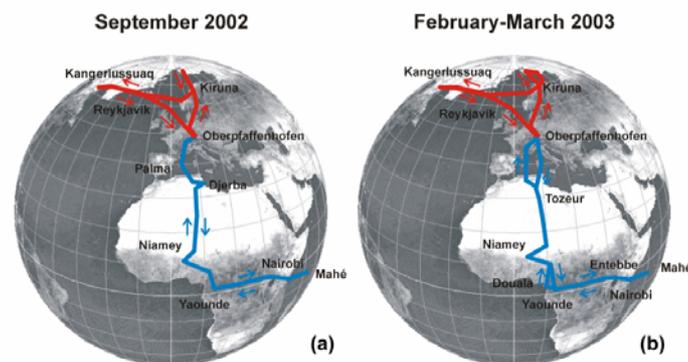


**Abbildung 3: Das AMAXDOAS Instrument in der DLR-Falcon. Links die Stromversorgung und Kontrolleinheit für die Teleskope, rechts das eigentliche Gerät mit Spektrometern, Detektoren und Computern.**

Der Messbetrieb des AMAXDOAS ist vollständig automatisiert, wobei die beiden Teilsysteme (UV / vis) unabhängig voneinander betrieben werden. Das hat den Vorteil, das einerseits die beiden Geräte auch getrennt voneinander eingesetzt werden können, und andererseits die Belichtungszeiten (die im UV deutlich länger sind als im vis) getrennt bestimmt werden können. Zusätzlich zu den eigentlichen Messdaten wurden auch Flugdaten (Zeit, Position, Roll- und Neigungswinkel usw.) von der Datenerfassung der Falcon übernommen und protokolliert. Während der Flüge war in der Regel ein AMAXDOAS-Wissenschaftler an Bord und konnte die Datenaufnahme am Bildschirm kontrollieren und bei Bedarf auch Probleme beheben.

Vor dem Einsatz des AMAXDOAS wurde das Instrument auf Stabilität, Linearität der Detektoren und Streulichtunterdrückung untersucht. Die Kalibrationsmessungen während der Kampagnen bestanden aus Messungen des Dunkelsignals, Messungen eines Linienspektrums und der Aufnahme des Spektrums einer Weißlichtlampe. Zusätzlich wurde vor den großen Kampagnen noch eine detaillierte Vermessung der Spaltfunktion durchgeführt. Dazu wurde das Spektrum einer Linienlampe bei einer Reihe von unterschiedlichen Gitterpositionen aufgenommen.

### 2.1.2 SCIA-VALUE Kampagnen



**Abbildung 4: Flugrouten während der beiden SCIA-VALUE Kampagnen im September 2002 (links) und Februar-März 2003 (rechts). Beide Kampagnen hatten einen Nord- und einen Südteil. Details der Flugplanung können Tabelle 2 entnommen werden.**

Nach mehreren technischen Testflügen wurden im September 2002 und im Februar / März 2003 zwei große SCIA-VALUE (SCIAMACHY VALidation and Utilization Experiment) Kampagnen mit insgesamt 113 Flugstunden durchgeführt (Fix et al., 2005). Ziel der Kampagnen war es,

- möglichst viele SCIAMACHY Messungen zu unterfliegen
- einen möglichst geringen zeitlichen Abstand zu den SCIAMACHY-messungen zu erreichen
- eine möglichst große geographische Breite zu überdecken
- mehre Längenschnitte zu fliegen
- Messungen in zwei verschiedenen Jahreszeiten zu validieren
- möglichst viele verschiedene Situationen zu untersuchen (Wüste, Wasser, Vegetation, Eis, sauber, verschmutzt, ...)

Die Kampagnen verliefen sehr erfolgreich, und bis auf wenige Ausnahmen war das AMAXDOAS Instrument in Betrieb und nahm Messungen auf. Probleme gab es während der Südkampagnen durch vorübergehende Überhitzung in der Falcon, was zeitweise zum Verlust der Temperaturstabilität und in einem Fall auch zur Notabschaltung eines der Messcomputer führte. Ähnliche Probleme hatten in diesen Flugabschnitten alle Messgeräte an Bord. Wäh-

rend einiger kurzer Teile der Nordkampagnen waren einzelne Teleskope von innen vereist da die Teleskopheizung nicht ausreichte um Kondensation zu verhindern.

Date	Orbit	Crossed Orbit Index	Flight Leg	Departure [UTC]	Arrival [UTC]
<b>Northern Part</b>					
2002-09-03	2667	10,11,12	Oberpfaffenhofen - Kiruna	08:00	10:30
2002-09-04	2685, 2686	7,5	Kiruna - Ny-Ålesund - Kiruna	16:00	19:30
2002-09-05	2696, 2697	10,11	Kiruna - Keflavik	10:00	13:00
2002-09-06	2712, 2713	10, 11	Keflavik - Kangerlussuaq	12:50	15:00
2002-09-07	2726, 2727	10	Kangerlussuaq - Keflavik	12:30	14:30
2002-09-07	2730	Solar Occ. 61.8° lat., 351.9° lon.	Keflavik - Oberpfaffenhofen	18:20	22:00
<b>Southern Part</b>					
2002-09-15	2839	12	Oberpfaffenhofen - Mallorca	09:15	11:00
2002-09-17	2867	13-17	Mallorca - Yaounde	05:45	15:30
2002-09-18	2880, 2881	17,18	Yaounde - Nairobi	08:30	11:30
2002-09-19	2894	18,19	Nairobi - Mahé	05:00	07:30
2002-09-24	2966	17,18	Mahé - Nairobi	06:30	08:30
2002-09-25	2981	17,18	Nairobi - Yaounde	06:30	09:45
2002-09-26	2996	13-16	Yaounde - Mallorca	05:30	15:00
2002-09-28	3025	11,12	Mallorca - Oberpfaffenhofen	09:30	11:00

Date	Orbit	Crossed Orbit Index	Flight Leg	Departure [UTC]	Arrival [UTC]
<b>Southern Part</b>					
2003-02-19	5086	11	Basel - Tozeur	8:00	10:30
2003-02-20	5100	xx	Tozeur - Niamey - Yaounde	7:30	15:00
2002-02-23	5142	16	Yaounde - Entebbe - Nairobi	8:30	13:45
2003-02-24	5156	17	Nairobi - Mombasa - Mahé	9:00	15:00
2003-02-26	5184	17	Mahé - Nairobi	6:30	9:00
2003-02-28	5214	16	Nairobi - Douala	7:45	12:00
2003-03-01	5229	13-16	Douala - Niamey - Tozeur	4:15	11:30
2003-03-03	5258	11	Tozeur - Oberpfaffenhofen	8:30	12:20
<b>Northern Part</b>					
2003-03-10	5358	9, 10	Oberpfaffenhofen - Kiruna	9:45	12:45
2003-03-12	5387	7, 8	Kiruna - Ny-Ålesund - Kiruna	7:30	11:15
2003-03-13	5402	9	Kiruna - Keflavik	9:30	13:15
2003-03-14	5417 5418	9 9	Keflavik - Kangerlussuaq	12:00	15:45
2003-03-15	5433	xx	Kangerlussuaq - Keflavik	13:00	15:00
2003-03-17	5459	xx	Keflavik - Oberpfaffenhofen	10:30	14:15
2003-03-19	5487	10, 11	Oberpfaffenhofen - Oberpfaffenhofen	7:15	11:00

xx: SCIAMACHY not operating

**Tabelle 2: Übersicht über die beiden SCIA-VALUE Kampagnen und SCIAMACHY Orbits die unterflogen wurden. Der Orbit Index bezieht sich auf SCIAMACHY Limb-Messungen; die Zahl der unterflogenen Nadir-Messungen ist wesentlich größer.**

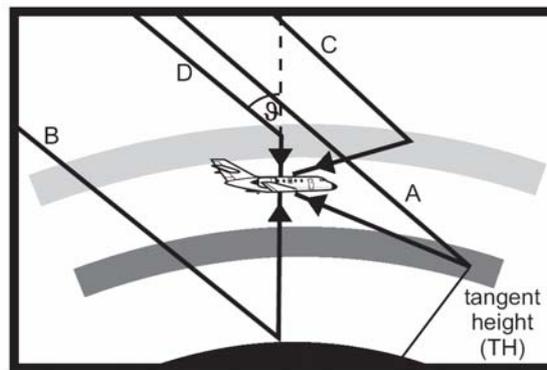
### 2.1.3 Sensitivitätsstudien Profilretrieval

AMAXDOAS Messungen unterscheiden sich von bisherigen DOAS-Messungen vom Flugzeug darin, dass Messungen in verschiedene Blickrichtungen aufgenommen werden. Mit Hilfe dieser Messgeometrie lassen sich bei einer Flughöhe in der Gegend der Tropopause Informationen über die Vertikalverteilung von Absorbern ableiten, eine wichtige Zusatzinformation besonders bei der Validation von troposphärischen Datenprodukten.

Während die Messungen in den Zenit fast ausschließlich durch Absorptionen in der Stratosphäre beeinflusst werden, liefert die Nadir-Messung die atmosphärische Gesamtsäule (die Photonen durchlaufen sowohl die obere, als auch die untere Atmosphäre). In erster Näherung lässt sich also aus der Differenz von Zenit- und Nadir-Messung die troposphärische Säule bestimmen. Eine quantitativere Diskussion der Bestimmung der troposphärischen Säule wird in Abschnitt 2.1.5 gegeben.

Durch die Verwendung von Blickrichtungen, die näher zum Horizont gerichtet sind, kann zusätzliche Vertikalinformation abgeleitet werden. Der physikalische Effekt ist ein verlängerter Lichtweg in den Luftschichten zwischen Instrument und letzter Streuung (siehe Abbildung 5). Je flacher der Beobachtungswinkel, desto länger der Lichtweg und desto dünner die Schicht für die die Messung besonders sensitiv ist. Deshalb sind diese Messungen besonders empfindlich für Absorptionen in der Nähe der Flughöhe und bei guter Sicht (keine Wolken, geringe Aerosolbelastung). Die Messungen in dem unteren Halbraum unterscheiden sich dabei prinzipiell von denen in dem oberen Halbraum da die Luftdichte und damit die Streuwahrscheinlichkeit exponentiell mit der Höhe abnimmt. Deshalb ist bei gleichem relativen Winkel

zum Horizont der Lichtweg für die Blickrichtungen nach unten wesentlich länger als für Blickrichtungen nach oben, und damit auch der Informationsgehalt auch höher. Die nach unten gerichteten Messungen lassen sich mit Limb-Messungen vom Satelliten vergleichen, jedenfalls für die Blickrichtungen, die nicht auf die Erdoberfläche sehen. Messungen die den Boden sehen tragen vergleichsweise wenig Vertikalinformationen bei, da der Lichtweg durch alle Luftschichten unterhalb des Messgerätes (zumindest in Einfachstreu-Approximation) gleich ist. Je nach verwendeter Wellenlänge ergeben sich jedoch Unterschiede, die in Abschnitt 2.1.5. diskutiert werden.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung der Lichtwege beim AMAXDOAS: Die Nadir-Blickrichtung (B) erfasst sowohl Informationen aus den oberen, als auch den unteren Atmosphärenschichten, während die Zenitblickrichtung (D) vornehmlich Informationen von oberhalb des Flugzeuges enthält. Die schrägen Blickrichtungen (A, C) haben besonders hohe Sensitivität in den Schichten oberhalb bzw. unterhalb des Flugzeuges, wobei der Effekt für die nach unten blickenden Teleskope stärker ausgeprägt ist.

Der hier qualitativ diskutierte Informationsgehalt der Messungen lässt sich formal durch die Methode der Optimal Estimation erfassen. Dabei werden vor allem drei Größen betrachtet: Die Gewichtsfunktionen, die Averaging Kernels und der Retrievalfehler.

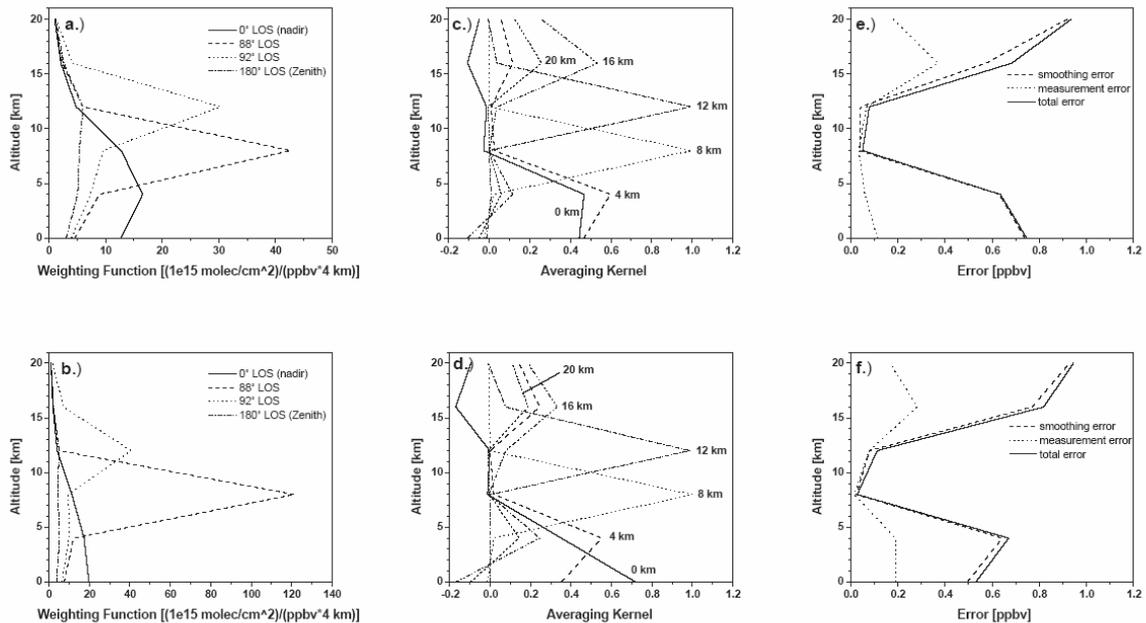
Die Gewichtsfunktionen geben an, wie die Sensitivität einer Messung in Richtung  $x$  zu einer bestimmten Absorbermenge  $y$  von der Höhe  $h$ , in der sich der Absorber befindet, abhängt. Nur wenn sich die Gewichtsfunktionen der verschiedenen Blickrichtungen ausreichend voneinander unterscheiden, kann vertikale Information abgeleitet werden. Die Gewichtsfunktionen hängen von der Messgeometrie und den Bedingungen des Strahlungstransfers (Wellenlänge, Albedo, Aerosolgehalt, ...) ab, sind aber vom Inversionsalgorithmus unabhängig.

Die Averaging Kernels geben an, wie die vom Profilretrieval ermittelte Absorberkonzentration in einer Höhe von der tatsächlichen Absorberkonzentration in allen Höhen abhängt. Der Averaging Kernel sollte also eine möglichst kleine Halbwertsbreite haben, sein Maximum auf der Höhe der jeweiligen Schicht haben und im Maximum möglichst nahe bei 1 liegen. Die Halbwertsbreite der Averaging Kernels wird oft als Maß der Höhenauflösung verwendet. Im Gegensatz zur Gewichtsfunktion sind die Averaging Kernels abhängig von den in der Profilinversion gemachten Annahmen.

