Universität Augsburg Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät



# Analyse der Strahlungsenergieflussdichte des OH-Leuchtens an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus

Masterarbeit im Studiengang M.Sc. Physik von Anna Sophie Moser

> vorgelegt am: 13. April 2023

Erstprüfer: Prof. Dr. Michael Bittner Zweitprüfer: PD Dr. German Hammerl

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einl	eitung	1
2.	Das	OH-Leuchten	3
	2.1.	Übergänge des OH-Radikals	3
	2.2.	Van Rhijn-Funktion	6
	2.3.	Strahlungsenergieflussdichte	7
3.	Aufl	oau und Funktionsweise des GRIPS-Instruments	9
	3.1.	Messinstrument GRIPS	9
	3.2.	Eigenschaften des Detektors	10
	3.3.	Gesichtsfeld	13
	3.4.	Kalibration der PTB	14
4.	Proz	essierung der OH-Daten	17
	4.1.	Bestimmung der Wellenlänge einer Nacht	18
	4.2.	Genauere Betrachtung der Untergrundhelligkeit	21
	4.3.	Qualitätssicherung	33
	4.4.	Unsicherheitsabschätzung	43
5.	Mes	sungen und Diskussion der Strahlungsenergieflussdichten	49
	5.1.	Jahre 2010 bis 2022	49
	5.2.	Langzeitentwicklung	60
	5.3.	Vergleich der beiden Instrumente	62
6.	Zusa	mmenfassung und Ausblick	65
Ar	hang		69
	A.	Abbildungen und Tabellen	69
Lit	eratu	rverzeichnis	77

## 1. Einleitung

Das sog. Nachthimmelleuchten (engl. *Airglow*) ist ein schwaches Leuchten aus der mittleren Atmosphäre in etwa 80-100 km Höhe. Das Hydroxyl-Molekül im Airglow emittiert kaum im sichtbaren Bereich - anders als atomarer Sauerstoff oder Natrium - sondern im nahen Infrarot. Das Phänomen wurde von A.B. Meinel entdeckt (Meinel, 1948). Eine Übersicht über alle Emissionslinien ist in Rousselot gegeben (Rousselot et al., 2000).

Airglow wird seit den 1980er Jahren mit GRIPS-Instrumenten (engl. *GRound-based Infrared P-branch Spectrometer*) gemessen, die von der Universität Wuppertal entwickelt wurden und beginnend mit GRIPS 5 seit 2008 am Deutschen Fernerkundungszentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) weiterentwickelt werden.

Dennoch sind Angaben zur absoluten Intensität des Airglow mit Ausnahme von Satellitendaten und astronomischen Messungen eher selten. Denn der für die Klimaforschung interessante Parameter der OH-Messungen, die Rotationstemperatur des Moleküls, lässt sich auch ohne Kenntnis der absoluten Intensitäten ableiten. Nichtsdestotrotz stellt auch die absolute Intensität eine bedeutende Kenngröße unter anderem für die Strahlungsbilanz oder die Konzentration von atomaren Sauerstoff in der oberen Mesosphäre bzw. unteren Thermosphäre (engl. *Mesosphere and Low Thermosphere* - MLT) dar. Im Jahr 2017 wurden daher die beiden, an der Referenzstation des NDMC (engl. *Network for the Detection of Mesospheric Change*) positionierten Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) kalibriert. Die beiden GRIPS-Instrumente an der NDMC-Station *Umweltforschungsstation "Schneefernerhaus"* (UFS) sind moderne Infrarotspektrometer und nehmen mithilfe eines Indiumgalliumarsenid-Detektors (InGaAs) Daten im Wellenlängenbereich von ca. 1500 nm bis 1600 nm auf.

Am Ende der Auswertung der umfangreichen Kalibrationsdaten steht deren eigentliche Anwendung auf die gemessenen Daten. Dabei gilt es einige Herausforderungen zu überwinden, die insbesondere auf einen endlich großen Untergrund, bestehend aus Dunkelstrom der Sensoren und einer Resthelligkeit des Nachthimmels, zurückzuführen sind. Dies kann die akkurate Schätzung der OH-Intensitäten erheblich verfälschen. Die bessere Bestimmung dieses Untergrunds und gegebenenfalls seine Zuordnung zu einer Quelle, sowie eine bessere Unterscheidung der Spektren bzgl. gestörter Beobachtungsbedingungen (z.B. durch Bewölkung) als auch eine Unsicherheitsabschätzung, die es erlaubt verschiedene Einflussparameter quantitativ zu vergleichen, bilden einen wesentlichen

#### 1. Einleitung

Teil der vorliegenden Arbeit. Abschließend werden aus den kalibrierten Beobachtungsdaten erstmals langjährige Zeitreihen der Strahlungsenergieflussdichte errechnet und im Hinblick auf den saisonalen Verlauf und eine potentielle Korrelation mit der solaren Einstrahlung ausführlich diskutiert.

