

# **FP18 Atmospheric Trace Gases**

Aaron Mielke & Thomas Ackermann

# Abstract

This experiment was conducted in the scope of the advanced lab course in physics at the Heidelberg University.

The experiment was conducted in the week of the 8<sup>th</sup> april, 2019.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
1.1. Zusammensetzung der Atmosphäre . . . . .	3
1.2. Messgrößen . . . . .	3
1.3. DOAS . . . . .	3
1.3.1. Lambert-Beer Law . . . . .	4
1.4. Kurzband Komponenten . . . . .	4
1.4.1. Fraunhofer Referenzspektrum . . . . .	4
1.4.2. Spurengas Absorption . . . . .	4
1.4.3. Ring-Effekt . . . . .	4
1.5. Breitband Effekte . . . . .	4
1.6. Modifiziertes Lambert-Beer Gesetz . . . . .	4
<b>2. Versuchsdurchführung</b>	<b>5</b>
2.1. Software kennenlernen . . . . .	5
2.2. Charakterisierung der Messinstrumente . . . . .	5
2.2.1. Offset und Dunkelstrom . . . . .	5
2.2.2. Instrumenten- und totales Rauschen . . . . .	5
2.2.3. Kalibrierung des Spektrometers . . . . .	7
2.3. Labormessungen . . . . .	7
2.3.1. Anpassung von Referenzspektren . . . . .	7
2.3.2. NO <sub>2</sub> Spektrum von einer gefüllten Gaszelle . . . . .	7
2.4. Atmosphärische Messungen . . . . .	8
2.4.1. Optimierung des Fitalgorithmuses . . . . .	8
2.4.2. Untersuchung der Tagesmessung . . . . .	9
2.5. Multi Axis DOAS . . . . .	10
<b>3. Diskussion</b>	<b>10</b>
<b>Literatur</b>	<b>10</b>
<b>A. Tabellen</b>	<b>11</b>

# 1. Introduction

## 1.1. Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Atmosphäre der Erde besteht aus einer Mischung verschiedener Gase. Tabelle 1.1 zeigt eine Liste der Hauptkomponenten.

Gas	Symbol	Rel. Anteil
Stickstoff	N <sub>2</sub>	78.084%
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20.942%
Argon	Ar	0.934 %
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	ca. 1 %
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	358 ppmv
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	0.55 ppmv
Kohlenmonoxid	CO	0.11 ppmv
Ozon	O <sub>3</sub>	0.04 ppmv

**Tabelle 1.1:** Gase in der Atmosphäre

Ozon ist ein sehr effizienter Absorber von UV Strahlung und bietet daher einen Schutz vor schädlicher Strahlung für den Menschen.

## 1.2. Messgrößen

Die Konzentration eines Spurengases ist die Zahl der Moleküle pro Volumeneinheit und hat daher die Dimension [Moleküle/cm<sup>3</sup>]. Eine andere wichtige Größe ist das Mischverhältnis. Sie der relative Anteil eines Spurengases im Vergleich zur Luftmenge und wird mit [ppm] oder [ppt] angegeben. Bei diesem Versuch ist ebenfalls die *column density*

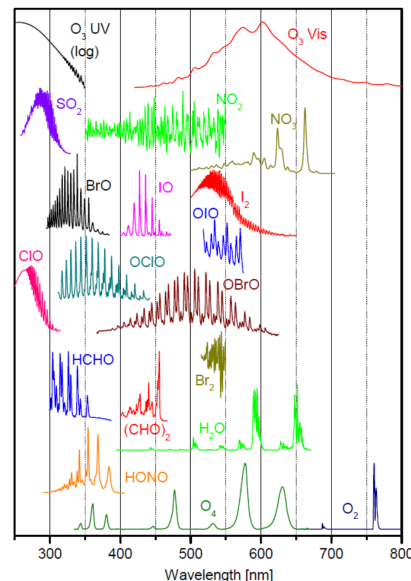
$$CD = \int \rho(s) ds, \quad (1)$$

welche die Einheit [Moleküle/cm<sup>2</sup>] hat.

## 1.3. DOAS

*Differential Optical Absorption Spectroscopy* (DOAS) wird verwendet um die Konzentrati-

on eines bestimmten Spurengases in der Atmosphäre zu bestimmen - was das Ziel dieses Experimentes ist. Das Hauptprinzip ist das Folgende: Man nimmt zwei Spektren auf, eines welches auf der Erde aufgenommen wurde (also mit Absorption des Sonnenlichtes durch die Atmosphäre) und eines bei dem die Atmosphäre nicht präsent ist (Von Satellit aus aufgenommen.) Jedes Gas absorbiert bestimmte Wellenlängen des Sonnenlichts.



**Abbildung 1.1:** Charakteristische Linien verschiedener Gase

Wenn nun zwei Spektren, wie beschrieben, aufgenommen werden können das charakteristische Verhalten der Gase daran erkannt werden dass die Intensitäten an manchen Stellen kleiner sind.