Da die meisten Inversionsprobleme unterbestimmt sind, werden bei der Optimal Estimation zusätzliche *a priori* Informationen verwendet, um aus den möglichen Lösungen die physikalisch sinnvollste zu ermitteln. Diese *a priori* Information hat einen Einfluss auf das Endergebnis, und muss deshalb zusätzlich zu den Fehlern durch die Messung, das Vorwärtsmodell und die Inversion im Gesamtfehler berücksichtigt werden.

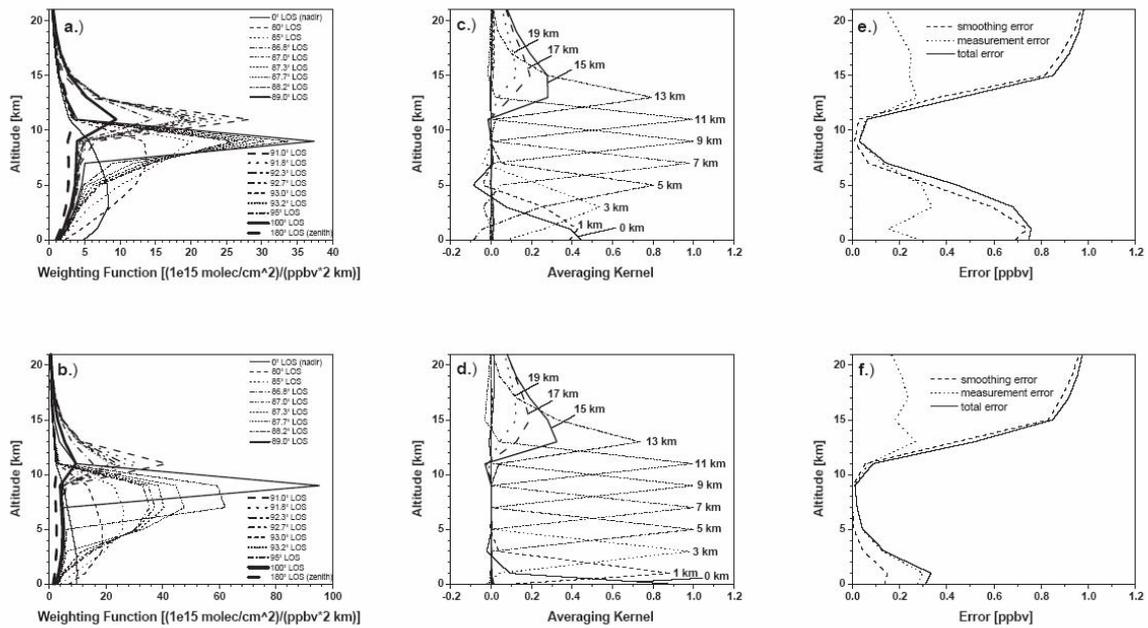
Im Rahmen des Projektes wurde die Profilinversion aus AMAXDOAS-Daten im Detail untersucht. Die Ergebnisse sind in einer Doktorarbeit zusammengefasst (M. Bruns, 2004), die diesem Bericht beiliegt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden inzwischen publiziert (Bruns et al.,

2004); die Publikation ist ebenfalls beigelegt. Im folgenden werden nur exemplarisch die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

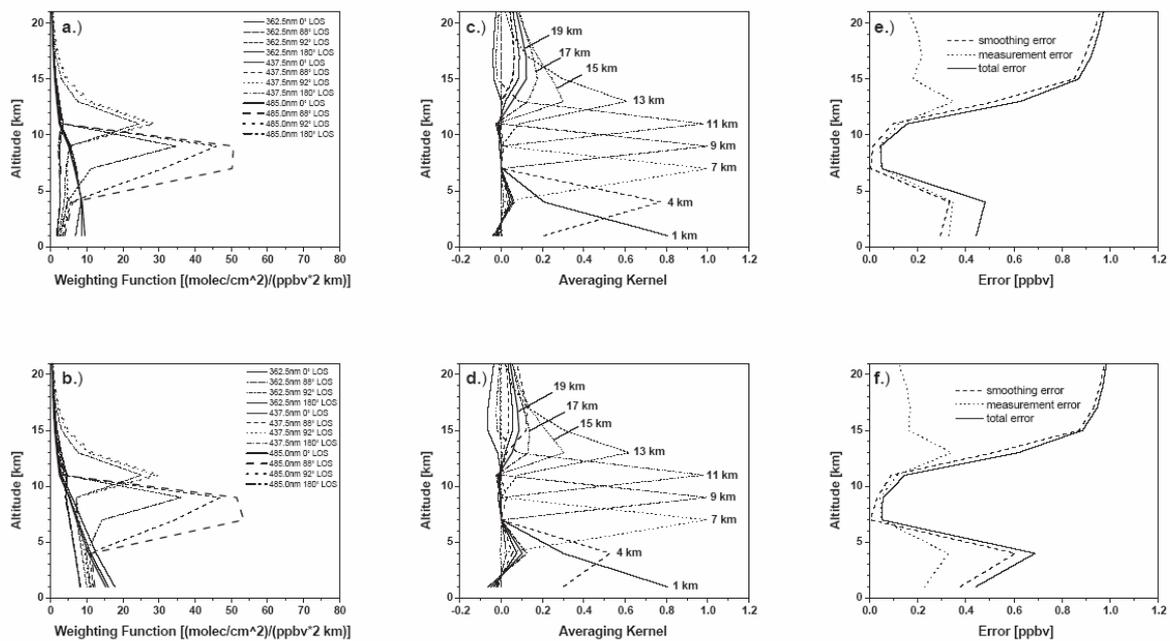


**Abbildung 6: Gewichtungsfunktionen, Averaging Kernels und Retrieval Error für AMAXDOAS NO<sub>2</sub>-Messungen mit 4 Blickrichtungen. Die oberen Abbildungen zeigen Ergebnisse für 350 nm, die unteren für 500 nm.**

Ein Beispiel für die Ergebnisse ist in Abbildung 6 gezeigt. Bei vier Blickrichtungen (Nadir, Zenit und jeweils 2° oberhalb und unterhalb des Horizonts) lassen sich 3 - 4 unabhängige Informationen ableiten, wobei bei größeren Wellenlängen die Empfindlichkeit in der unteren Atmosphäre besser ist. Die Vertikalaufösung lässt sich wesentlich verbessern, wenn weitere Blickrichtungen hinzugefügt werden. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse für 18 Blickrichtungen dargestellt. Mit einem solchen Aufbau ließen sich bis zu 8 vertikale Schichten unterscheiden. Der Nachteil einer so großen Zahl von Blickrichtungen ist allerdings, dass zumindest mit dem existierenden AMAXDOAS-Instrument nur noch sehr wenig Licht pro Blickrichtung zur Verfügung stände, und damit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis relativ schlecht werden würde. Wie in Abbildung 6 und Abbildung 7 schon gezeigt, hängt die Empfindlichkeit aber auch von der Wellenlänge ab, und durch geschickte Kombination von 4 Blickrichtungen und drei Wellenlängen lässt sich die Höhenauflösung auf 6 Schichten vergrößern ohne mehr Blickrichtungen zu benötigen (Abbildung 8). Diese Konfiguration hat sich für die Messungen mit dem AMAXDOAS als optimal herausgestellt.



**Abbildung 7: Gewichtsfunctonen, Averaging Kernels und Retrieval Error für AMAXDOAS NO<sub>2</sub>-Messungen mit 18 Blickrichtungen. Die oberen Abbildungen zeigen Ergebnisse für 350 nm, die unteren für 500 nm.**



**Abbildung 8: Gewichtsfunctonen, Averaging Kernels und Retrieval Error für AMAXDOAS NO<sub>2</sub>-Messungen mit 4 Blickrichtungen und 3 Wellenlängen. Die oberen Abbildungen wurden für eine Albedo von 0.1 gerechnet, die unteren für eine Albedo von 0.9**

Eine ganze Reihe von Parametern hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der abgeleiteten Profile. Detaillierte Sensitivitätsstudien sind in (Bruns, 2004) zu finden. Die Hauptergebnisse sind:

- die vertikale Auflösung in Flughöhe verbessert sich bei Verwendung von UV Wellenlängen, die Empfindlichkeit zu tieferen Schichten nimmt hingegen bei sichtbaren Wellenlängen zu
- eine höhere Albedo verbessert die Empfindlichkeit der UV-Messungen

- stärkere Aerosol-Extinktion verbessert (bei angemessener Berücksichtigung im Retrieval) die vertikale Auflösung bei Auswertungen im sichtbaren Wellenlängenbereich
- der Einfluss des Sonnezenitwinkels auf die vertikale Auflösung ist unterhalb von  $85^\circ$  gering
- die Vertikalauflösung nimmt mit abnehmender Flughöhe ab; bei 2 km Flughöhe kann kaum noch Vertikalinformation abgeleitet werden.
- die Vertikalauflösung nimmt mit der Anzahl der verwendeten Blickrichtungen zu, kann aber auch durch einen kombinierten Retrieval bei mehreren Wellenlängen verbessert werden
- Die Wahl des Gitters auf dem der Retrieval durchgeführt wird ist kritisch und muss auf die jeweilig verwendete Anzahl von Blickrichtungen und Wellenlängen angepasst werden, um Instabilitäten einerseits (bei zu feinem Gitter) und Informationsverlust andererseits (bei zu grobem Gitter) zu vermeiden.

### 2.1.4 Anwendungen Profilvertrieval

Als eine erste Anwendung des Profilvertrievals wurden Daten des sehr klaren Fluges vom 19. Februar 2003 von Basel nach Tozeur (Tunesien) ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Bruns et al., 2005 beschrieben (Veröffentlichung in Vorbereitung, liegt bei) und werden hier nur kurz zusammengefasst.

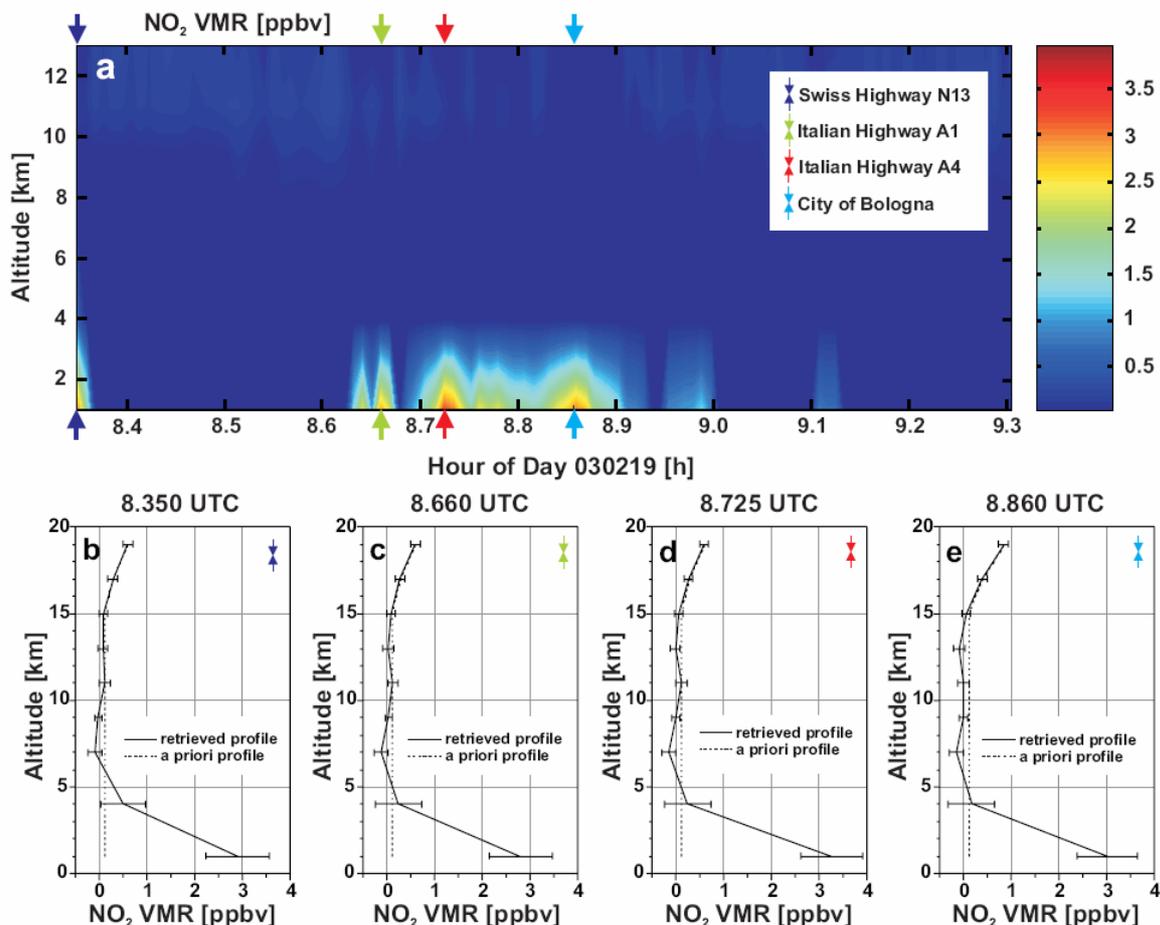
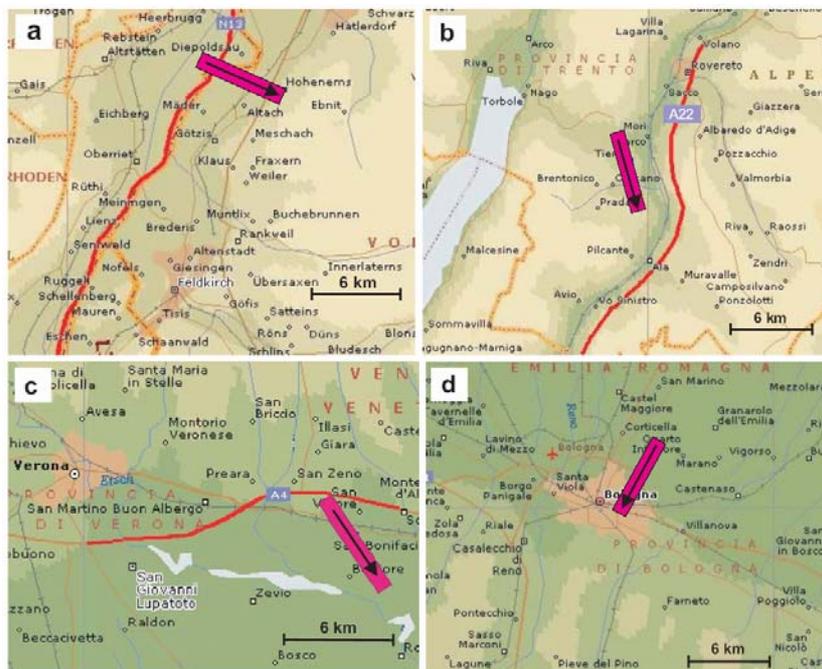


Abbildung 9: NO<sub>2</sub> Profile aus AMAXDOAS-Messungen vom 19.2.2003 von Basel nach Tozeur (Tunesien). Vier exemplarische Profile über der Schweiz und Italien sind einzeln dargestellt. Die farbigen Pfeile zeigen die jeweilige Position im Übersichtsbild (siehe auch Abbildung 10); die gestrichelten Linien sind das verwendete *a priori* Profil.