### 2. Das OH-Leuchten

Das NDMC ist ein Zusammenschluss internationaler Forschungsgruppen, welche vorrangig die Mesopausenregion in einer Höhe von ca. 80-100 km untersuchen. Ihr Ziel ist es, Klimasignale frühzeitig zu erkennen und zu identifizieren. Dazu werden mehrheitlich OH-Emissionen gemessen. Diese Emissionen finden überwiegend im nahen Infrarot statt und werden unter anderem an der NDMC-Station an der UFS mit zwei GRIPS-Instrumenten registriert.

### 2.1. Übergänge des OH-Radikals

Das zu untersuchende Nachthimmelsleuchten im nahen Infrarot entsteht hauptsächlich aufgrund chemischer Prozesse in der MLT ab ca. 80 km bis 100 km. Gasatome bzw. Moleküle werden tagsüber durch die Sonnenstrahlung im UV-Bereich ionisiert und dissoziiert. Durch Rekombinationsprozesse oder Emission von Photonen aus angeregten Atomen bzw. Molekülen wird elektromagnetische Strahlung im sichtbaren bzw. infraroten Spektralbereich abgegeben.

Das angeregte Hydroxyl-Molekül (OH<sup>\*</sup>) emittiert überwiegend im nahen Infrarot. Die Produktion von angeregten Hydroxyl-Molekülen, die den größten Anteil zum Nachthimmelsleuchten liefern, findet in einer Höhe von ca. 86 km (obere Mesosphäre) statt (Wüst et al., 2017; Baker und Stair, 1988). Sie entstehen durch die Reaktion von Wasserstoff und Ozon (Bates und Nicolet, 1950):

$$O + O_2 + M \longrightarrow O_3 + M, \tag{2.1}$$

$$H + O_3 \longrightarrow OH^* + O_2, \tag{2.2}$$

$$OH^* \longrightarrow OH + h\nu \quad 374 \text{ nm} \le \lambda \le 4,5 \,\mu\text{m},$$
 (2.3)

$$OH + O \longrightarrow H + O_2.$$
 (2.4)

Aus atomarem und molekularem Sauerstoff wird mit Hilfe eines Stoßpartners (M) Ozon produziert. Ozon reagiert mit atomarem Wasserstoff zu molekularem Sauerstoff und einem angeregten Hydroxyl-Molekül. Die angeregten OH\*-Moleküle geben ihre Energie in Form

von Photonen ab (Airglow). Zuletzt reagiert das OH-Molekül mit atomarem Sauerstoff zu molekularem Sauerstoff und atomarem Wasserstoff. Die abgegebenen Photonen haben Wellenlängen von 374 nm bis 4,5  $\mu$ m. Der Großteil der Emission findet jedoch zwischen ca. 1  $\mu$ m bis 2  $\mu$ m statt. Das Netto-Resultat der Gl. (2.2)-(2.4) ist die Überführung von zwei Sauerstoffatomen in ein Sauerstoffatom, dies wird auch katalytischer Prozess genannt.



**Abb. 2.1.:** OH-Spektrum aus dem Nachtleuchten zwischen 1500 nm und 1600 nm Wellenlänge. Das Spektrum wurde mit 15 Sekunden Belichtungszeit am 29.10.2012 um 17:29 UTC mit dem GRIPS 6 Instrument von Oberpfaffenhofen aus gemessen. Der Dunkelstrom wurde bereits vom Messsignal abgezogen, wie auch der verbleibende Untergrund. Eingezeichnet sind die stärksten OH-Emissionen, welche sich teilweise überlappen. Quelle: (Schmidt, 2016).