Wenn man nun weiß welche Charakteristika zu welchen Gasen gehören kann die Dichte des Gases in der Atmosphäre bestimmt werden. In diesem Versuchsaufbau steht allerdings kein Satellit zur Verfügung so dass sich die Frage stellt wie man an ein Sonnenspektrum ohne Atmosphäre kommt. Die Lösung hier besteht daraus, dass Spektrum mit verschiedenen Winkeln aufgenommen wird und dann verglichen wird. Die mittlere Weglänge

die das Licht zurücklegt ist viel kürzer wenn genau im Zenit gemessen wird als bei anderen Winkeln. Daher ist hier die Absorption durch Spurengase viel geringer sodass man einen ähnlichen Unterschied wie bei einem Satelliten erhält.

### 1.3.1. Lambert-Beer Law

Die Intensität eines Lichtstrahls (einer Elektromagnetischen Welle) nimmt durch Streuung und Absorption ab, wenn es durch Materie propagiert (siehe Abbildung 1.2).

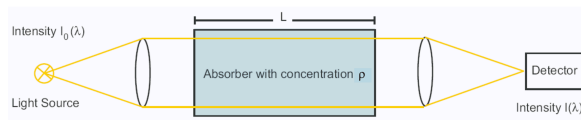


Abbildung 1.2: Darstellung des Lambert-Beer Gesetzes

Die Größe des Verlustes kann mithilfe des Lambert-Beer Gesetzes bestimmt werden. Sei  $I_0(\lambda)$  die Startintensität des Lichtstrahls, dann ist die Intensität  $I(\lambda, L)$  nachdem der Lichtstrahl eine Länge  $L$  der Mediums überwunden hat

$$I(\lambda, L) = I_0(\lambda) \exp(-\rho L \sigma(\lambda)), \quad (2)$$

wobei  $\sigma(\lambda)$  der Absorptionswirkungsquerschnitt und  $\rho$  die Konzentration des Spurengases ist.

## 1.4. Kurzband Komponenten

### 1.4.1. Fraunhofer Referenzspektrum

Um die Strukturen der Sonne zu berücksichtigen wird ein Fraunhofer Referenzspektrum verwendet.

### 1.4.2. Spurengas Absorption

Die Hauptmessgröße des DOAS ist die *slant column density* (SCD oder  $S$ ), welche als die integrierte Dichte eines Spurengases  $i$  entlang eines Lichtpfades der Länge  $L$  definiert ist.

$$SCD = S_i(\lambda) = \int_0^{L(\lambda)} \rho_i(s) ds, \quad (3)$$

### 1.4.3. Ring-Effekt

## 1.5. Breitband Effekte

### 1.6. Modifiziertes Lambert-Beer Gesetz

Wenn man nun diese Effekte mit einbezieht, so kann man ein neues modifiziertes Lambert-Beer Gesetz aufstellen.

$$I(\lambda, L) = I_0(\lambda) \exp \left( -R(\lambda) - \sum_i \sigma_i(\lambda) S_i(\lambda) \right) \times \exp \left[ -L (\sigma_{i0}(\lambda) \rho_o + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)) \right],$$

Die erste Exponentialfunktion beinhaltet alle Kurzband Effekte und die zweite alle Breitband Effekte. Wenn man das modifizierte Lambert-Beer Gesetz nun nach  $\log \frac{I}{I_0}$  umformt erhält man die optische Dichte  $\tau$

$$\tau = \log \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

$$= -R(\lambda) - \sum_i \sigma_i(\lambda) S_i(\lambda) - \sum_k b_k \lambda^k. \quad (5)$$

Hierbei berücksichtigt das Polynom  $\sum b_k \lambda^k$  Breitband Effekte und  $R(\lambda)$  ist das Ring-Spektrum.

$$\chi^2 = \left[ \log \left( \frac{I_0 + I_{\text{ofs}}}{I} \right) - R - \sum_i \sigma_i S_i - \sum_k b_k \lambda^k \right]^2$$

Brauchen wir noch mehr Grundlagen?

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1. Software kennenlernen

Während des Versuches wurde das Programm DOASIS verwendet um die Spektren aufzunehmen und später die Fits durchzuführen.

Zu Beginn wurde durch variieren der Messzeit (*exposure time*) und der Anzahl der Scans (*exposures*) ein erster Überblick über das Programm DOASIS verschafft.

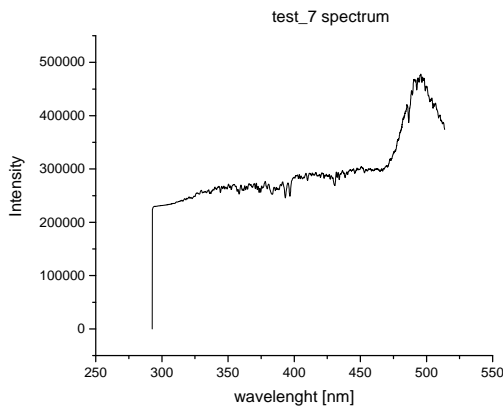


Abbildung 2.1: Test Spektrum

## 2.2. Charakterisierung der Messinstrumente

### 2.2.1. Offset und Dunkelstrom

Es gibt zwei Haupteffekte die Ungenauigkeiten bei der Messung verursachen können. Durch Brownsche Bewegung in den Kabeln wird ein kleiner elektrischer Strom erzeugt, den man auch als Dunkelstrom bezeichnet. Um die Größenordnung des Dunkelstromes einzuschätzen werden einminütige Messungen durchgeführt, bei denen die Kamera abgedeckt ist.