In Abbildung 9 sind alle für diesen Flug ausgewerteten NO<sub>2</sub> Profile als Konturplot dargestellt. Über mehreren Gebieten in der Schweiz und in Italien lassen sich klar erhöhte NO<sub>2</sub> Werte in den untersten Schichten erkennen. Wie an den exemplarischen Einzelprofilen zu sehen ist, liegen die Werte für die unterste Schicht bei ca. 3 ppb und sind deutlich oberhalb der Fehlergrenzen von ca.  $\pm 0.5$  ppb. Am Tag der Messung befand sich ein großer Teil Europas unter dem Einfluss eines Hochdrucksystems („Helga“) über Skandinavien, das eine stabile Inversion mit entsprechender Akkumulation von Luftverschmutzung in der Grenzschicht bewirkte. Dies ist sicherlich einer der Gründe, warum alle NO<sub>2</sub> Werte über dem Rheintal und der Po-Ebene so hoch lagen. In allen Fällen mit erhöhtem NO<sub>2</sub> in der Grenzschicht war entweder eine Stadt oder eine Autobahn in unmittelbarer Nähe (siehe Abbildung 10), so dass davon ausgegangen werden kann, dass Stickoxidemissionen aus dem Autoverkehr die Hauptquelle der beobachteten Verschmutzung waren.

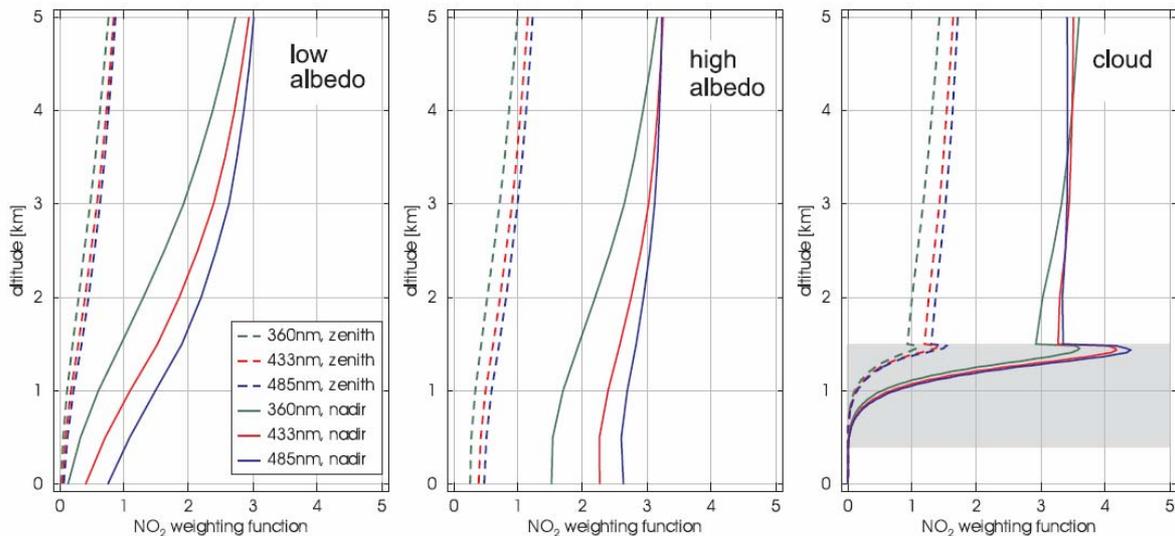
Eine Nadir-Auswertung desselben Fluges wurde auch zur Validation der troposphärischen NO<sub>2</sub>-Messungen von SCIAMACHY verwendet (siehe Abschnitt 2.1.8).



**Abbildung 10: Details der AMAXDOAS-Pixel für die in Abbildung 9 dargestellten NO<sub>2</sub>-Profile**

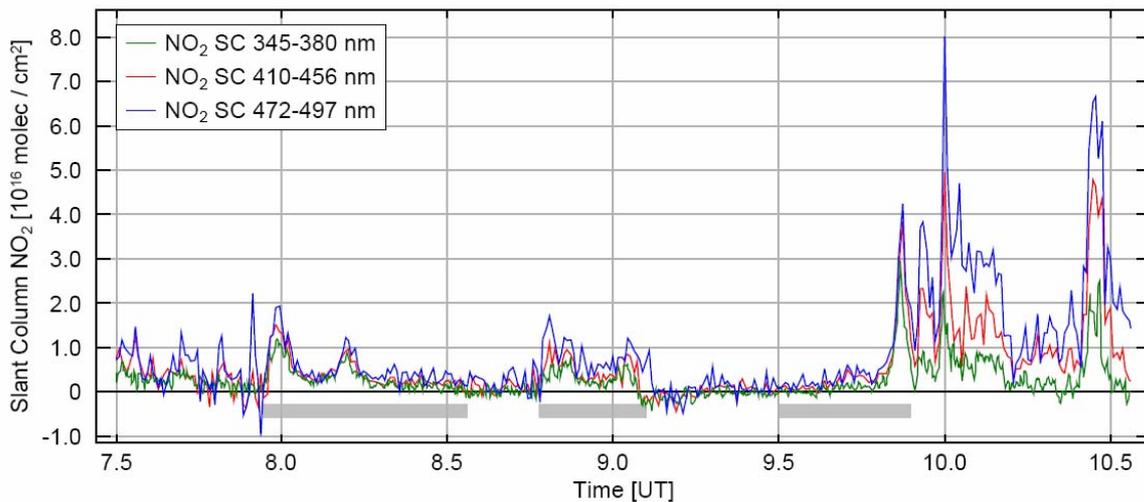
### 2.1.5 Algorithmenentwicklung Wellenlängenmethode

Eine Profilinversion aus AMAXDOAS-Daten ist in vielen Situationen die optimale Auswertung. Sie stellt jedoch erstens hohe Anforderungen an das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und wird deshalb auf gemittelten Daten ausgeführt, und kann zweitens nur in wolkenfreien Situationen angewendet werden. Eine direkte Auswertung von Nadir- und Zenit-Messungen erlaubt eine höhere räumliche Auflösung und kann - zumindest prinzipiell - auch über Wolken erfolgen. Durch die Verwendung von NO<sub>2</sub>-Messungen bei unterschiedlichen Wellenlängen lässt sich aus diesen Messungen sogar die Höhe der NO<sub>2</sub>-Absorption abschätzen. Im Rahmen des Projektes wurde die dafür benötigte Methodik entwickelt, und mit einer ersten Anwendung in einer Veröffentlichung (Wang et al., 2004, liegt bei) ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden deshalb nur die wichtigsten Ergebnisse wiedergegeben.



**Abbildung 11: Gewichtungsfunktionen für NO<sub>2</sub>-AMAXDOAS-Messungen unter unterschiedlichen Bedingungen. Im linken Bild wurde die Bodenalbedo für 360, 433 und 485 nm auf für den jeweiligen Wellenlängenbereich typische Werte 2, 5 und 8% gesetzt, während in der Mitte eine Albedo von 0.8 angenommen wurde. Im rechten Bild ist die Situation in Anwesenheit einer Wolke mit optischer Dicke 25 (grau schattierter Bereich) dargestellt. Gestrichelte Linien stehen jeweils für die Zenit-Messungen, durchgezogene Linien für Nadir-Messungen. Die Farben unterscheiden die verschiedenen Wellenlängen.**

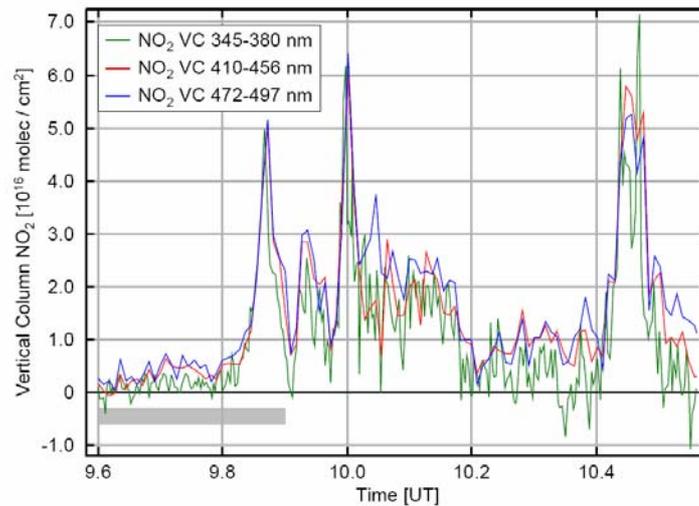
Wenn man den Lichtweg der in Nadir-Blickrichtung gemessenen Photonen nur mit Reflektion am Boden und ohne atmosphärische Streuung betrachtet, so sollte (wenn man von kleinen sphärischen Effekten absieht) die Empfindlichkeit für alle Höhenschichten gleich sein. Berücksichtigt man jedoch dass die Oberfläche in den meisten Situationen relativ dunkel ist, und dass atmosphärische Streuung nicht vernachlässigt werden kann, so nimmt die Empfindlichkeit der Messung zur Oberfläche hin deutlich ab. Das kann anschaulich so verstanden werden, dass Photonen, die zum Beispiel in 3 km Höhe gestreut werden, keine Information über die darunter liegenden Schichten haben. Dieser Effekt ist um so ausgeprägter, je geringer die Bodenalbedo ist (der relative Beitrag der gestreuten Strahlung ist hoch) und je weiter die Wellenlänge im UV liegt (der Rayleigh-Streuquerschnitt ist proportional zu  $\lambda^{-4}$ ). Diese Zusammenhänge sind anhand von SCIATRAN Modellrechnungen in Abbildung 11 illustriert. Wie dem linken Teilbild zu entnehmen ist, ist über dunklen Oberflächen das Verhältnis der Empfindlichkeiten bei 485 und 360 nm für den untersten Kilometer größer als 2, während der Unterschied in 4 km Höhe lediglich 20% beträgt. Aus den relativen Größen der NO<sub>2</sub>-Signale bei verschiedenen Wellenlängen sollte sich also eine typische Höhe für die Absorptionsschicht ableiten lassen. Wie die mittlere Abbildung zeigt, ist dieser Effekt über hellen Oberflächen weitaus weniger ausgeprägt; hier ist die Annahme einer gleichmäßigen Empfindlichkeit eher gerechtfertigt. Wird die Bodenalbedo weiter erhöht (zum Beispiel über Eis), so kann durch Vielfachstreuung die Empfindlichkeit unmittelbar über dem Boden sogar erhöht sein (nicht gezeigt). Wenn sich nun unterhalb der Messung eine optisch dicke Wolke befindet, so nimmt - wie im rechten Teil von Abbildung 11 gezeigt - die Empfindlichkeit über der Wolke für alle Wellenlängen zu, hat in den obersten Schichten der Wolke ein Maximum und nimmt dann rasch ab um unterhalb der Wolke praktisch 0 zu sein. Interessant ist in Abbildung 11 auch das Verhalten der Zenitmessungen - entgegen der ersten Annahme ist die Empfindlichkeit für NO<sub>2</sub> unterhalb des Flugzeuges nicht 0, und kann insbesondere über hellen Oberflächen nicht vernachlässigt werden. Dieses Verhalten, das durch Mehrfachstreuung von Photonen aus der Grenzschicht nach oben und zurück in das Messgerät erklärt werden kann zeigt sich auch deutlich in den Messdaten (siehe Wang et al., 2005).



**Abbildung 12: Die Schräge NO<sub>2</sub>-Säulen in Nadir-Richtung während eines Teils des Fluges vom 19. März 2003. Die grauen Balken kennzeichnen Bereiche, in denen die Falcon über Wolken flog. Im klaren und verschmutzten letzten Teil des Fluges ist klar die Zunahme des Signals mit der Wellenlänge zu erkennen.**

Als eine Beispielanwendung sind in Abbildung 12 die schrägen NO<sub>2</sub>-Säulen in Nadir-Blickrichtung für einen Teil des Fluges vom 19. März 2003 dargestellt. Dieser Teil des Fluges befand sich über Holland, Belgien und Deutschland. Einige Abschnitte des Fluges waren über Wolken (graue Kästen), während einige Messungen unter sehr klaren Bedingungen stattfanden, insbesondere am Ende des dargestellten Zeitraums. Die Abbildung zeigt zwei interessante Punkte: i) Eine klare Aufspaltung der NO<sub>2</sub>-Säulen aus verschiedenen Wellenlängenbereichen und ii) wiederholt erhöhte NO<sub>2</sub>-Werte über Wolken. Der erste Effekt ist in Übereinstimmung mit den im letzten Absatz vorgestellten Sensitivitätsstudien, zumindest wenn das beobachtete NO<sub>2</sub> in den bodennahen Schichten konzentriert ist. Wenn man eine gut gemischte Grenzschicht annimmt, und die Grenzschichthöhe wie bei der Landung in Oberpfaffenhofen bei 1.3 km liegt, so lassen sich die schrägen Säulen aus Abbildung 12 in konsistente vertikale Säulen umrechnen (Abbildung 13). Die gute Übereinstimmung der vertikalen Säulen zeigt, dass das angenommene Profil realistisch ist, und wäre mit der Annahme eines anderen Vertikalprofils (z.B. einer gut gemischten Troposphäre) nicht zu erreichen. Dies demonstriert, dass schon die Nadirmessungen von AMAXDOAS Informationen über die vertikale Verteilung von NO<sub>2</sub> in der Troposphäre enthalten.

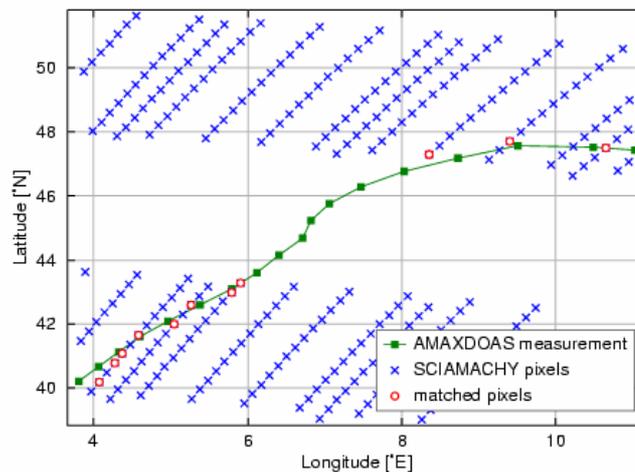
Die oben schon erwähnte Beobachtung von NO<sub>2</sub> über Wolken ist für die Interpretation und Validation von Satellitenmessungen von Interesse. Zwar können AMAXDOAS-Messungen keine Information über die NO<sub>2</sub>-Säule unter Wolken liefern, die Messungen aus Abbildung 12 zusammen mit den Empfindlichkeitsstudien aus Abbildung 11 zeigen aber klar, dass sich zumindest während dieses Fluges signifikante Mengen von NO<sub>2</sub> oberhalb bzw. innerhalb des oberen Teils der Wolke befanden. Dies widerspricht der manchmal gemachten vereinfachten Annahme, dass durch den Vergleich von unbewölkten und bewölkten Messungen die troposphärische NO<sub>2</sub>-Säule abgeschätzt werden kann, oder sogar aus unterschiedlichen Wolkenhöhen ein Profil abgeleitet werden kann („cloud slicing“). Auch bei der Interpretation von Satellitenmessungen mit gebrochener Bewölkung ergeben sich Schwierigkeiten, da durch die hohe Reflektivität der Wolke das Signal schon durch relativ kleine Wolken dominiert wird. Dadurch können in Situationen wie den in diesem Flug beobachteten NO<sub>2</sub> über Wolken zu stark gewichtet werden.