Rotationsübergänge treten auf, wenn sich die Rotationsquantenzahl eines Moleküls ändert. Die Rotationsquantenzahl gibt an, wie stark ein Molekül um seine Achse rotiert. Schwingungsübergänge hingegen beziehen sich auf die Änderungen in der Schwingungsenergie eines Moleküls. Moleküle bestehen aus verbunden Atomen, die um ihre Gleichgewichtslage schwingen können. Die Rotations- und Schwingungsübergänge in der Spektroskopie werden oft mithilfe der sogenannten P, Q und R-Zweige beschrieben. Als Auswahlregel gilt, dass sich die Gesamtdrehimpulsquantenzahl des Moleküls maximal um den Wert 1 ändern darf. Der P-Zweig enthält Linien, bei denen sich die Rotationsquantenzahl des unteren Zustands um eins erhöht hat. Der Q-Zweig dagegen enthält Linien, bei denen sich die Rotationsquantenzahl des unteren Zustands nicht ändert. Der R-Zweig besteht aus Linien, bei denen sich die Rotationsquantenzahl des unteren Zustands um eins verringert hat. Dabei gibt der Index den unterschiedlichen Gesamtdrehimpuls $\Omega$  an. Für den  $P_1$ -Zweig gilt  $\Omega = \frac{3}{2}$  und für den  $P_2$ -Zweig gilt  $\Omega = \frac{1}{2}$ . Eine weitere Zahl in Klammer gibt das untere Rotationsniveau an.

Durch die Messung der Emissionen der OH-Moleküle ist es möglich, auf die Rotationstemperatur des P-Zweiges des OH(3-1)-Schwingungsübergangs zu schließen und damit Hinweise auf die Temperatur in der Höhe von ca. 86 km (MLT) zu erhalten. Die OH-Übergänge  $P_1(2) = 1524,10$  nm,  $P_1(3) = 1533,24$  nm und  $P_1(4) = 1543,22$  nm werden zur Rotationstemperaturbestimmung genutzt.



**Abb. 2.2.:** Der *SkyCalc* modelliert bei verschiedenen Wellenlängen das Nachthimmelsleuchten. Die Daten beziehen sich dabei nur auf den Standort des Observatoriums auf dem *Cerro Paranal* in Chile mit den Koordinaten 24°37′38″ S, 24°37′15″ W (Noll et al., 2012).

#### 2. Das OH-Leuchten

Die Kalibration des Signals hin zu absoluten Intensitäten ist interessant, da für die Herstellung von OH atomarer Sauerstoff O nötig ist. Durch die Messungen von absoluten Intensitäten kann gegebenenfalls auf die Konzentration von O zurückgeschlossen werden. Atomarer Sauerstoff ist ein wichtiger Energiespeicher in der Atmosphäre. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft ein OH-Spektrum des GRIPS 6. Zur Einordnung sind in diesem Bereich sämtliche Übergänge des OH-Moleküls nach Rousselot et al. (2000) eingezeichnet. Die Form des gemessenen Spektrums entsteht hauptsächlich durch die technische Auflösung des Instruments, die etwa drei Größenordnungen über der Linienbreite liegt. Die nahe beieinander liegenden Spektrallinien überlappen teilweise - dies ist besonders bei den Q-Zweigen relevant.

Die Emissionen des Nachthimmelsleuchtens können durch Modelle approximiert werden. Ein Modell ist beispielsweise der *Skycalc* (Noll et al., 2012). Dieses Modell wurde an die Bedingungen des Observatoriums auf dem *Cerro Paranal* in Chile angepasst. Das Observatorium liegt 2640 m über dem Meeresspiegel. Die Ausgabe des *SkyCalc* umfasst Diagramme der Transmissions- und Emissionsgradspektren und optional deren einzelne Komponenten. In Abbildung 2.2 sind für zwei Wellenlängenbereiche die modellierten Emissionen aufgetragen. Der erste Bereich reicht von 1530 nm bis 1550 nm und der zweite von 1570 nm bis 1590 nm. Die Peaks stellen einzelne Linien bzw. Überlappungen mehrerer Emissionslinien aufgrund der Linienverbreiterungsmechanismen dar. Theoretisch lässt sich den Spektrallinien eine bestimmte Wellenlänge zuordnen. Aber aufgrund verschiedener physikalischer Effekte können auch in ihrer Energie leicht abweichende Photonen emittiert bzw. absorbiert werden. Diese Phänomene werden zusammenfassend als Linienverbreiterungsmechanismen bezeichnet.