Die CCD-Kameras haben außerdem ein Offset, welcher durch viele kurze Messungen bestimmt werden kann.

Dunkelstrom und Offset müssen bei jedem folgenden Spektrum abgezogen werden. Die Messung des Offsets wurde als erstes durchgeführt. Hierbei wurden 20000 Messungen mit jeweils 3 ms Messzeit durchgeführt. Anschließend wurde der Dunkelstrom bei verschiedenen Messzeiten gemessen (siehe Abbildung 2.2).

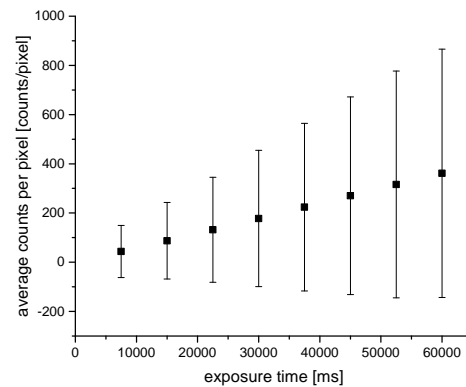


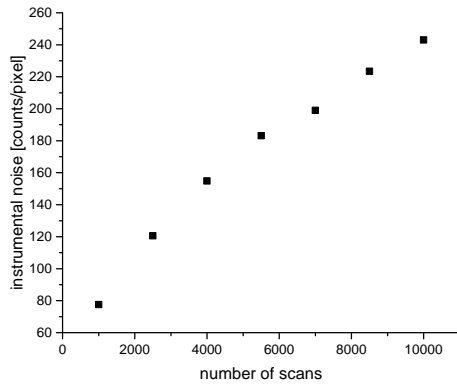
Abbildung 2.2: Abhängigkeit des Dunkelstromes von der Messzeit

### 2.2.2. Instrumenten- und totales Rauschen

Wie im oberen Abschnitt 2.2.1 gesehen, entstehen Messfehler, die zeitlich nicht konstant sind. Zunächst widmet man sich dem instrumentenbedingten Rauschen. Dazu werden zwei Offsets mit identischen Einstellungen kurz hintereinander aufgenommen, über die entstandene Differenz ( $\sigma_D$ ) lässt sich dann das Instrumentenrauschen bestimmen

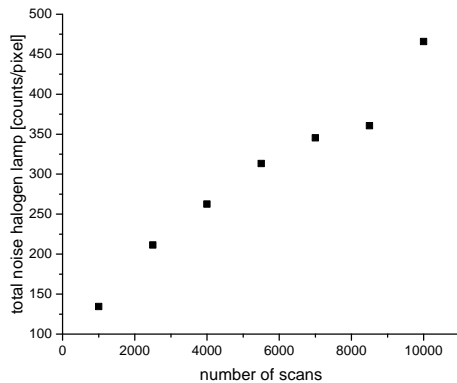
$$\sigma_I = \frac{\sigma_D}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Ein Auftragen des Rauschens gegen die Anzahl der Scans liefert einen linearen Zusammenhang (siehe Diagramm 2.3)



**Abbildung 2.3:** Abhängigkeit des Instrumentenrauschens von der Anzahl der Scans

Zur Bestimmung des totalen Rauschens wurde nun das Spektrum einer Halogenlampe aufgenommen. Es wurden ebenfalls wieder jeweils zwei Spektren bei identischen Einstellungen kurz hintereinander aufgenommen. Um systematische Strukturen, wie das Schwanken der Lampenintensität zwischen den beiden Messungen, zu berücksichtigen wurde ein Hochpassfilter an die Daten angelegt.

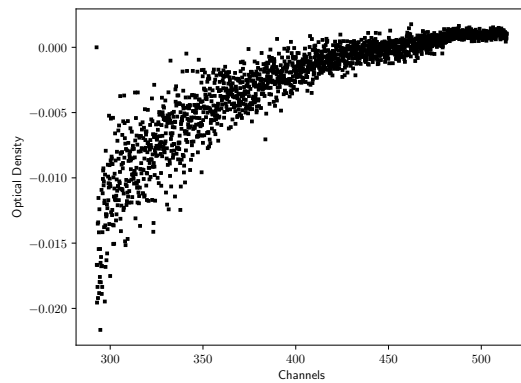


**Abbildung 2.4:** Abhängigkeit des totalen Rauschens von der Anzahl der Scans

Es zeigt sich in Abbildung 2.4 die gleiche Charakteristik wie in Abbildung 2.3. Lediglich

die Stärke des Rauschen unterscheidet sich, was aber zu erwarten war, da im totalen Rauschen auch das Instrumentenrauschen integriert ist.