**Abbildung 13:** Letzter Teil des Fluges aus Abbildung 12, hier allerdings nach Anwendung der jeweiligen Airmass-Faktoren. Die Auftrennung nach Wellenlängen ist innerhalb der Fehler aufgehoben, was darauf hinweist, dass die gewählte  $\text{NO}_2$ -Vertikalverteilung realistisch war.

### 2.1.6 Validation von stratosphärischem $\text{O}_3$

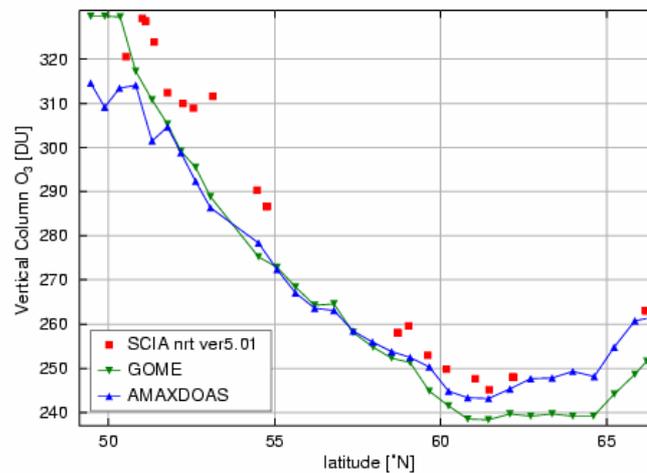
Aufgrund der mehrfachen Verzögerung des ENVISAT-Starts, der Probleme in der Datenverteilung und insbesondere auch der lv1 nach lv2 Datenauswertung konnten während des Projektes nur relativ wenig konkrete Validationsstudien durchgeführt werden. Im folgenden werden exemplarisch vertikale Säulen von Ozon und  $\text{NO}_2$  (Abschnitt 2.1.7) des operationellen NRT-Produktes V5.01 mit AMAXDOAS-Messungen validiert. Die Ergebnisse wurden auf dem ERS & ENVISTA Symposium in Salzburg (2004) vorgestellt (Wang et al., 2004) und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.



**Abbildung 14:** Prinzip der Auswahl von SCIAMACHY Pixeln für die Validation mit AMAXDOAS Daten. AMAXDOAS-Messungen wurden mit der am nächsten gelegenen SCIAMACHY-Messung verglichen, wobei der Abstand auf maximal 100 km begrenzt wurde.

Für eine sinnvolle Validation von Satellitenmessungen sollte die zeitliche und räumliche Übereinstimmung der Messungen möglichst gut sein. Deshalb wurden die SCIA-VALUE Flüge so geplant, dass nicht nur möglichst viele SCIAMACHY-Messungen unterflogen wurden, sondern auch der zeitliche Abstand zwischen Überflug und Validationsmessung möglichst gering war. Grundsätzlich wurden nur Messungen vom selben Tag verglichen, und für die meisten Vergleiche betrug der Zeitunterschied weniger als eine Stunde. Da sowohl

SCIAMACHY als auch AMAXDOAS gestreutes Sonnenlicht beobachten, ist die Messgeometrie relativ ähnlich. Für stratosphärische Absorber über dunklen Oberflächen ist der Hauptunterschied der SCIAMACHY Nadir-Messungen und der AMAXDOAS Zenit-Messungen der zweite (geometrische) Anteil des Strahles, der nach dem Streuprozess wieder zurück durch die Stratosphäre zum Messgerät geht. Wenn der Lichtweg richtig berücksichtigt wird, sollten die Ergebnisse also direkt vergleichbar sein. Die räumliche Auflösung der Messungen ist bei SCIAMACHY typischerweise  $30 \times 60 \text{ km}^2$ , während er bei AMAXDOAS bei einer Mittelung über 5 Minuten ca. 50 km in Flugrichtung aber nur 0.1 km senkrecht dazu ist. Für stratosphärische Absorber ist dieser Unterschied nicht relevant; bei der Validation von troposphärischen  $\text{NO}_2$ -Messungen (Abschnitt 2.1.8) muss er jedoch berücksichtigt werden. Für die Validation der stratosphärischen Produkte wurden jeweils die SCIAMACHY-Werte verwendet, die der AMAXDOAS-Messung am nächsten waren, wobei Messungen mit einem Abstand von mehr als 100 km ausgeschlossen wurden. Ein Beispiel für die Auswahl von Messungen ist in Abbildung 14 skizziert.

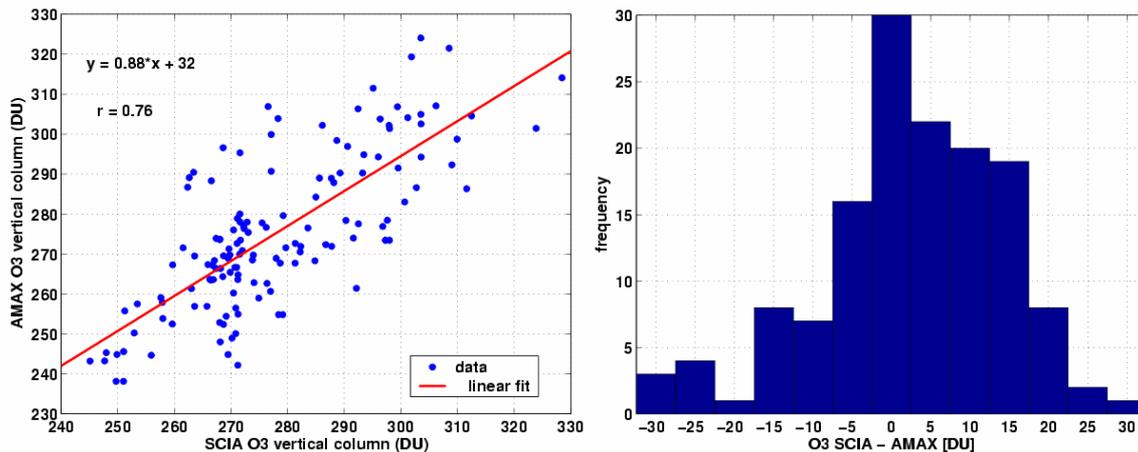


**Abbildung 15: Vergleich der GOME, SCIAMACHY und AMAXDOAS Ozon-Messungen vom 3. September 2002. Für die AMAXDOAS-Messungen wurden nur die Zenitblickrichtung verwendet; die SCIAMACHY-Daten sind Version NRT V 5.01**

In Abbildung 15 sind für den Flug vom 3.9.2002 die vertikalen Ozonsäulen von GOME, SCIAMACHY (NRT V 5.01) und AMAXDOAS dargestellt. Dieser Flug ist deshalb besonders interessant, da er mehr als  $15^\circ$  Breite und einen Ozongradienten von mehr als 100 DU überdeckt. Alle drei Instrumente zeigen den gleichen Ozon-Verlauf, wobei für den größten Teil des Fluges die Übereinstimmung zwischen GOME und AMAXDOAS exzellent ist, die SCIAMACHY-Werte jedoch deutlich höher liegen. Bei hohen Breiten ist die Übereinstimmung zwischen AMAXDOAS und SCIAMACHY besser, während in mittleren Breiten auch GOME-Messungen etwas zu hoch liegen. Deutlich sichtbar ist auch die geringere Anzahl der SCIAMACHY-Werte, die durch die Lücken während der Limb-Messungen entstehen und die größere Streuung der SCIAMACHY-Werte.

Diese Ergebnisse sind typisch für die durchgeführten Vergleiche. In Abbildung 16 sind Korrelation und Häufigkeitsverteilung der Differenzen von SCIAMACHY und AMAXDOAS  $\text{O}_3$ -Säulen für alle Messungen im September 2002 dargestellt. Insgesamt ergibt sich eine systematische Überschätzung der Ozonsäulen durch SCIAMACHY um ca. 12% und eine hohe Standardabweichung von ca. 15 DU. Im Rahmen der von ESA koordinierten Validation von SCIAMACHY wurde eine Reihe von Problemen im Datenprozessor identifiziert, die zu diesen Unterschieden beitragen, insbesondere die Verwendung von falschen Absorptionsquerschnitten, Probleme bei der Behandlung von Wolken und nicht optimale Airmass-Faktoren.

Diese Punkte sollen in der nächsten Version der SCIAMACHY-Daten behoben sein, so dass dann eine bessere Übereinstimmung mit den AMAXDOAS-Messungen zu erwarten ist.

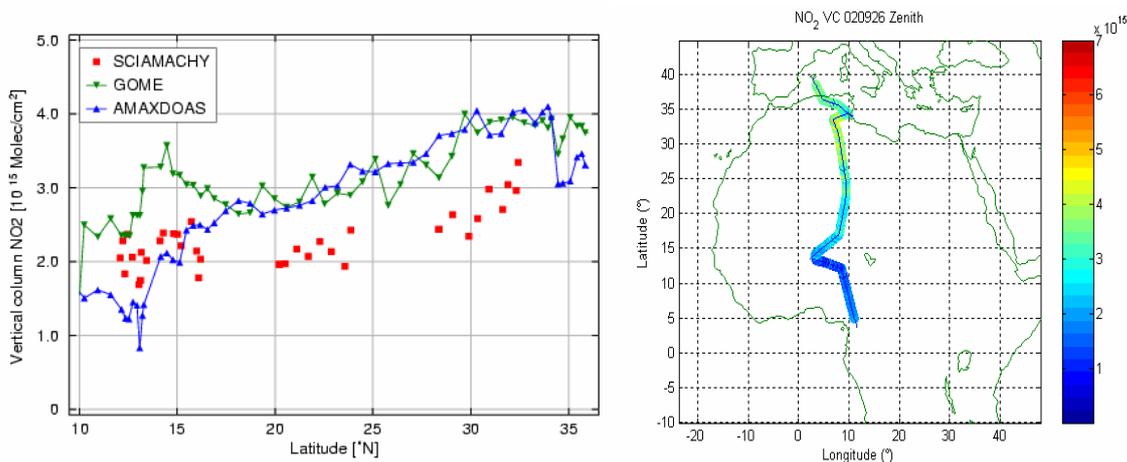


**Abbildung 16: Korrelation aller AMAXDOAS und SCIAMACHY Ozon-Messungen vom September 2002. Die SCIAMACHY Ozonsäulen (NRT V5.01) sind um etwa 12% zu hoch und haben eine erhebliche Streuung.**

### 2.1.7 Validation von stratosphärischem $\text{NO}_2$

Die Validation von stratosphärischem  $\text{NO}_2$  wurde in Analogie zur in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen Validation von stratosphärischem  $\text{O}_3$  durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf dem ERS & ENVISTA Symposium in Salzburg (2004) vorgestellt (Wang et al., 2004) und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

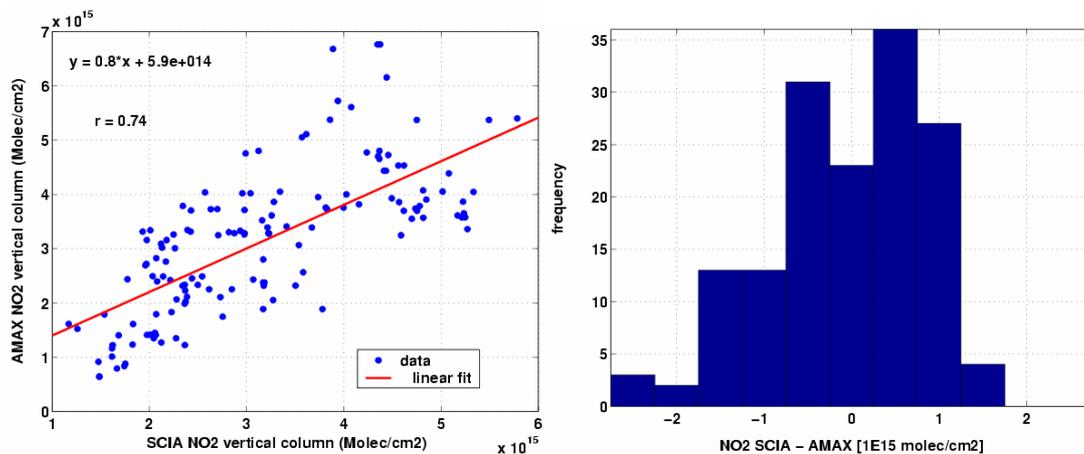
Da im Falle von  $\text{NO}_2$  die Satellitenmessung sowohl troposphärische als auch stratosphärische Anteile enthalten kann, wurden zunächst nur Daten über Gebieten mit geringer Luftverschmutzung berücksichtigt, und zudem die Zenit-Messungen von AMAXDOAS verwendet. Die Validation von troposphärischem  $\text{NO}_2$  wird getrennt behandelt (Abschnitt 2.1.8).



**Abbildung 17: GOME, SCIAMACHY und AMAXDOAS  $\text{NO}_2$ -Säulen für den 16. September 2002. Links der direkte Vergleich, rechts eine Überblick über die Flugroute und die gemessenen  $\text{NO}_2$ -Säulen.**

In Abbildung 17 sind die AMAXDOAS- $\text{NO}_2$ -Messungen vom 16.9.2002 im Vergleich mit GOME und SCIAMACHY-Messungen dargestellt. Wie im Falle von Ozon ist der allgemeine Verlauf der Werte ähnlich, die Übereinstimmung zwischen GOME und AMAXDOAS-Messungen jedoch deutlich besser als die von SCIAMACHY und AMAXDOAS, wobei SCIAMACHY zu niedrige  $\text{NO}_2$ -Werte liefert.

Dies ist auch für den gesamten Datensatz der im September 2002 gemachten Messungen gültig wie in Abbildung 18 gezeigt. Auffällig ist die breite Streuung der Werte und die nicht Gauß-förmige Verteilung. Die Ursache dafür liegt in einer klaren Breitenabhängigkeit der Vergleiche: Während an manchen Tagen die Übereinstimmung gut ist, liegen an anderen Tagen die SCIAMACHY-Werte systematisch falsch. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass ein Airmass-Faktors verwendet wird, der auf einem Lauf des MPI-2D-Modelles beruht, und in mittleren Breiten relativ große troposphärische NO<sub>2</sub>-Säulen annimmt. Diese Airmass-Faktoren wurden zunächst auch beim GOME-Instrument verwendet, später aber durch Werte ersetzt, die auf der US-Standardatmosphäre beruhen. Mit letzter lassen sich für GOME wesentlich bessere Übereinstimmungen mit unabhängigen Messungen erzielen, so dass davon auszugehen ist, dass dies auch bei SCIAMACHY der Fall sein wird. Für die nächste Version der SCIAMACHY-NO<sub>2</sub>-Säulen ist deshalb vorgesehen, ebenfalls diese Airmass-Faktoren zu verwenden.