Beide Bereiche sind bei der Untergrundbestimmung von besonderem Interesse, denn bei ca. 1547 nm wird traditionell der Untergrund für die Bestimmung der Rotationstemperaturen des P-Zweigs des (3-1)-Übergangs angesetzt. Zusätzlich liegen bei ca. 1580 nm einige Linien eines Übergangs des O<sub>2</sub>-Moleküls. Auch hier ist die Untergrundbestimmung also schwierig.

#### 2.2. Van Rhijn-Funktion

Die gemessene Intensität des OH-Airglows ist abhängig vom Beobachtungswinkel. Dies muss auch bei den Messungen mit den GRIPS-Instrumenten berücksichtigt werden. Denn je weiter sich die Messung vom Zenit entfernt, desto größer wird das beobachtete Volumen und somit auch die Intensität der eintreffenden Strahlung. Mithilfe der van Rhijn-Funktion kann man die Intensität *I* in Relation zum Zenitwinkel  $\alpha$  angeben (van Rhijn, 1921):

$$I(\alpha) = \frac{I(0^{\circ})}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_{E+h}}\right)^2 \sin(\alpha)^2}}.$$
 (2.5)

Dabei steht  $R_E$  für den Erdradius, der bei ca. 6378 km liegt, und h beschreibt die Höhe über dem Erdboden. Notwendige Bedinungen für diese Beziehung sind sowohl ein infintisimal kleiner Öffnungswinkel des Instrumentes, als auch vernachlässigbare Absorptionsund Streuprozesse in der unteren Atmosphäre.

#### 2.3. Strahlungsenergieflussdichte

Die Intensität des Airglows wird oft in *Rayleigh* angegeben. Dieser Photonenfluss wurde nach dem britischen Physiker Robert Strutt, 4. Baron Rayleigh benannt (Rayleigh, 1930; Baker und Romick, 1976). Ein Rayleigh sagt aus, dass in einem Querschnitt von 1 m<sup>2</sup> Atmosphärensäule pro Sekunde 10<sup>10</sup> Photonen registriert werden:

$$1 R = 10^{10} \frac{Photonen}{s \cdot m^2}.$$
 (2.6)

Die Strahldichte *L* hat die Einheit  $\frac{W}{m^2 sr}$ . Die Relation zwischen den beiden Intensitätsmaßen lautet (siehe z.B. Schmidt, 2016):

$$L\left[\frac{W}{m^2 sr}\right] = \frac{hc}{\lambda[m] \cdot 4\pi} \cdot 10^{10} R[R].$$
(2.7)

Nach Baker (1974) lautet der genäherte Zusammenhang für die spektrale Strahldichte  $L_{\lambda}$  mit einer Ungenauigkeit besser als 0,7 %:

$$L_{\lambda}\left[\frac{W}{\mu m cm^{2} sr}\right] = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda[\mu m]} \cdot 10^{-13} R_{\lambda}\left[\frac{R}{\mu m}\right].$$
 (2.8)

Somit kann die Intensität des OH-Airglow als Strahldichte angegeben und mit Literaturwerten gemessen in Rayleigh verglichen werden. Der Vorteil der Angabe als Strahldichte ist die Verwendung von SI-Einheiten.

# 3. Aufbau und Funktionsweise des GRIPS-Instruments

Das in Kapitel 2 beschriebene Nachthimmelsleuchten wird seit den 1980er Jahren mit den GRIPS-Instrumenten vermessen. Diese Spektrometer werden kontinuierlich erneuert und verbessert. Die bisherige Entwicklung der GRIPS-Instrumente lässt sich in zwei Phasen einteilen. GRIPS 1 bis GRIPS 4 nutzen scannende Monochromatoren mit einer einzelnen Photodiode, dies beschränkt die minimale Belichtungszeit. Seit GRIPS 5 kommt hingegen ein Zeilendetektor zum Einsatz, der es jeweils erlaubt, gleichzeitig alle Datenpunkte eines Spektrums aufzunehmen. Dies verringert die Aufnahmedauer eines Spektrums erheblich und erleichtert die Beobachtung dynamischer Ereignisse in der Mesopausenregion. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Daten der Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 untersucht.

#### 3.1. Messinstrument GRIPS

Der Aufbau (siehe Abbildung 3.1) lässt sich in zwei Bereiche aufteilen, einen optischen und einen elektronischen. Einfallendes Licht muss zuerst eine Schutzblende passieren, diese schützt das Instrument tagsüber vor Schäden durch die intensive Sonneneinstrahlung.