Eine weitere Untersuchung der Halogenlampenspektren ermöglicht einen Einblick in die optische Dichte des relativen totalen Rauschens. Dazu wurden die zuvor aufgenommenen Spektren durcheinander geteilt und anschließend der Logarithmus des Ergebnisses betrachtet.



**Abbildung 2.5:** Optische Dichte der Halogenlampe

Man erwartet, dass der Mittelwert bei Null liegt, da zwischen der Aufnahme der Spektren so wenig wie möglich Zeit vergangen ist. Allerdings kann bei kleinerer Channelzahl höhere Schwankungen ausgemacht werden und insgesamt ist ein kurven artiger Verlauf zu erkennen. Das größere Schwanken lässt sich darauf zurückführen, dass bei kleiner Channelzahl die *Counts* geringer ausfallen als bei höherer Channelzahl. Durch Schwankungen der Halogenlampenintensität entsteht in den Daten die beobachtete Krümmung, welche bei höherer Scanzahl größer wird. Die Schwankungen verlieren bei höheren *Counts* an Bedeutung.

### 2.2.3. Kalibrierung des Spektrometers

Zur Kalibrierung des Spektrometers wird eine Quecksilberdampfampe verwendet, da diese gut zu identifizierende Spektrallinien aufweist. Das aufgenommene Spektrum wurde nach bekannten Spektrallinien untersucht und anhand von vier Maxima (entsprechend den Channelnummern: 335, 595, 946, 1239) das Spektrometer kalibriert.

Für die Kalibrierung wird ein Polynom zweiter Ordnung genutzt mit folgenden Parameter:

$$\text{coef } f_0 = 292.61 \pm 0.043611 \quad (7)$$

$$\text{coef } f_1 = 0.12726 \pm 0.00016266 \quad (8)$$

$$\text{coef } f_2 = 9.3859 \cdot 10^{-6} \pm 1.193 \cdot 10^{-7} \quad (9)$$

Über die *full width at half max* (FWHM) lässt sich nun die optische Auflösung des Spektrometers bestimmen.

Maximum	Channel	FWHM [nm]
1	~ 160	$1.2 \pm 0.1$
2	~ 594	$0.8 \pm 0.1$
3	~ 945	$0.6 \pm 0.1$
4	~ 1240	$0.7 \pm 0.1$

**Tabelle 2.1:** Optische Auflösung der verschiedenen Maxima

Bei der Analyse der FWHM stellt sich heraus, dass die optische Auflösung des Spektrometers bei höherer Channelzahl besser wird, deshalb wird versucht in den folgenden Messungen die Analyse, wenn möglich, im hohen Channelbereich durchzuführen.

## 2.3. Labormessungen

### 2.3.1. Anpassung von Referenzspektren

Mithilfe eines Literaturspektrums kann ein Vergleichsspektrum generiert werden. Die

verwendeten Literaturspektren haben allerdings unterschiedliche Auflösungen und daher muss man diese entsprechend skalieren. Dies kann mithilfe einer Faltung erledigt werden. Die Faltung einer Funktion  $f$  mit einer Funktion  $g$  ist definiert als

$$(f * g)(x) := \int f(y)g(x - y)dy. \quad (10)$$

Die Faltung sorgt zusätzlich dafür, dass das Spektrum geglättet wird. Wellenlänge die außerhalb des Bereiches der Messgeräte liegt werden durch die Faltung abgeschnitten.

Es wurden Spektren von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{O}_4$  angepasst. Bei dem Referenzspektrum von  $\text{H}_2\text{O}$  wurde, im Gegensatz zu den anderen Spektren, das Spektrum erweitert. Dafür wurden um die Struktur Nullwerte eingefügt.

**Klingt blöd**

### 2.3.2. $\text{NO}_2$ Spektrum von einer gefüllten Gaskelle

Um die in den vorigen Abschnitten durchgeführten Vorbereitungen zu testen wird das Spektrum der Halogenlampe untersucht, wenn eine Glasküvette mit  $\text{NO}_2$  gefüllt in den Lichtweg gestellt wird. **Vielleicht hier Bild oder Sketch vom Versuchsaufbau**

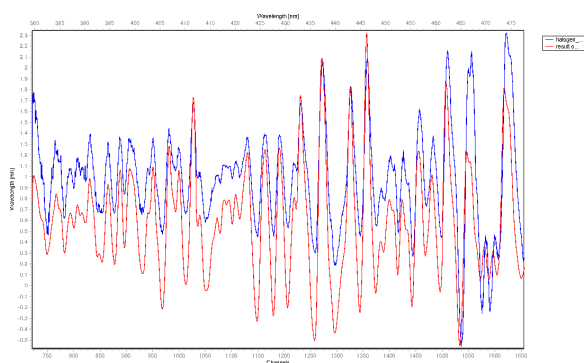
Mithilfe des Lambert-Beer Gesetzes lässt sich nun über die optische Dichte innerhalb der Gasküvette die Konzentration bestimmen (vgl. Gleichung (2) und (5))

$$\tau = \ln\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) = \sigma_{\text{NO}_2}(\lambda) \cdot \rho_{\text{NO}_2} \cdot L. \quad (11)$$