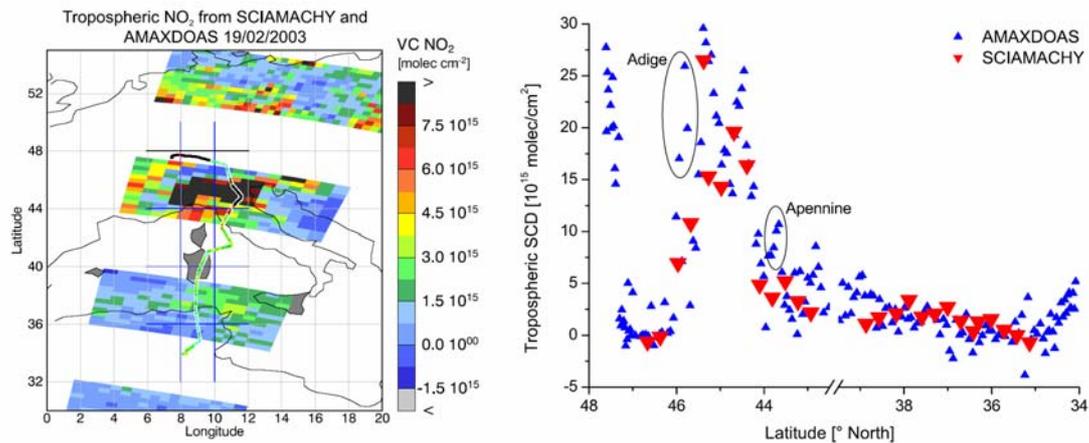


**Abbildung 18:** Vergleich aller SCIAMACHY und AMAXDOAS NO<sub>2</sub>-Messungen vom September 2002. Es wurde nur die Zenit-Blickrichtung des AMAXDOAS verwendet, und SCIAMACHY Daten der Version NRT 5.01 validiert.

### 2.1.8 Validation von troposphärischem NO<sub>2</sub>

Eine der Besonderheiten von GOME und SCIAMACHY ist die Fähigkeit, troposphärische Säulen von NO<sub>2</sub> bestimmen zu können. Damit ist erstmals die direkte Messung einer für die Luftverschmutzung am Boden relevanter Größe möglich und ein Beitrag von Satellitenmessungen zur Bestimmung der Luftqualität möglich. SCIAMACHY liefert dank seiner höheren räumlichen Auflösung gegenüber GOME deutlich verbesserte Daten, in denen sich nun einzelne Ballungsräume identifizieren lassen. Im Vergleich zu stratosphärischen Spurengasen zeichnet sich troposphärisches NO<sub>2</sub> vor allem durch seine hohe Variabilität in Zeit und Raum aus, wodurch die Validation erschwert wird. Hinzu kommt, dass übliche Messmethoden für NO<sub>2</sub> die Konzentration *in-situ* bestimmen, und damit zwar die lokale NO<sub>2</sub>-Konzentration genau messen, nicht aber die über die Troposphäre integrierte Säule im Mittelwert über ein typisches Bodenpixel von 30 x 60 km<sup>2</sup> wie es für die Validation nötig wäre. Das AMAXDOAS Instrument kann durch seine Nadir-Messungen die über die Troposphäre integrierte Säule bestimmen, und ist damit geradezu ideal geeignet für die Validation von troposphärischen NO<sub>2</sub>-Messungen von SCIAMACHY.

Eine solche Validation wurde exemplarisch für den Flug vom 19.2.2003 durchgeführt, und ist in Heue et al., 2005 (liegt bei) beschrieben. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden Abschnitt zusammengefasst.



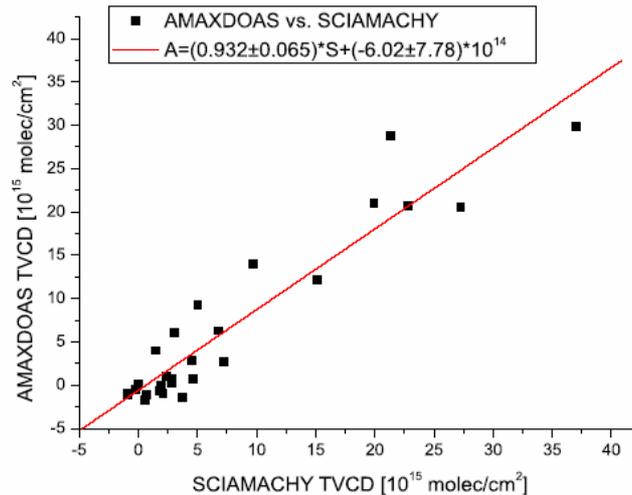
**Abbildung 19: Troposphärische NO<sub>2</sub>-Säulen gemessen von SCIAMACHY (NRT Produkt der Universität Bremen) und AMAXDOAS am 19.2.2003. In der linken Abbildung sind die Werte von beiden Instrumenten in der gleichen Farbskala dargestellt, in der rechten Abbildung die gemessenen schrägen Säulen als Funktion der Breite direkt verglichen.**

Da es zur Zeit noch kein operationelles Produkt mit troposphärischen NO<sub>2</sub>-Säulen von SCIAMACHY gibt, wurde das an der Universität Bremen entwickelte Produkt verwendet. Dieses wird in 3 Schritten erzeugt:

1. Bestimmung der schrägen NO<sub>2</sub>-Säule mit einem DOAS-Fit im Wellenlängenbereich 425 - 450 nm
2. Korrektur der stratosphärischen NO<sub>2</sub>-Säule durch Subtraktion der Messungen über einem Reinluftgebiet (Pazifik)
3. Umrechnung in vertikale troposphärische Säulen durch Anwendung eines Airmass-Faktors

Die Auswertung der AMAXDOAS-Messungen erfolgt im Prinzip nach dem gleichen Muster, wobei für die Korrektur der Stratosphäre mehrere Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Entweder kann die Messung in Zenitgeometrie als Stratosphärenmessung verwendet werden, oder die stratosphärische Säule mit unterschiedlichen Methoden über sauberen Gebieten abgeschätzt werden. Die verschiedenen Ansätze wurden in Heue et al., 2005 verglichen und führen zu vergleichbaren Ergebnissen. In der Auswertung verwendet wurde eine lineare Interpolation der Werte über unverschmutzten Gebieten.

In Abbildung 19 sind die troposphärischen Säulen von AMAXDOAS und SCIAMACHY für den 19.2.2003 dargestellt. Trotz der besseren räumlichen Auflösung der AMAXDOAS-Daten ist die Übereinstimmung sehr gut. Da der Unterschied im Airmass-Faktor relativ gering ist, gilt das schon für die schrägen Säulen. Für einige Einzelpunkte liefern die AMAXDOAS-Messungen deutlich höhere Säulen als die SCIAMACHY-Daten. Genauere Untersuchung dieser Punkte zeigt, dass es sich dabei um Messungen über verschmutzten Tälern handelt, die schmal sind im Vergleich zu den SCIAMACHY Bodenpixeln. In solchen Fällen führt die Mittelung der Satellitenmessung über die hohen Werte im Tal und die niedrigen Werte in der Umgebung erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Werte.



**Abbildung 20: Korrelation der troposphärischen NO<sub>2</sub>-Säulen von SCIAMACHY und AMAXDOAS für den 19.2.2003. Der Airmass-Faktor für beide Instrumente wurde unter der Annahme einer NO<sub>2</sub>-Mischungshöhe von 200 m und einer Aerosol optischen Dichte von 0.3 berechnet.**

Ein kritischer Punkt bei der Bestimmung von troposphärischen Säulen sind die Annahmen über das Vertikalprofil des Absorbers. Da die Empfindlichkeit der Messungen von der Höhe des Absorbers abhängt (siehe Abschnitt 2.1.5) kann diese Annahme einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Das gleiche gilt für die Annahmen über die optische Dicke der Aerosole, die ebenfalls die „Sichtbarkeit“ des NO<sub>2</sub> in den untersten Atmosphärenschichten beeinflusst. Im vorliegenden Fall wurden sowohl die Mischungshöhe als auch die Aerosolinformation aus unabhängigen Bodenmessungen abgeleitet, wodurch diese Unsicherheitsgrößen im Vergleich ausgeschlossen werden konnten. Abbildung 20 zeigt den direkten Vergleich der Messungen von SCIAMACHY und AMAXDOAS, bei dem sich ausgezeichnete Korrelation und quantitative Übereinstimmung ergeben. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass das Ergebnis nur bei der Verwendung der richtigen Airmass-Faktoren so positiv ausfällt, insofern nur das Potential der SCIAMACHY-Messungen zeigt. In einer typischen Anwendung ohne externe Informationen über Aerosol-Extinktion und NO<sub>2</sub>-Vertikalverteilung können deutlich größere Fehler auftreten.

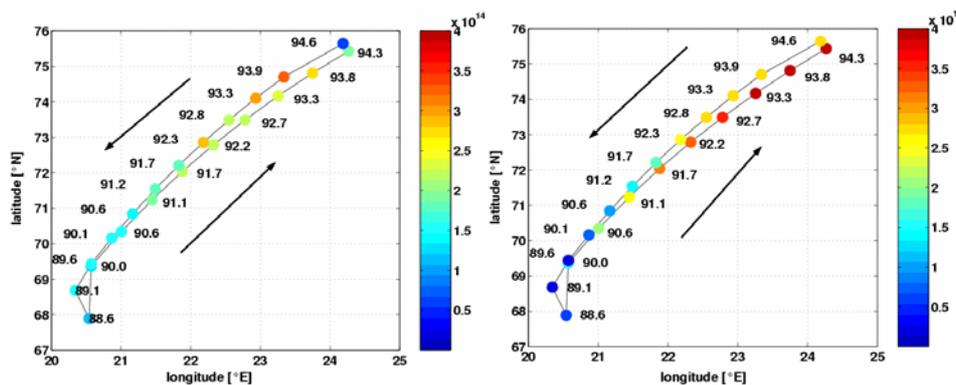
### 2.1.9 Validation von stratosphärischem OCIO

Eines der wichtigsten Themen der Atmosphärenforschung ist der stratosphärische Ozonabbau insbesondere in polaren Gebieten („Ozonloch“). Hauptverantwortlich für den Ozonabbau sind anthropogene Halogenverbindungen, die in der Troposphäre stabil sind, nach Erreichen der Stratosphäre jedoch photolysiert werden und dabei reaktive Halogenverbindungen freisetzen. Die wichtigsten Halogenradikale sind dabei ClO und BrO. Während Brommonoxid mit SCIAMACHY beobachtet werden kann, ist das für ClO nicht der Fall. Es gibt jedoch eine nicht am Ozonabbau beteiligte Verbindung (OCIO) deren Konzentration in der Dämmerung in guter Näherung proportional zum Produkt aus den Konzentrationen von BrO und ClO ist, und die im UV/vis Bereich nachweisbar ist. Deshalb werden OCIO-Messungen von GOME und SCIAMACHY zur Quantifizierung der Chloraktivierung im polaren Wirbel verwendet (z.B. Wagner et al., 2002, Richter et al., 2005). Eine Validation dieser Messungen ist also von besonderem Interesse.

Während der SCIA-VALUE-Flüge war der arktische Polarwirbel zu keiner Zeit aktiviert, und OCIO-Messungen waren deshalb nicht möglich. Das AMAXDOAS-Gerät wurde jedoch (ohne begleitenden Wissenschaftler und ohne Zusatzkosten) auch während der EUPLEX-Kampagne betrieben, und während dieser Flüge ergab sich die Gelegenheit einer OCIO-

Messung. Die Ergebnisse wurden in einem Konferenzbeitrag beschrieben (Wang et al., 2004, liegt bei) und werden zur Zeit für eine rezensierte Publikation vorbereitet. Im Folgenden werden deshalb nur die Hauptergebnisse zusammengefasst.

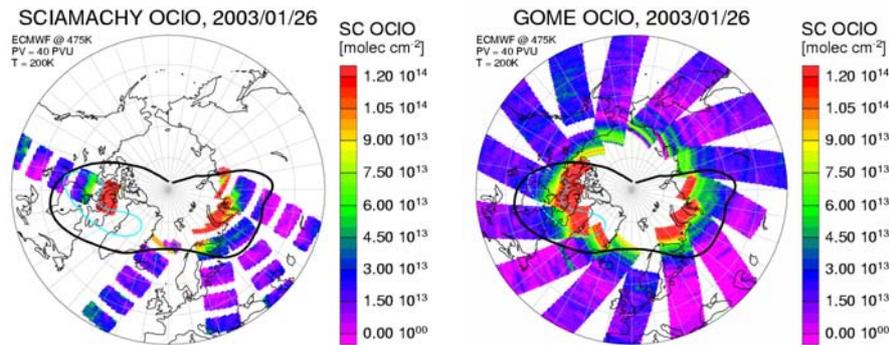
Am 26. Januar 2003 flog die Falcon von Kiruna aus in den polaren Vortex, überquerte Spitzbergen und kehrte dann auf fast dem selben Wege zurück (Abbildung 21). Aufgrund der Lichtverhältnisse zu dieser Jahreszeit herrschte während des gesamten Fluges Dämmerung, im nördlichen Teil sogar Dunkelheit. Am Tag des Fluges war im polaren Wirbel deutliche Chloraktivierung zu erkennen (vergleiche Abbildung 22), und erhöhte OCIO-Werte waren zu erwarten. Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, wurden tatsächlich sowohl in Zenitrichtung, als auch unter  $92^\circ$  hohe OCIO-Säulen beobachtet. Die Werte in Zenitrichtung waren auf Hin- und Rückflug vergleichbar; die nach vorne gerichteten Horizontmessungen jedoch auf dem Hinflug wesentlich höher als auf dem Rückflug. Das wird aus zwei Überlegungen verständlich: Erstens flog die Falcon zunächst in den aktivierten Vortex hinein, auf dem Rückweg jedoch hinaus. Durch den Gradienten im Vortexrand ist also im Prinzip ein solches Verhalten zu erwarten. Wichtiger ist allerdings der große Einfluss der Photochemie auf die OCIO-Konzentrationen und die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Bereiche bei Horizontmessungen von der Sonne weg und in Richtung der Sonne (ungefähr im Süden). Eine quantitative Untersuchung dieser Effekte setzt eine Kombination von Ergebnissen eines Chemiemodells mit dem Strahlungstransport in der Stratosphäre voraus, und ist zur Zeit in Arbeit (Wang et al. 2005).



**Abbildung 21.** Schräge OCIO Säulen gemessen mit AMAXDOAS am 26. Januar 2003. Links die Messungen in Zenit-Richtung, rechts für die Blickrichtung  $92^\circ$  ( $2^\circ$  über dem Horizont). Für die Horizontmessung ist ein klarer Unterschied von Hin- und Rückflug zu beobachten, der in den Zenit-Messungen so nicht zu erkennen ist.

Unabhängig von der Modellierung der Horizontmessungen lassen sich jedoch die Zenitmessungen direkt mit SCIAMACHY Nadir-Messungen vergleichen. Wie bereits erwähnt sind für stratosphärische Absorber die Lichtwege der beiden Messmethoden sehr ähnlich, insbesondere bei niedriger Sonne, so dass direkt schräge Säulen verglichen werden können.