Das Filterrad erlaubt es, beliebige Filter in den Strahlengang einzubringen. Standardmäßig wird während der Messungen ein Langpassfilter verwendet ( $\lambda_{grenz} = 1200 \text{ nm}$ ). Dies ist nötig, um am Beugungsgitter auftretende Maxima höherer Ordnung zu unterdrücken. Die Transmission des Langpassfilters ist in Abbildung A.1 im Anhang dargestellt. Zudem verfügt das Filterrad über einen vollständig geschlossenen Abschnitt, der eine Unterbrechung des Strahlungseinfalls erlaubt - beispielsweise für Dunkelstrommessungen.

Durch den Eintrittsspalt fällt das Licht in eine optische Kammer. Hier befinden sich der Kollimatorspiegel, das Reflexionsgitter und der Fokussierspiegel. Der Kollimatorspiegel sorgt für einen parallelen Strahlengang beim Auftreffen auf das Gitter. An diesem kommt es zu einer wellenlängenabhängigen Beugung. Mithilfe des Fokussierspiegels wird das so erzeugte Spektrum auf dem Detektor abgebildet. Da die Spiegel sphärisch ausgeführt sind, entsteht ein Abbildungsfehler, sog. sphärische Aberration.



**Abb. 3.1.:** Aufbau des GRIPS 5-Messinstruments. Die in dieser Arbeit betrachteten Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 verfügen nicht über einen Parabolspiegel. Quelle: (Schmidt, 2016).

Dieser zeichnet sich im aufgenommenen Spektrum durch asymmetrisch erscheinende Linien ab. Vor dem Detektor befindet sich eine zylindrische Linse, die die Lichtausbeute erhöht.

Der elektronische Teil stellt die Steuerung für das Filterrad sowie den Detektor bereit. Zudem ist ein Kühlsystem für den Detektor vorhanden. Der Aufbau wird über einen PC gesteuert. GRIPS 7 und GRIPS 8 befinden sich in einem Labor der UFS. Um die Messinstrumente vor Umwelteinflüssen zu schützen, stehen sie jeweils hinter einem geschlossenen Fenster. Die Transmission des Glases muss bei der Kalibration berücksichtigt werden - diese ist in Abb. 3.2 dargestellt. Über den gesamten Verlauf zeigt sich eine mit der Wellenlänge stetig steigende Transmission. Zusätzlich ist die 1 $\sigma$  Unsicherheit mit einer mittleren Unsicherheit von ca. 0,27 % mit angegeben. Durch den Einfluss des Fensters wird die Intensität also um über 30 % abgeschwächt.

#### 3.2. Eigenschaften des Detektors

Der InGaAs-Zeilendetektor ist ein Detektor bestehend aus 512 Pixel. Jedes Pixel ist dabei eine eigenständige Photodiode, mit einer optisch aktiven Fläche von ca. 25 µm mal 500 µm. Die spektrale Auflösung ist nicht durch den Zeilendetektor, sondern durch den optischen Aufbau des Spektrographen, d.h. die Breite des Eintrittsspalts limitiert.



**Abb. 3.2.:** Das Fenster im Sichtfeld des GRIPS 7 und GRIPS 8 an der UFS weist eine wellenlängenabhängige Transmission auf. Die gemessene Transmission wurde geglättet und eine Unsicherheit bestimmt, die im Mittel bei ca. 0,27 % liegt (rote Fehlerbalken). Quelle: Max Reiniger, persönliche Kommunikation.

Emissionslinien werden so auf ca. 30 bis 35 Pixel verbreitert (Schmidt, 2016). InGaAs-Dioden erlauben im Gegensatz zu Siliziumdioden einen Betrieb im nahen Infrarot. Die chemische Zusammensetzung kann dabei variieren, Indium und Gallium können in wechselnden Anteilen vorkommen. Sie verhalten sich nach  $In_{1-x}Ga_xAs$ . Die Zusammensetzung beeinflusst die Position der Bandkante und ist somit maßgeblich für den nutzbaren Spektralbereich. Da das Material in Form eines Kristalls auf einem Substrat gezüchtet werden muss und die Zusammensetzung einen Einfluss auf die Gitterkonstante hat, sind nur bestimmte Werte für *x* gebräuchlich. Hier wird ein *x* von 0,47 verwendet (siehe z.B. Pearsall und Hopson, 1977). Bei Raumtemperatur liegt die Bandkante daher bei ca. 1,65 µm bzw. 0,75 eV.