Bei der Aufnahme der Spektren ist drauf zu achten, dass kein Teilbereich in Sättigung ist. Ein mögliches Anpassen der Einstellungen der Messungen ist ohne weiteres möglich. Eine Änderung der Anzahl der Scans oder der Sättigung macht sich nur als eine Konstante

bemerkbar, die im **ergänzen warum Änderungen nichts ausmachen**

Über einen *least-square-fit* wird nun die SCD so variiert, sodass das  $\chi^2$  minimiert wird. In A.6 wurden die Fitparameter bei verschiedenen Fitbereichen betrachtet. Dabei wurde immer ein Polynom 5. Grades ohne Offset gefittet. Den optimalen Fitbereich lässt sich über eine Überlagerung (siehe Abbildung 2.6) des aufgenommenen Spektrums mit dem  $\text{NO}_2$  Referenzspektrum finden.



**Abbildung 2.6:** Überlagerung des aufgenommenen und des Referenz-Spektrums

Die Überlagerung zeigt im Channelbereich 1000 – 1700 die gleichen Strukturen. Der Fit wird in diesem Bereich durchgeführt. Für die genaue Bestimmung der  $\text{NO}_2$  Konzentration wurde ein Channelbereich von 1206 – 1663 ausgewählt, dabei wurde darauf geachtet, dass die Intensität bei einer Wellenlänge von 470nm ca. 80% betrug. Damit konnten beim Fit die Parameter

$$\chi^2 = 4.367 \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

$$\text{fit coeff} = -4.96 \cdot 10^{17} \pm 1.95 \cdot 10^{15}, \quad (13)$$

$$\text{shift} = 0.0955 \pm 0.00538, \quad (14)$$

$$\text{squeeze} = 0.993 \pm 0.000159, \quad (15)$$

erreicht werden. Mit der nun bestimmten *slant column density* kann nun die  $\text{NO}_2$  Konzentration in der Küvette berechnet werden.

Die Länge wurde von Hand auf  $2.0 \pm 0.1 \text{ cm}$  bestimmt, sodass sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung eine Konzentration von

$$\rho_{\text{NO}_2} = (2.48 \pm 0.12) \cdot 10^{20} \left[ \frac{\text{Moleküle}}{\text{liter}} \right] \quad (16)$$

ergibt. Ebenfalls lässt sich nun das Mischverhältnis auf

$$R = \frac{\rho_{\text{NO}_2}}{\rho_{\text{std.}}} = (9.22 \pm 0.45) \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

bezeichnen. Dazu wurde für die  $\rho_{\text{std.}}$  aus den Normalbedingungen gewonnen.

$$\rho_{\text{std.}} = \frac{N_A}{V_M}. \quad (18)$$

Mit  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$  und  $V_M = 22.4 \frac{\text{liter}}{\text{mol}}$ .

## 2.4. Atmosphärische Messungen

Nachdem man sich nun mit dem Messverfahren und der Analyse der Daten vertraut gemacht hat, werden nun atmosphärische Spurengase untersucht. In diesem Praktikumsversuch beschränkt man sich auf  $\text{O}_3$  und  $\text{NO}_2$ . Für die Analyse wurde ein Tag ausgesucht, bei dem gutes Wetter herrschte, so dass Wolken nicht die Messung beeinträchtigen können, über einen langen Zeitraum aufgenommen wurde, sowie nicht zu weit in der Vergangenheit lag, da man einer möglichen Abweichung von Dunkelstrom und Offset minimieren wollte. Die Wahl fiel auf den 23.04.2019, wo über einen Zeitraum von 9 : 13 – 23 : 56 UTC aufgenommen wurde.

### 2.4.1. Optimierung des Fitalgorithmuses

Die für die DOASIS nötige Referenzmessung, die Fraunhoferreferenz, wurde die Tagesmessung mit dem niedrigsten *solar zenith angle*



(SZA) ausgewählt. Da der statistische Lichtweg hier am kürzesten ist und somit am wenigsten von möglichen Spurengasen absorbiert wurde. Um nun die Parameter des Fits optimal anpassen zu können, wird ein Spektrum bei 80 SZA ausgewählt um die größtmögliche Differenz zwischen den beiden Spektren zu erzeugen. Dies gewährleistet, dass die zu untersuchenden Strukturen am prägnantesten hervortreten.

Aufgrund des inelastischen *rotational Raman scattering* kommt es zu leichten Wellenlängenverschiebungen, dies sorgt für eine Art *Auffüllung* der starken Absorptionslinien. Um dies Vorzubeugen wird ein *Ringspektrum*  $R(\lambda)$  aus dem Fraunhoferspektrum berechnet. Aus einer Berechnung der optischen Dichte und dem Vergleich mit den Referenzspektren der Spurengase (vgl. Abschnitt 2.3.2) werden die jeweiligen Fitbereiche ermittelt. Die Fitbereiche sind in Tabelle A.7 aufgelistet.