Da ein operationelles OCIO-Produkt für SCIAMACHY noch nicht verfügbar ist, wurden die OCIO-Messungen von AMAXDOAS mit dem wissenschaftlichen SCIAMACHY OCIO-Produkt der Universität Bremen verglichen. In Abbildung 22 sind für den 26.1.2003 die OCIO-Säulen von GOME und SCIAMACHY dargestellt. Die beiden Datenprodukte zeigen gute Übereinstimmung, wobei zum Teil im SCIAMACHY-Produkt mehr räumliche Details zu erkennen sind. Die bessere räumliche Auflösung führt allerdings auch zu höheren Messfehlern, sodass die OCIO-Säulen von SCIAMACHY ohne Mittelung eine höhere Streuung aufweisen als die von GOME. Durch die rasche Photochemie von OCIO spielt auch der zeitliche Unterschied von 30 Minuten zwischen den Messungen von GOME und SCIAMACHY eine Rolle, durch den der lokale Sonnen-Zenitwinkel bei einer gegebenen Breite unterschiedlich ist.



**Abbildung 22: Schräge OCIO-Säulen für den 26.1.2003 von SCIAMACHY (links) und GOME (rechts). Die Satellitendaten wurden am IUP Bremen ausgewertet und sind keine offiziellen SCIAMACHY-lv2-Produkte. Die schwarze Linie gibt den ungefähren Rand des polaren Vortex wieder (40 PVU@475 K potentielle Temperatur), die hellblaue Linie die 200K Isolinie (ebenfalls bei 475 K).**

Die AMAXDOAS-Messungen bei  $90^\circ$  SZA ( $69.4^\circ\text{N}$ ,  $20.6^\circ\text{E}$ ) sind  $1.2 \cdot 10^{14} \text{ molec/cm}^2$ , in exzellenter Übereinstimmung mit den SCIAMACHY Werten, die bei  $90^\circ$  SZA ebenfalls  $1.2 \cdot 10^{14} \text{ molec/cm}^2$  betragen. Da jedoch die Streuung der SCIAMACHY OCIO-Säulen groß ist, und der Breitengrad der Messung ( $71.5^\circ\text{N}$ ) nicht genau mit dem der AMAXDOAS-Beobachtung übereinstimmt, können diese Ergebnisse nur einen Hinweis darauf geben, dass die aus SCIAMACHY-Daten berechneten OCIO-Säulen die richtige Größenordnung haben.

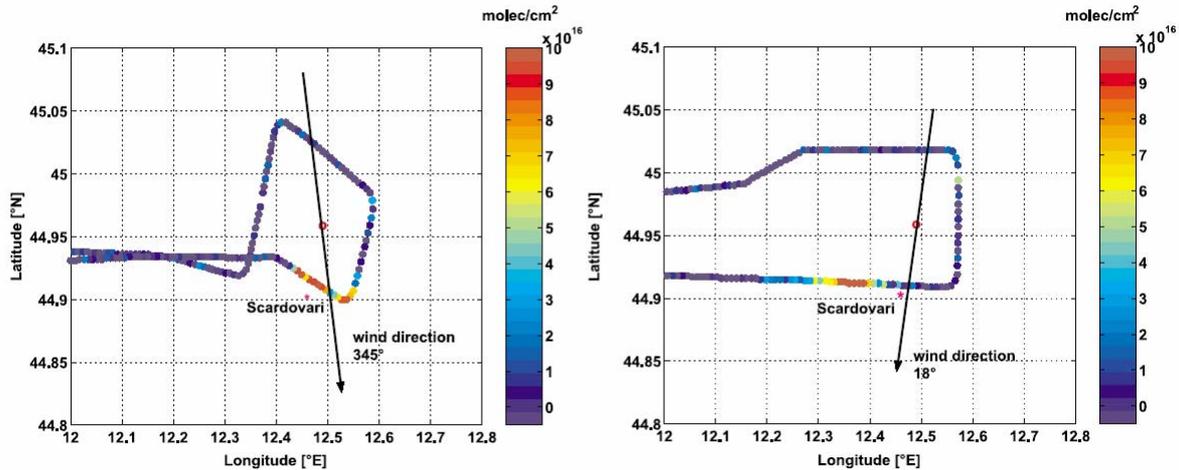
#### 2.1.10 AMAXDOAS Messungen von $\text{SO}_2$

Zusätzlich zu den Flügen auf der DLR-Falcon wurde das AMAXDOAS Instrument in einer etwas anderen Konfiguration auch auf einer Partenavia Pa68 geflogen. Diese Flüge wurden finanziert aus Mitteln der Projekte FORMAT und DOAS-Tomographie, boten jedoch die Gelegenheit Messungen in der stark verschmutzten Po-Ebene durchzuführen, die auch für die Validation von SCIAMACHY Produkten zur Verfügung stehen werden. Durch die niedrige Flughöhe, die geringere Fluggeschwindigkeit und eine Flugstreckenplanung die speziell verschmutzte Gebiete aufsuchte, konnten gute Messungen der schwachen Absorbern  $\text{SO}_2$  und HCHO (siehe Abschnitt 2.1.11) gemacht werden.

Die Ergebnisse der AMAXDOAS  $\text{SO}_2$ -Messungen wurden in Wang et al., 2005 veröffentlicht (liegt bei). Hier werden nur die wichtigsten Ergebnisse wiedergegeben.

Schwefeldioxid ist ein giftiges Gas das einer der Hauptverursacher des sauren Regens ist. Über  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ist  $\text{SO}_2$  auch an der Bildung von Aerosolen beteiligt, und hat so einen Einfluss auf Wolkenbildung und den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Neben vulkanischen Quellen sind vor allem anthropogene Emissionen wichtig, insbesondere die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und die Erzschnmelze. Trotz großer Fortschritte bei der Rauchgasreinigung sind Kraftwerke weiterhin signifikante Punktquellen von  $\text{SO}_2$ .

Der Nachweis von  $\text{SO}_2$  in UV/vis Messungen erfolgt relativ weit im UV (316 - 325 nm) was aufgrund der geringen Intensitäten und der großen Ozonabsorption zu Problemen in der Auswertung führt. Bei Satellitenmessungen kommt noch der starke Einfluss der Rayleigh-Streuung hinzu, der die Messempefindlichkeit zum Boden hin zumindest über dunklen Oberflächen stark abnehmen lässt.



**Abbildung 23: AMAXDOAS SO<sub>2</sub>-Messungen beim Porto Tolle Kraftwerk (roter Punkt im Zentrum) am 26.09.2003 (links) und am 27.09.2003 (rechts). Dargestellt sind die Schrägen Säulen in der 97° Blickrichtung. Klar ist die Abgasfahne des Kraftwerkes zu erkennen.**

Während der FORMAT-Kampagne im September 2003 wurden in der Po-Ebene AMAXDOAS-Messungen von der Partenavia Pa68 aus durchgeführt. Zwei der Flüge zogen eine Schleife um das Kraftwerk Porto Tolle mit seinem 250 m hohen Kamin (siehe Abbildung 23). Das Porto Tolle Kraftwerk ist eines der größten Öl-Kraftwerke Italiens und hat 4 Blöcke mit einer Gesamtleistung von 2650 MW. Auf beiden Flügen konnte eine deutliche Abgasfahne des Kraftwerks gemessen werden, in der sowohl stark erhöhte NO<sub>2</sub>-Werte, als auch klare SO<sub>2</sub>-Signale nachgewiesen werden konnten. Da am Messtag relativ klare Sichtverhältnisse herrschten, und weder die Beobachtungen vom Flugzeug aus noch die mit AMAXDOAS gemessenen O<sub>4</sub>-Säulen einen Hinweis auf eine sichtbare Abgasfahne und damit Probleme im Strahlungstransfer gaben, können die gemessenen Werte in SO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet werden.

Um aus den AMAXDOAS-Messungen SO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmen zu können, muss zunächst die Gesamtmenge des SO<sub>2</sub> in einem senkrechten Schnitt durch die Abgasfahne bestimmt werden. Im ersten Schritt müssen dazu die schrägen Säulen in vertikale Säulen umgerechnet werden, was mit entsprechenden Airmassfaktoren erfolgt. Dazu muss jedoch die Vertikalverteilung von SO<sub>2</sub> bekannt sein. Da am 26. September stark erhöhte SO<sub>2</sub>-Werte auch an einer in der Nähe gelegenen Bodenstation gemessen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Grenzschicht gut gemischt war. Die Höhe der Grenzschicht kann aus meteorologischen Daten auf 1,7 km abgeschätzt werden. Mit diesen Annahmen lassen sich aus den Zenit- und Nadir-Messungen SO<sub>2</sub>-Gesamtsäulen entlang des Fluges bestimmen (bis zu  $4 \cdot 10^{16}$  molec cm<sup>-2</sup>). Aus Windrichtung und -geschwindigkeit sowie Flugrichtung und Flugeschwindigkeit lässt sich damit der integrierte Massenfluss an SO<sub>2</sub> berechnen, was unter der Annahme, dass kein SO<sub>2</sub> verloren geht, und neben dem Kraftwerk keine weitere SO<sub>2</sub>-Quelle existiert, gerade der Emission des Kraftwerks entspricht. Für die beiden Tage ergeben sich aus den Messungen sehr ähnliche Werte von  $1,57 \cdot 10^{25}$  molec s<sup>-1</sup> bzw.  $1,6 \cdot 10^{25}$  molec s<sup>-1</sup>. Diese Messungen können mit offiziellen Emissionsangaben der Kraftwerksbetreiber verglichen werden, die einem SO<sub>2</sub>-Fluss von  $2,25 \cdot 10^{26}$  bzw.  $2,07 \cdot 10^{25}$  molec s<sup>-1</sup> entsprechen. Die Betreiberangaben liegen damit deutlich über den Messungen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die AMAXDOAS Messungen einen relativ großen Fehler von ca. 50% haben, vor allem durch Unsicherheiten in der Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die zwar am Flugzeug gemessen wurden, sich jedoch innerhalb der Grenzschicht deutlich ändern können. Darüber hinaus ist schon der spektrale Nachweis von SO<sub>2</sub> ungenauer als der von beispielsweise NO<sub>2</sub>, sodass Unsicherheiten im Fit nicht vernachlässigt werden können.

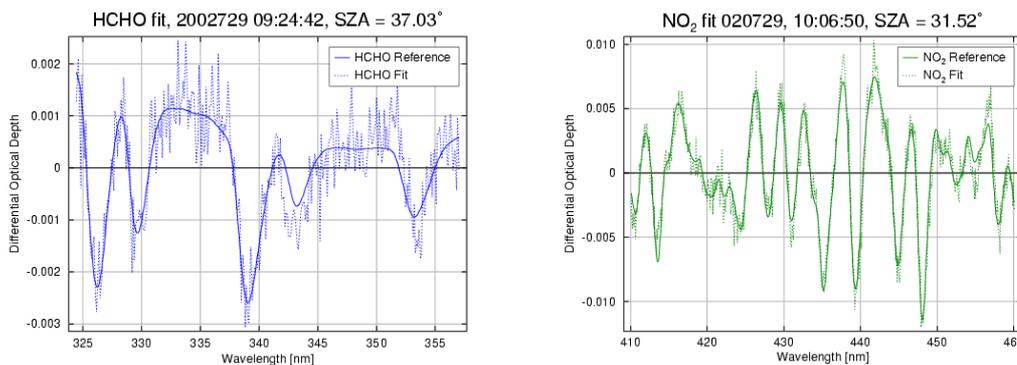
Während der selben Flüge wurden auch deutlich erhöhte  $\text{SO}_2$ -Werte über Mantova und Cremona beobachtet. In diesen Fällen wurde  $\text{SO}_2$  jedoch nur in den Nadir-Blickrichtungen gemessen, was darauf schließen lässt, dass sich die Quelle und das Konzentrationsmaximum in Bodennähe befanden.

Zusammenfassend hat diese Studie gezeigt, dass man mit AMAXDOAS lokale  $\text{SO}_2$ -Quellen erfassen, und bei entsprechender Flugplanung auch Emissionen von Punktquellen bestimmen kann. Die Genauigkeit dieser Messungen ist allerdings geringer als zum Beispiel für  $\text{NO}_2$ . Eine Verwendung der Messungen für die Validation von SCIAMACHY Daten erscheint im Moment fraglich, da die über ein SCIAMACHY-Pixel gemittelten  $\text{SO}_2$ -Säulen vermutlich unterhalb der Nachweisgrenze der Satellitenmessungen liegen.

### 2.1.11 AMAXDOAS Messungen von HCHO

Formaldehyd (HCHO) ist ein wichtiges Zwischenprodukt bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen in der Atmosphäre. HCHO wird in geringen Mengen direkt durch industrielle Prozesse und Verbrennungsvorgänge emittiert, entsteht aber vor allem beim Abbau höherer Kohlenwasserstoffe. Quellen sind zum Beispiel biogene Emissionen von Isoprenen und Terpenen, Emissionen der Petrochemie oder die Verbrennung von Biomasse. HCHO kann als Tracer für Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre verwendet werden, und ist darüber hinaus (neben Glyoxal) der einzige Kohlenwasserstoff der mit Absorptionsspektroskopie des gestreuten Sonnenlichts nachgewiesen werden kann.

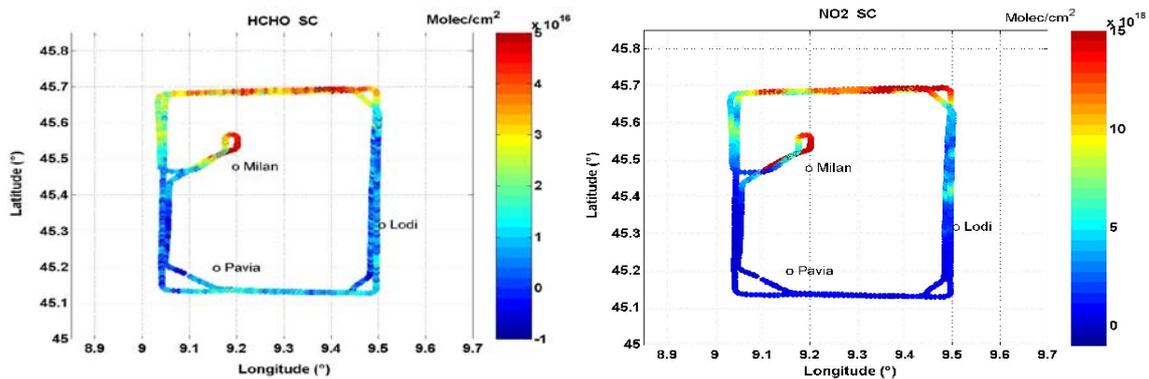
Aufgrund der hohen Dichte an industriellen Produktionsstätten, der hohen Verkehrsdichte und den häufigen Inversionslagen ist die Po-Ebene ein Gebiet mit hoher Luftverschmutzung. Von mehreren Messkampagnen ist bekannt, dass im Sommer sehr hohe Formaldehyd-Konzentrationen auftreten können, insbesondere in der Umgebung von Mailand. Dies wurde von Bodenmessungen auch während der FORMAT-Kampagnen bestätigt (Heckel et al., 2004). Die AMAXDOAS-Messungen während der FORMAT-Kampagne wurden deshalb auch auf Formaldehyd-Absorptionen untersucht. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse befindet sich in Vorbereitung.