Der Fitalgorithmus greift nun auf das Fraunhoferreferenzspektrum als first fit reference, dem Ringspektrum und den Referenzwirkungsquerschnitten der Spurengase zurück.  $H_{20}$  konnte dabei nicht immer verwendet werden, da es in manchen Bereichen Singularitäten aufweist. **Wirkungsquerschnitte? muss einheitlich sein. Danach noch präzisieren starr manche**

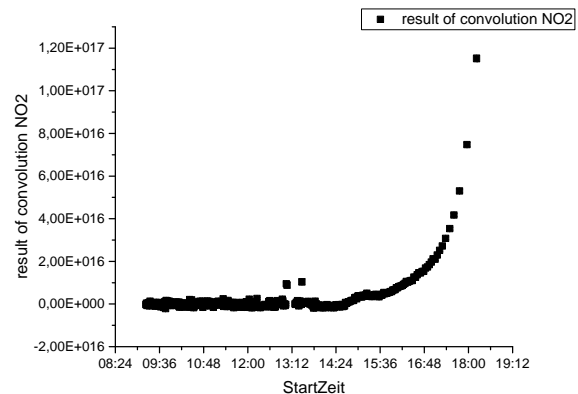


Abbildung 2.7:  $\Delta$ SCD von  $NO_2$  über den Tag des 24.04.2019

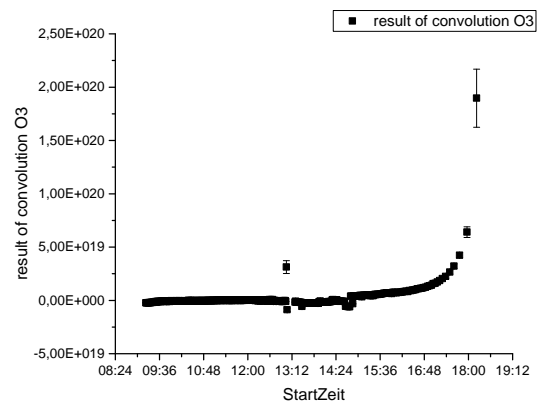


Abbildung 2.8:  $\Delta$ SCD von  $O_3$  über den Tag des 24.04.2019

## 2.4.2. Untersuchung der Tagesmessung

Nachdem die Fitbereiche optimiert wurde, werden die die Daten des ganzen Tages untersucht. Dabei standen 436 Aufnahmen zur Verfügung.

*Warum die so aussehen*

Eine Untersuchung der SCD gegen den *Air Mass Factor* (AMF), lässt Rückschlüsse über eine Konzentrationsänderung über den Tag zu.

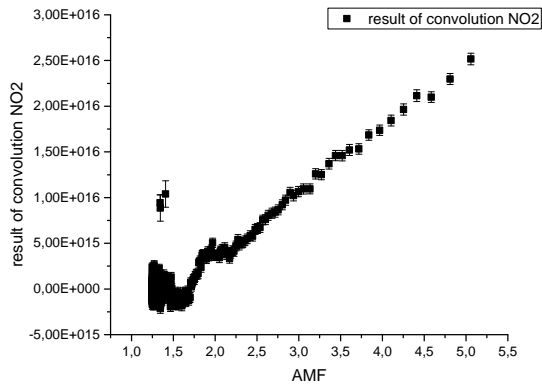


Abbildung 2.9: Langley-Plot von NO<sub>2</sub>

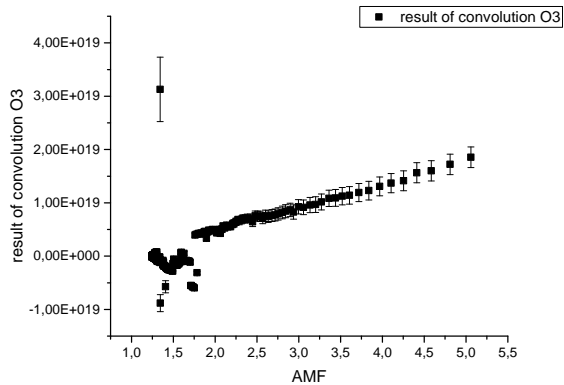


Abbildung 2.10: Langley-Plot von O<sub>3</sub>

Erklärung usw., außerdem Fit für  $SCD_{ref}$  von O<sub>3</sub>

Eine Veranschaulichung der Konstanz ? von O<sub>3</sub> lässt sich über die *vertical column density* (VCD) aufzeigen.

Hier dann der Plot, wir haben es bisher leider gegen das Falsche aufgetragen

Die VCD berechnet sich dabei leicht über geometrische Zusammenhänge:

$$VCD = SCD \cdot \cos(\theta) \quad (19)$$

Vergleich mit Daten von Satellitenmessungen

## 2.5. Multi Axis DOAS

Einen Einblick in die vertikale Verteilung der Spurengase liefert die MAX-DOASIS Methode. Es wurden vier Messreihen aufgenommen, die jeweils Messungen bei 7°, 12° und 90° beinhalten. Dabei wurde immer beim kleinsten Winkel angefangen. Die Messung wurde bei starker Bewölkung von 14:41 bis 15:01 MEZ durchgeführt. Der Fit von O<sub>4</sub> wurde im Channelbereich von 1500 – 1800 durchgeführt, wobei dieser Bereich bei einigen Messungen angepasst werden musste. Dies war wie folgt der Fall 1.Messung : 1550 – 1750, 2.Messung : 1550 – 1720, 4.Messung : 1550 – 1750, 5.Messung : 1550 – 1750. Die Fitergebnisse sind in Tabelle A.8 aufgetragen. Eine  $\Delta SCD$  Analyse der Daten erlaubt uns nun die oben erwähnte vertikale Verteilung der Gase zu untersuchen.

Hier die Plots, welche Gase in Troposphäre, Wolken?, usw.

## 3. Diskussion

## A. Tabellen

Belichtungszeit [ms]	Mittelwert [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]	Standardabweichung [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]
52500	316.0	460.9
45000	270.2	401.9
37500	223.9	340.7
30000	177.8	277.0
22500	132.1	213.4
15000	87.2	155.6
7500	43.3	105.9

**Tabelle A.1:** Dunkelstrom bei unterschiedlichen Belichtungszeiten

Anzahl der Scans	Mittelwert [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]	Standardabweichung [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]
10000	−1112.8	343.6
8500	−1107.8	315.9
7000	−444.5	281.4
5500	109.1	258.9
4000	−147.9	219.1
2500	−188.7	170.5
1000	−8.7	109.6

**Tabelle A.2:** Differenz Offset bei unterschiedlicher Scanzahl

Anzahl der Scans	Mittelwert [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}} \cdot 10^{-15}$ ]	Standardabweichung [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]
10000	47	658.8
8500	170	538.3
7000	29	488.3
5500	94	443.0
4000	−49	371.2
2500	−9.5	299.0
1000	3.3	190.1

**Tabelle A.3:** Differenz Offset bei unterschiedlicher Scanzahl (Halogen)

Maximum	Channel	Maximum [ $\frac{\text{counts}}{\text{pixel}}$ ]	FWHM [nm]
1	$\sim 160$	635.8	$1.2 \pm 0.1$
2	$\sim 594$	920.0	$0.8 \pm 0.1$
3	$\sim 945$	1150.5	$0.7 \pm 0.1$
4	$\sim 1240$	3612.3	$0.7 \pm 0.1$

**Tabelle A.4:** Maxima des Quecksilberdampfspektrums (unkalibriert)

Maximum	Channel	FWHM [nm]
1	$\sim 160$	$1.2 \pm 0.1$
2	$\sim 594$	$0.8 \pm 0.1$
3	$\sim 945$	$0.6 \pm 0.1$
4	$\sim 1240$	$0.7 \pm 0.1$

**Tabelle A.5:** Optische Auflösung der verschiedenen Maxima

Bereich	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$	Fit coeff. $\cdot 10^{15}$	shift	squeeze
1150 – 1379	8.67	$-484 \pm 1.97$	$-0.00497 \pm 0.00495$	$0.994 \pm 0.000333$
1026 – 1377	19.2	$-472 \pm 2.08$	$0.0533 \pm 0.00682$	$0.955 \pm 0.000261$
1026 – 1496	33.2	$-475 \pm 2.23$	$0.052 \pm 0.00682$	$0.995 \pm 0.000246$
1026 – 1663	43.7	$-488 \pm 1.95$	$0.091 \pm 0.00546$	$0.993 \pm 0.000162$

**Tabelle A.6:** Fit bei verschiedenen Fitbereichen

Molekül	Wellenlänge [nm]	Fit coeff.	shift	squeeze
O <sub>3</sub>	311.07 – 339.71	$3.36 \cdot 10^{19} \pm 7.71 \cdot 10^{17}$	$0.0135 \pm 0.00985$	$0.992 \pm 0.00119$
NO <sub>2</sub>	413.40 – 467.43	$3.08 \cdot 10^{16} \pm 6.35 \cdot 10^{14}$	$0.114 \pm 0.026$	$0.99 \pm 0.000799$
H <sub>2</sub> O	439.3 – 451.06	$7.68 \cdot 10^{21} \pm 1.19 \cdot 10^{22}$	$0.0538 \pm 0.0264$	$0.972 \pm 0.00372$
O <sub>4</sub>	440.13 – 451.57	$4.01 \cdot 10^{43} \pm 2.17 \cdot 10^{43}$	$0.0439 \pm 0.0285$	$0.972 \pm 0.00427$