**Abbildung 24. Beispiel für AMAXDOAS Fitergebnisse für HCHO (links) und  $\text{NO}_2$  (rechts). Beide Absorber können eindeutig bestimmt werden, wobei der  $\text{NO}_2$ -Fit durch die größere Absorption und die höhere Intensität bei 430 nm einen geringeren Fehler hat.**

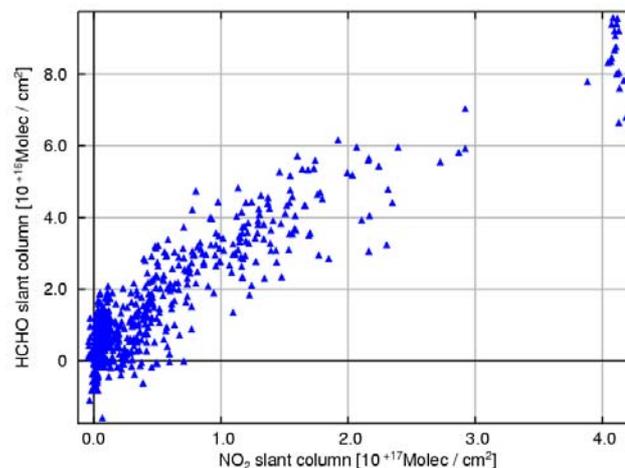
Ein Beispiel für die Fitergebnisse in verschmutzten Gebieten ist in Abbildung 24 gezeigt. Beide Spurengase können eindeutig gemessen werden; die Unsicherheit beim HCHO-Fit ist jedoch deutlich höher.

Eine interessante Frage ist, inwieweit die räumlichen Verteilungen von  $\text{NO}_2$  und HCHO korrelieren. Wie oben erwähnt kommen für HCHO verschiedene Quellen in Frage, während  $\text{NO}_2$  zumindest in industrialisierten Gebieten fast ausschließlich von anthropogene Emissionen stammt. Die größten Stickoxidquellen sind Verkehr und Energieproduktion, so dass lokale Maxima in der Nähe von Straßen und Kraftwerken bzw. Industrieanlagen zu erwarten sind.



**Abbildung 25: AMAXDOAS Formaldehyd (links) und  $\text{NO}_2$  (rechts) Messungen vom 18.09.2002 in der Umgebung von Mailand. Gezeigt sind die schrägen Säulen in  $93^\circ$  Blickrichtung ( $3^\circ$  über dem Horizont).**

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Fluges vom 18.9.2002 dargestellt. In einer Flughöhe von 700 m wurde bei zwei Umrundungen jeweils nördlich von Mailand stark erhöhte  $\text{NO}_2$  und HCHO-Werte beobachtet. Da die Hauptwindrichtung an diesem Tag nach Norden war, handelt es sich vermutlich um Emissionen aus dem Ballungszentrum Mailand. Aufgrund der niedrigen Flughöhe konnten HCHO und  $\text{NO}_2$  in alle Blickrichtungen beobachtet werden, sodass von einer gut gemischten Grenzschicht ausgegangen werden kann. Im Gegensatz zu anderen Flügen wurde in diesem Fall keine  $\text{NO}_2$ -Punktquelle umflogen, sodass sich insgesamt eine sehr hohe Korrelation der  $\text{NO}_2$  und HCHO-Säulen ergab. Dies ist noch einmal in Abbildung 26 verdeutlicht. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Fall  $\text{NO}_2$  und HCHO die selben (anthropogenen) Quellen haben.



**Abbildung 26: Korrelation der AMAXDOAS HCHO und  $\text{NO}_2$ -Säulen für den in Abbildung 25 gezeigten Flug.**

Eine Anwendung der AMAXDOAS Formaldehyd-Messungen für die Validation von SCIAMACHY-Produkten ist geplant. Zumindest in GOME-Daten sind erhöhte HCHO-Säulen über der Po-Ebene zu erkennen, und ähnliche Ergebnisse werden auch für SCIAMACHY erwartet. Allerdings sind zur Zeit nur relativ wenige Orbits während der FORMAT-Kampagne verfügbar, und die Nachweisgrenze für HCHO ist noch nicht niedrig genug um Einzelmessungen validieren zu können.

## 2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während des Projektes wurden keine relevanten Fortschritte auf dem Gebiet Flugzeuggestützter DOAS-Messungen bekannt, die nicht in Kooperation mit diesem Projekt erfolgten.

Fortschritte auf dem Gebiet der MAXDOAS-Messungen vom Boden aus wurden an verschiedenen Instituten, insbesondere der Universität Bremen und der Universität Heidelberg erreicht, zu einem großen Teil in anderen SCIAMACHY-Validationsprojekten. Die dabei gemachten Fortschritte zum Beispiel bei Strahlungstransferrechnungen konnten unmittelbar im Projekt genutzt werden.

Fortschritte auf dem Gebiet der Validation von SCIAMACHY-Daten wurden in Kooperation zwischen einer Vielzahl von Validationsprojekten erreicht; die Beiträge dieses Projektes können dabei nur einen Teilaspekt abdecken.

## 2.3 Erfolgte / geplante Veröffentlichungen

Siehe Abschnitt 4.

## 2.4 Referenzen

- Aliwell, S. R., M. Van Roozendaal, P. V. Johnston, A. Richter, T. Wagner, D. W. Arlander, J. P. Burrows, D. J. Fish, R. L. Jones, K. K. Tornkvist, J.-C. Lambert, K. Pfeilsticker, and I. Pundt, Analysis for BrO in zenith-sky spectra; An intercomparison exercise for analysis improvement, *JGR*, doi:10.1029/2001JD000329, 2002
- Bobrowski, N., Hönninger, G., Galle, B., and Platt, U.: Detection of bromine monoxide in a volcanic plume, *Nature*, **423**, 273–276, 2003.
- Bovensmann, H. et al., SCIAMACHY - Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.*, **56** (2), 127-150, (1999).
- Brandtjen, R., T. Klüpfel, D. Perner, and B. M. Knudsen, "Airborne measurements during the European Arctic Stratospheric Ozone Experiment: Observation of OClO, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1363-1366, (1994)
- Bruns, M., NO<sub>2</sub> Profile Retrieval using Airborne Multiaxis Differential Optical Absorption Spectrometer (AMAXDOAS) data, *Dissertation*, Universität Bremen, 2004
- Bruns, M., S. Bühler, J. P. Burrows, K.-P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Richter, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, Retrieval of Profile Information from Airborne Multi Axis UV/visible Skylight Absorption Measurements, *Applied Optics*, **43** (22), 4415-4426, 2004
- Burrows, J. P., Weber, M., Buchwitz, M., Rozanov, V., Ladstätter-Weissenmayer, A., Richter, A., DeBeek, R., Hoogen, R., Bramstedt, K., Eichmann, K. -U., Eisinger, M., and D. Perner, The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results, *J. Atmos. Sci.*, **56**:151-175, 1999
- Eisinger, M., A. Richter, A. Ladstätter-Weißmayer, and J. P. Burrows, DOAS zenith sky observations: 1. BrO measurements over Bremen (53°N) 1993-1994, *J. Atm. Chem.*, No. **26**, pp. 93-108, 1997.
- Erle, F., A. Grendel, D. Perner, U. Platt, and K. Pfeilsticker, Evidence of heterogeneous bromine chemistry on cold stratospheric sulphate aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4329-4332, (1998)
- Fix, A., Ehret, G., Flentje, H., Poberaj, G., Gottwald, M., Finkenzeller, H., Bremer, H., Bruns, M., Burrows, J. P., Kleinböhl, A., Küllmann, H., Kuttippurath, J., Richter, A., Wang, P., Heue, K.-P., Platt, U., Pundt, I., Wagner, T., SCIAMACHY validation by aircraft remote sensing: design, execution, and first measurement results of the SCIA-VALUE mission, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1273-1289, 2005
- Heckel, A., Messungen troposphärischer Spurengase mit einem MAXDOAS-Instrument, *Diplomarbeit*, Universität Bremen, 2003
- Heckel, A., A. Richter, T. Tarsu, F. Wittrock, C. Hak, I. Pundt, W. Junkermann, and J. P. Burrows, MAX-DOAS measurements of formaldehyde in the Po-Valley, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **4**, 1151–1180, 2004
- Heue, K.-P., A. Richter, T. Wagner, M. Bruns, J. P. Burrows, C. von Friedeburg, W. D. Lee, U. Platt, I. Pundt, P. Wang, Validation of SCIAMACHY tropospheric NO<sub>2</sub>-columns with AMAXDOAS measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1039-1051, 2005
- Hönninger G. and Platt U.: The Role of BrO and its Vertical Distribution during Surface Ozone Depletion at Alert, *Atmos. Environ.*, **36**, 2481–2489, 2002.

- Leser, H., Hönninger, G., and Platt, U.: MAX-DOAS measurements of BrO and NO<sub>2</sub> in the marine boundary layer, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 10, doi:10.1029/2002GL015811, 2003.
- McElroy, C. T., C. A. McLinden, and J. C. McConnell, Evidence for bromine monoxide in the free troposphere during the Arctic polar sunrise, *Nature*, **397**, 338-341, (1999)
- Melamed, M. L., S. Solomon, J. S. Daniel, A. O. Langford, R. W. Portmann, T. B. Ryerson, D. K. Nicks, Jr. and S. A. McKeen, Measuring reactive nitrogen emissions from point sources using visible spectroscopy from aircraft, *J. Environ. Monit.*, **5**, 29-34, (2003)
- Noxon, J. F., Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere measured by ground-based absorption spectroscopy, *Science*, **189**, 547-549, 1975.
- Platt, U.: Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), in *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*, Chem. Anal. Ser., edited by Sigrist, M. W., 127, 27-84, John Wiley, New York, 1994
- Pfeilsticker K., and U. Platt, Airborne measurements during the European Arctic Stratospheric Ozone Experiment: Observation of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1375-1378, (1994)
- Petricoli, A., F. Ravegnani, G. Giovanelli, D. Bortoli, U. Bonaf, I. Kostadinov, A. Oulanovsky, Off-Axis Measurements of Atmospheric Trace Gases by Use of an Airborne Ultraviolet-Visible Spectrometer, *Applied Optics*, **27**, 5593-5599, (2002)
- Preston, K. E., R. L. Jones, and H. K. Roscoe, "Retrieval of NO<sub>2</sub> vertical profiles from ground-based UV-visible measurements: Method and validation", *J. Geophys. Res.*, **22**, 102, 19089-19097, (1997)
- Richter, A., Absorptionsspektroskopische Messungen stratosphärischer Spurengase über Bremen, 53°N, Dissertation, *Universität Bremen*, 1997
- Richter, A., Eisinger, M., Ladstätter-Weissenmayer, A., and Burrows, J. P.: DOAS zenith sky observations. 2. Seasonal variation of BrO over Bremen (53° N) 1994-1995, *J. Atm. Chem.*, **32**, 83- 99, 1999
- Richter, A., F. Wittrock, M. Weber, S. Beirle, S. Köhl, U. Platt, T. Wagner, W. Wilms-Grabe, and J. P. Burrows, GOME observations of stratospheric trace gas distributions during the splitting vortex event in the Antarctic winter 2002 Part I: Measurements, *J. Atmos. Sci.*, **62** (3), 778-785, 2005
- Rodgers, C. D. "Characterization and error analysis of pro\_les retrieved from remote sounding measurements", *J. Geophys. Res.*, **95**, D5, 5587-5595, (1990)
- Rodgers, C.D., Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation, *Rev. Geophys.*, **14**, 609-624, (1976)
- Rodgers, C. D., Inverse Methods for atmospheric sounding: Theory and Practice, Series 25 on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, Vol. 2, (World Scientific Publishing, London, 2000)
- Rozanov, V., Diebel, D., Spurr, R. J. D. & Burrows, J. P., GOMETRAN: A radiative transfer model for the satellite project GOME - the plane parallel version, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16683-16695, (1997).
- Rozanov, A., Rozanov, V. V., and Burrows, J. P.: Combined differential-integral approach for the radiation field computation in a spherical shell atmosphere: Nonlimb geometry, *J. Geophys. Res.*, **105**, D18, 22,937, 2000.
- Rozanov, A., Rozanov, V. V., and Burrows, J. P.: A numerical radiative transfer model for a spherical planetary atmosphere: combined differential-integral approach involving the Picard iterative approximation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **69**, 491, 2001
- Schiller, C., A. Wahner, H.-P. Dorn, U. Platt, J. Callies, and D. H. Ehhalt, Near UV Atmospheric Absorption Measurements of Column Abundances During Airborne Arctic Stratospheric Expedition, January-February 1989: 2. OClO Observations, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 501-504, (1990)
- Solomon, S., Schmeltekopf, A. L., and Sanders, R. W.: On the interpretation of zenith sky measurements, *J. Geophys. Res.*, **92**, D7, 8311-8319, 1987
- Wagner, T., F. Wittrock, A. Richter, M. Wenig, J. P. Burrows, and U. Platt, 2002: Continuous monitoring of the high and persistent chlorine activation during the Arctic winter 1999/2000 by the GOME instrument on ERS-2, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2001JD000466
- Wahner, A., R. O. Jakoubek, G. H. Mount, A. R. Ravishankara, and A. L. Schmeltekopf, Remote Sensing Observations of Nighttime OClO Column During the Airborne Antarctic Ozone Experiment, September 8, 1987, *J. Geophys. Res.*, **94**, 11405-11411, (1989a)
- Wahner, A., R. O. Jakoubek, G. H. Mount, A. R. Ravishankara, and A. L. Schmeltekopf, Remote Sensing Observations of Daytime Column NO<sub>2</sub> During the Airborne Antarctic Ozone Experiment, August 22 to October 2, 1987, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16619-16632, (1989b)

Wahner, A., J. Callies, H.-P. Dorn, U. Platt, and C. Schiller, Near UV Atmospheric Absorption Measurements of Column Abundances During Airborne Arctic Stratospheric Expedition, January-February 1989: Technique and NO<sub>2</sub> Observations, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 497-500, (1990a)

Wahner, A., J. Callies, H.-P. Dorn, U. Platt, and C. Schiller, Near UV Atmospheric Absorption Measurements of Column Abundances During Airborne Arctic Stratospheric Expedition, January-February 1989: 3. BrO Observations, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 517-520, (1990b)

Wang, P., A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, W. Junkermann, K.-P. Heue, T. Wagner, U. Platt, I. Pundt, Airborne multi-axis DOAS measurements of tropospheric SO<sub>2</sub> plumes in the Po-valley, Italy, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **5**, 2017-2045, 2005

Wang, P., A. Richter, M. Bruns, V. V. Rozanov, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, Measurements of tropospheric NO<sub>2</sub> with an airborne multi-axis DOAS instrument, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 337-343, 2005

Wittrock, F., H. Oetjen, A. Richter, S. Fietkau, T. Medeke, A. Rozanov, and J. P. Burrows, MAX-DOAS measurements of atmospheric trace gases in Ny-Ålesund, *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 955-966, 2004

### 3 Erfolgskontrollbericht

#### 3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Siehe Abschnitt 1.2.

#### 3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Vorhabens wurden in den Abschnitten 1.2 und 2 beschrieben.

#### 3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die gewonnenen Daten stehen auch nach Ende des Projektes noch zur Verfügung, und können zur Validation von neuen Versionen der operationellen Datenprodukte verwendet werden. Die Ergebnisse der SCIA-VALUE Kampagne wurden in die NILU Datenbank übertragen. Bei künftigen Prozessor-Verbesserungen stehen sowohl die Daten, als auch der Projektleiter zur Unterstützung von Vergleichen zur Verfügung.