**Tabelle A.7:** Fit mit Atmosphärendaten

Nummer	Winkel	Molekül	Fit coeff.	shift	squeeze
1	7	O <sub>3</sub>	$1.09 \cdot 10^{18} \pm 5.9 \cdot 10^{16}$	$0.15 \pm 0.0227$	$0.99 \pm 0.00244$
		NO <sub>2</sub>	$5.72 \cdot 10^{16} \pm 5.523 \cdot 10^{14}$	$0.0716 \pm 0.0119$	$0.993 \pm 0.000383$
		O <sub>4</sub>	$3.41 \cdot 10^{43} \pm 8.08 \cdot 10^{41}$	$0.308 \pm 0.0284$	$0.988 \pm 0.00178$
	12	O <sub>3</sub>	$7.50 \cdot 10^{17} \pm 5.12 \cdot 10^{16}$	$0.0213 \pm 0.0294$	$1 \pm 0.00329$
		NO <sub>2</sub>	$4.92 \cdot 10^{16} \pm 5.39 \cdot 10^{14}$	$0.0782 \pm 0.0144$	$0.993 \pm 0.000463$
		O <sub>4</sub>	$2.80 \cdot 10^{43} \pm 3.83 \cdot 10^{42}$	$-0.699 \pm 0.0927$	$1.02 \pm 0.00838$
2	7	O <sub>3</sub>	$6.21 \cdot 10^{17} \pm 6.78 \cdot 10^{16}$	$0.028 \pm 0.0472$	$1.01 \pm 0.00554$
		NO <sub>2</sub>	$2.77 \cdot 10^{16} \pm 6.31 \cdot 10^{14}$	$0.0455 \pm 0.0296$	$0.992 \pm 0.000949$
		O <sub>4</sub>	$2.79 \cdot 10^{43} \pm 2.07 \cdot 10^{42}$	$-0.331 \pm 0.0791$	$1 \pm 0.00758$
	12	O <sub>3</sub>	$3.23 \cdot 10^{17} \pm 7.61 \cdot 10^{16}$	$-0.489 \pm 0.0549$	$1.05 \pm 0.00844$
		NO <sub>2</sub>	$1.45 \cdot 10^{16} \pm 6.10 \cdot 10^{14}$	$0.0375 \pm 0.0549$	$0.991 \pm 0.00176$
		O <sub>4</sub>	$1.35 \cdot 10^{43} \pm 1.97 \cdot 10^{42}$	$-0.314 \pm 0.151$	$1.01 \pm 0.0149$
3	7	O <sub>3</sub>	$6.01 \cdot 10^{17} \pm 7.20 \cdot 10^{16}$	$-0.0773 \pm 0.0515$	$1.01 \pm 0.00596$
		NO <sub>2</sub>	$2.24 \cdot 10^{16} \pm 5.85 \cdot 10^{14}$	$0.0582 \pm 0.034$	$0.993 \pm 0.00109$
		O <sub>4</sub>	$2.69 \cdot 10^{43} \pm 1.95 \cdot 10^{42}$	$-0.32 \pm 0.0884$	$0.998 \pm 0.00815$
	12	O <sub>3</sub>	$3.51 \cdot 10^{17} \pm 6.94 \cdot 10^{16}$	$-0.106 \pm 0.0847$	$1 \pm 0.00946$
		NO <sub>2</sub>	$1.10 \cdot 10^{16} \pm 5.37 \cdot 10^{14}$	$-0.00289 \pm 0.0639$	$0.994 \pm 0.00205$
		O <sub>4</sub>	$9.36 \cdot 10^{42} \pm 4.43 \cdot 10^{41}$	$-0.388 \pm 0.125$	$1.01 \pm 0.00768$
4	7	O <sub>3</sub>	$8.81 \cdot 10^{17} \pm 7.16 \cdot 10^{16}$	$0.361 \pm 0.0339$	$0.977 \pm 0.00858$
		NO <sub>2</sub>	$2.6 \cdot 10^{16} \pm 5.13 \cdot 10^{14}$	$0.0915 \pm 0.0268$	$0.991 \pm 0.000906$
		O <sub>4</sub>	$2.81 \cdot 10^{43} \pm 3.52 \cdot 10^{41}$	$-0.31 \pm 0.0256$	$0.989 \pm 0.00159$
	12	O <sub>3</sub>	$7.53 \cdot 10^{17} \pm 7.60 \cdot 10^{16}$	$0.179 \pm 0.0425$	$0.992 \pm 0.00463$
		NO <sub>2</sub>	$2.00 \cdot 10^{16} \pm 4.75 \cdot 10^{14}$	$0.0706 \pm 0.0325$	$0.992 \pm 0.0011$
		O <sub>4</sub>	$1.9 \cdot 10^{43} \pm 3.361 \cdot 10^{41}$	$-0.209 \pm 0.0285$	$0.981 \pm 0.00182$

**Tabelle A.8:** Fitergebnisse verschiedener Winkel

## Literatur

- [1] Christoph Kern. „FP Skript: Atmospheric Trace Gases“. In: (Dez. 2018). URL: <https://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/anleitungen/F18.pdf>.