##### 3.3.1 Erfindungen und Patentanmeldungen

Erfindungen und Patentanmeldungen erfolgten nicht.

##### 3.3.2 Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende

Da es sich bei dem Projekt um reine Grundlagenforschung handelt, gibt es keine wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende.

##### 3.3.3 Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse lassen sich in einer Reihe von wissenschaftlichen Anwendungen nutzen:

- Weitere Validation von SCIAMACHY Produkten
- Anwendung der entwickelten Algorithmen auf andere Flugzeuggestützte DOAS-Messungen
- Verwendung der gewonnenen Messdaten für Studien zur Chemie der Atmosphäre
- Verwendung des entwickelten Instrumentes und der Auswertemethoden zur Weiterentwicklung von AMAXDOAS-Messungen, zum Beispiel vom Forschungsflugzeug HALO aus

#### 3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Wie im Bericht dargestellt, waren die AMAXDOAS-Messungen weitgehend erfolgreich und lieferten Messdaten, die zur Validation von SCIAMACHY-Produkten verwendet werden konnten. insbesondere gelangen Messungen von O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, OCIO, SO<sub>2</sub>, HCHO und H<sub>2</sub>O (siehe Abschlußbericht des Partnerprojektes 50EE0024). Im Laufe der Kampagnen und bei der Auswertung ergaben sich jedoch eine Reihe von Punkten, an denen das AMAXDOAS-Instrument weiter verbessert werden könnte:

- **Überhitzung.** Während einiger Flugabschnitte lag die Innentemperatur der Falcon über der Zieltemperatur der Thermostatisierung der Spektrometer (35°C). In solchen Fällen konnte die thermische Stabilität nicht mehr gewährleistet werden, was die Qualität der Daten negativ beeinflusste. Um eine solche Überhitzung zu verhindern, sollte entweder der Innenraum der Falcon besser klimatisiert werden, oder aber die Thermostatisierung der Spektrometer um eine Möglichkeit zur eine Kühlung ergänzt werden.

- **Vereisung von Teleskopen:** Zur Verhinderung von Eisbildung durch Kondensationsfeuchtigkeit sind die AMAXDOAS-Teleskope beheizt. Dies hat aber nicht in allen Fällen Vereisung verhindert, so dass bei zukünftigen Anwendungen eine stärkere Beheizung in Erwägung gezogen werden sollte.
- **Variation der Spaltfunktion** über die CCD-Kamera: Bedingt durch die abbildende Optik des verwendeten Spektrometers ARC300i lassen sich die beiden Achsen (Wellenlänge und Blickrichtung) nicht unabhängig voneinander optimieren. Dadurch ergibt sich bei guten abbildenden Eigenschaften eine Variation der Spaltfunktion über die Höhe der CCD, was zu unterschiedlichen Auflösungen der Messungen in verschiedene Blickrichtungen führt. Diese Variation führt zu Problemen in der Auswertung, und sollte nach Möglichkeit minimiert werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Verwendung eines Spiegelsystems anstelle der Einzelteleskope (Zeitmultiplex) oder aber eine Veränderung der Abbildungseigenschaften des Spektrometers.

### 3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Ein großer Teil der Ergebnisse des Projektes wurde bereits in rezensierten Artikeln veröffentlicht. Zwei weitere Artikel sind zur Zeit in Vorbereitung.

### 3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.

Die Ausgabenplanung wurde eingehalten.

Die Zeitplanung musste auf Grund der Startverschiebungen von ENVISAT und der Verzögerungen bei der Bereitstellung der operationellen Datenprodukte überarbeitet werden.

## 4 Liste der Veröffentlichungen:

### 4.1 Diplom und Doktorarbeiten

Bruns, M., NO<sub>2</sub> Profile Retrieval using Airborne Multiaxis Differential Optical Absorption Spectrometer (AMAXDOAS) data, *Dissertation*, Universität Bremen, 2004

### 4.2 In Vorbereitung

P. Wang, A. Richter, M. Bruns, A. V. Rozanov, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, OClO vertical columns retrieval—a case study from airborne multi-axis DOAS measurements, in Vorbereitung für ACP

M. Bruns, S. A. Buehler, J. P. Burrows, A. Richter, A. Rozanov, P. Wang, K.-P. Heue, U. Platt, I. Pundt, and T. Wagner, NO<sub>2</sub> Profile Retrieval using airborne multi axis UV-visible skylight absorption measurements over central Europe, eingereicht bei ACP, August 2005

I. Pundt., K.-P. Heue, B.-C Song, T. Wagner, M. Bruns, J. P. Burrows, A. Richter, and P. Wang, Two dimensional concentration distributions of a NO<sub>2</sub> Emission plume from a point source derived by Airborne DOAS Tomography, eingereicht bei J. Geophys. Res., 2005.

### 4.3 Rezensiert

Fix, A., Ehret, G., Flentje, H., Poberaj, G., Gottwald, M., Finkenzeller, H., Bremer, H., Bruns, M., Burrows, J. P., Kleinböhl, A., Küllmann, H., Kuttippurath, J., Richter, A., Wang, P., Heue, K.-P., Platt, U., Pundt, I., Wagner, T., SCIAMACHY validation by aircraft remote sensing: design, execution, and first measurement results of the SCIA-VALUE mission, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1273-1289, 2005

Wang, P., A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, W. Junkermann, K.-P. Heue, T. Wagner, U. Platt, I. Pundt, Airborne multi-axis DOAS measurements of tropospheric SO<sub>2</sub> plumes in the Po-valley, Italy, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **5**, 2017-2045, 2005

Heue, K.-P., A. Richter, T. Wagner, M. Bruns, J. P. Burrows, C. von Friedeburg, W. D. Lee, U. Platt, I. Pundt, P. Wang, Validation of SCIAMACHY tropospheric NO<sub>2</sub>-columns with AMAXDOAS measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1039-1051, 2005

Wang, P., A. Richter, M. Bruns, V. V. Rozanov, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, Measurements of tropospheric NO<sub>2</sub> with an airborne multi-axis DOAS instrument, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 337-343, 2005

Bruns, M., S. Bühler, J. P. Burrows, K.-P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Richter, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, Retrieval of Profile Information from Airborne Multi Axis UV/visible Skylight Absorption Measurements, *Applied Optics*, **43** (22), 4415-4426, 2004

### 4.4 Konferenzbeiträge

Bruns, M., J.P. Burrows, S. Fietkau, F. Finocchi, C. von Friedeburg, K.-P. Heue, G. Hönninger, U. Platt, I. Pundt, A. Richter, R. Rollenbeck, A. Rozanov, T. Wagner, F. Wittrock, P. Xie, The AMAXDOAS Experiment – Data Retrieval and Sensitivity Studies, *Proceedings of the ACVE workshop at ESTEC*, May 2001.

Wagner, T., Bruns, M., Burrows, J. P., Fietkau, S., Finocchi, F., Friedeburg, C. v., Heue, K.-P., Hönninger, G., Platt, U., Pundt, I., Rollenbeck, R., Wittrock F., and Xie, P.: The AMAXDOAS instrument and its application for SCIAMACHY validation, Proceedings of the 15th ESA symposium on rocket and balloon program and related research, Biarritz France, 28–31 May 2001, ESA SP-471, August 2001.

Heue K.-P., Bruns M, Burrows J.P., Lee W.D., Platt U., Pundt I., Richter A., Wagner T. and Wang P., NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O by the AMAXDOAS instrument for SCIAMACHY validation, Pro-

ceedings of the 6th ESA Symposium for European Rocket and Balloon Programmes, *St. Gallen, 2. to 5. June, 2003.*

Ping Wang, Andreas Richter, Marco Bruns, John P. Burrows, Klaus-Peter Heue, Thomas Wagner, Irene Pundt, Ulrich Platt, SCIAMACHY VALIDATION WITH AMAXDOAS NO<sub>2</sub> AND O<sub>3</sub> MEASUREMENTS, *Proc. of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September 2004 (ESA SP-572, April 2005)*

Heue, K.-P., S. Beirle, M. Bruns, J.P. Burrows, U. Platt, I. Pundt, A. Richter, T. Wagner, and P. Wang, SCIAMACHY validation using the AMAXDOAS instrument, Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria, ESA publication SP-572, (CD-ROM), 2004.

#### 4.5 Poster

M. Bruns, J.P. Burrows, S. Fietkau, A. Richter, F. Wittrock, F. Finocchi, C. von Friedeburg, G. Hönniger, K. P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, P. Xie, The AMAXDOAS experiment – data retrieval and sensitivity studies, *IAMAS, Innsbruck, 2001*

M. Bruns, J.P. Burrows, S. Fietkau, A. Richter, F. Wittrock, F. Finocchi, C. von Friedeburg, G. Hönniger, K. P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, P. Xie, „The AMAXDOAS experiment – data retrieval and sensitivity studies“, DPG, 2001

P. Wang, M. Bruns A. Richter, J. P. Burrows, K.-P. Heue, I. Pundt, T. Wagner, U. Platt, AMAXDOAS measurements from DLR Falcon Part1: north route, DPG, 2003

P. Wang, M. Bruns A. Richter, J. P. Burrows, K.-P. Heue, I. Pundt, T. Wagner, U. Platt, AMAXDOAS TROPOSPHERIC NO<sub>2</sub> MEASUREMENT ON FALCON, EGU assembly Nice, France, 2004

Lee, W.-D.; Heue, K.-P.; Laepple, T.; Wang, P.; Bruns, M.; Richter, A.; Burrow, J.; Wagner, T.; Pundt, I.; Platt, U., HCHO, NO<sub>2</sub> AND O<sub>4</sub> RESULTS FROM AIRBORNE MULTI-AXIS (AMAX)-DOAS MEASUREMENTS DURING FORMAT I/II (AUGUST 2002 AND SEPTEMBER 2003, MILAN, ITALY), presentation at the 1st General EGU Assembly, Nice, France, 25 - 30 April 2004.

M. Bruns, S. A. Buehler, J. P. Burrows, K.-P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Richter, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, „NO<sub>2</sub> Profile Retrieval using Airborne Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectrometer (AMAXDOAS) data“, 3<sup>rd</sup> SPARC General Assembly, Victoria, Canada, August 2004

Heue, Klaus-Peter, Marco Bruns, John P. Burrows, Ulrich Platt, Andreas Richter, Bing Chao Song, Thomas Wagner, Ping Wang, and Irene Pundt, Measurements of NO<sub>2</sub> and HCHO in Northern Italy with the AMAXDOAS Instrument, poster presentation at the DPG Tagung, Berlin, 04.03.-09.03.2005

#### 4.6 Vorträge

M. Bruns, J.P. Burrows, S. Fietkau, A. Richter, F. Wittrock, F. Finocchi, C. von Friedeburg, G. Hönniger, K. P. Heue, U. Platt, I. Pundt, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, P. Xie, „The Airborne MultiAXis Differential Optical Absorption Spectroscopy (AMAXDOAS) Experiment“, DOAS-Workshop Heidelberg, 13. September 2001

Heue, Klaus-Peter, Marco Bruns, John Burrows, Ulrich Platt, Irene Pundt, Andreas Richter, Thomas Wagner und Ping Wang, Tropospheric columns for NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O measured by AMAXDOAS over mid latitudes and tropics, DPG Tagung, Hannover, 4. - 28. März 2003.

A. Richter, O. Afe, H. Bovensmann, M. Bruns, M. Buchwitz, S. Fietkau, A. Heckel, T. Mecke, S. Noel, H. Oetjen, A. Rozanov, V. Rozanov, C. von Savigny, B. Sierk, P. Wang, F.

- Wittrock, M. Wuttke, and J. P. Burrows, SCIAMACHY: first UV/vis Results and DOAS Validation Measurements, NASA Goddard Space Flight Center, 27 March, 2003
- Heue, K.-P., M. Bruns, J. Burrows, W.-D. Lee, U. Platt, I. Pundt, A. Richter(2), B.Schulz, T. Wagner, P. Wang, AIRBORNE MULTI AXES DOAS MEASUREMENTS DURING THE SCIA VALUES AND FORMAT CAMPAIGNS, presentation at the EGS-AGU-EUG Joint Assembly Nice, France, 06 - 11 April 2003 2003.
- Ping Wang, Marco Bruns, Andreas Richter, John P. Burrows, Klaus-Peter Heue, Irene Pundt, Thomas Wagner and Ulrich Platt, AMAXDOAS measurements and first results of the EUPLEX campaign, 16th ESA symposium on rocket and balloon program and related research, St. Gallen, 02-05 June 2003, ESA SP-530, August 2003
- Heue, Klaus-Peter, Marco Bruns, John P. Burrows, Wei-Der Lee, Ulrich Platt, Irene Pundt, Andreas Richter, Thomas Wagner und Ping Wang, NO<sub>2</sub>-Columns measured by the AMAXDOAS instrument over Europe in 2003, DPG Frühjahrstagung, Munich, 22.-26.03.2004.
- A. Richter, O. Afe, H. Bovensmann, M. Bruns, M. Buchwitz, K.-U. Eichmann, S. Fietkau, A. Heckel, T. Medeke, S. Noel, H. Oetjen, A. Rozanov, V. Rozanov, C.von Savigny, A.-M. Schmoltner, B. Sierk, M. Sinnhuber, P. Wang, F. Wittrock, and J. P. Burrows, SCIAMACHY on ENVISAT: Results from the first 18 Months , NOAA, Boulder, USA, 20 April, 2004
- Wagner, T., S. Köhl, A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, K.-P. Heue, B. Kirchoff, W. Wilms-Grabe, P. Wang & U. Platt PRELIMINARY VALIDATION OF SCIAMACHY NADIR OCO SCDS, oral presentation at the ACVE-2 Validation workshop, Frascati, 3-7 May 2004.
- P. Wang, M. Bruns, A. Richter, J. P. Burrows , K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, AMAXDOAS tropospheric NO<sub>2</sub> measurements from the DLR- Falcon, International Chinese Ocean-Atmosphere Conference, Beijing, China, 27 June 2004
- M. Bruns, S. A. Buehler, J. P. Burrows, K.-P. Heue, U.Platt, I. Pundt, A. Richter, A. Rozanov, T. Wagner, P. Wang, „Profile Retrieval using Airborne Multi- AXis Differential Optical Absorption Spectrometer (AMAXDOAS) data“, NASA Goddard Space Flight Center, 16. August 2004
- P. Wang, A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt , SCIAMACHY VALIDATION WITH AMAXDOAS NO<sub>2</sub> AND O<sub>3</sub> MEASUREMENTS, ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, Sep. 6-10, 2004
- P. Wang, A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, AMAXDOAS measurements and results for the SCIA-VALUES campaigns, SCIAMACHY Validation Workshop, Bremen, Germany, 7 December, 2004
- Heue, K.-P., S. Beirle, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, P. Wang, A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, AMAXDOAS measurements and results in the SCIAVALUES campaigns: 1st part tropospheric NO<sub>2</sub>, oral presentation at the SCIAMACHY validation workshop and GSVT end meeting, Bremen, 6-8 Dec 2004.
- P. Wang, A. Richter, M. Bruns, J. P. Burrows, K.-P. Heue, T. Wagner, I. Pundt, U. Platt, AMAXDOAS tropospheric NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> measurements, KNMI, de Bilt, Netherlands, 24 March, 2005