Um den Dunkelstrom zu begrenzen und ein ausreichendes Signal-zu-Rausch Verhältnis (engl. *Signal-to-Noise-Ratio* SNR) zu erreichen, müssen diese Dioden gekühlt werden. Die Abkühlung des Detektors führt zu einer Verschiebung der Bandkante zu niedrigeren Wellenlängen. Die Änderung lässt sich im beobachteten Bereich auf 0,8 nm K<sup>-1</sup> approximieren (Amiri et al., 2019). Die von GRIPS 7 und GRIPS 8 aufgezeichneten OH-Spektren liegen im Wellenlängenbereich von ca. 1500 nm bis 1600 nm. Eine Senkung der Detektortemperatur kann daher die Empfindlichkeit in dem zu untersuchenden Bereich einschränken.

Es muss also eine Abwägung zwischen Dunkelstrom und SNR sowie maximaler beobachtbarer Wellenlänge getroffen werden. Unter diesen Einschränkungen wurde eine Detektortemperatur von -60 °C gewählt, dadurch befindet sich die Bandkante nahe bei 1600 nm (siehe auch Datenblatt von Oxford Instruments, 2022).

Die einzelnen Dioden müssen jeweils über einen Messverstärker ausgelesen werden. Als Basis für ein Messergebnis wird die jeweilige Strahlungsintensität in einem Zeitintervall, der sogenannten Belichtungszeit, aufgenommen. Die Belichtungszeit beträgt 10 Sekunden bei GRIPS 7 und 15 Sekunden bei GRIPS 8. Der Zeitraum der Dämmerung ist dabei inkludiert. Die Messzeiträume sind für Sommer bzw. Winter unterschiedlich lang gewählt.

Im verwendeten Detektor ist jede zweite Photodiode an denselben Verstärker angeschlossen. Diese schematische Verbindung ist in Abb. 3.3a dargestellt. Bauartbedingt weisen beide Verstärker eine unterschiedliche Verstärkung und Rauschcharakteristik auf. Dadurch werden Pixel mit geraden bzw. ungeraden Indizes unterschiedlich verstärkt. Da beide Verstärkerkanäle unterschiedliche Abweichungen aufweisen können, müssen sie bei der Analyse unter Umständen getrennt betrachtet werden.



**Abb. 3.3.:** Aufgrund der Nutzung zweier unterschiedlicher Verstärker - siehe 3.3a - kann es zu charakteristischen Abweichungen aufgrund der jeweiligen Verstärkereigenschaften kommen, dabei ist jeder zweite Pixel an demselben Verstärker angeschlossen. In Abb. 3.3b) stellt die gestrichelte Linie eine kontinuierliche Schwarzkörperkurve da. Die durchgezogene Linie zeigt das - durch die zwei Verstärker bedingte - aufgenommene Signal.

In Abbildung 3.3b wird der schematische Verlauf eines Schwarzkörperspektrums angedeutet, wie es während der Kalibration der GRIPS Instrumente erscheint. Es zeigt sich eine charakteristische Abweichung, bei der die Hälfte der Pixel systematisch unter bzw. über dem erwarteten Wert liegt. Um dies zu berücksichtigen, sollte bei jeder Mittelung des gemessenen Signals eine gerade Anzahl an benachbarten Pixeln gemittelt werden, da sonst ein Verstärker bevorzugt wird.

#### 3.3. Gesichtsfeld

Über die Messdauer von mehr als zehn Jahren der beiden GRIPS-Instrumente wurden verschiedene Änderungen durchgeführt. Eine wichtige Änderung ist die Ausrichtung und damit das Gesichtsfeld der Instrumente. Der halbe Öffnungswinkel der Geräte von ca. 8° wurde dabei nicht geändert. Aufgrund des van Rhijn-Effekts (siehe Abschnitt 2.2) ändert sich dabei die registrierte Intensität deutlich.



**Abb. 3.4.:** Die drei unterschiedlichen Gesichtsfelder der GRIPS Instrumente an der UFS. Das rot eingezeichnete Fester ist das Gesichtsfeld von GRIPS 8. GRIPS 7 wurde in verschiedenen Zeiträumen auf alle eingezeichneten Fenster eingestellt. Quelle: Patrick Hannawald, persönliche Kommunikation.

Abb. 3.4 zeigt alle drei Gesichtsfelder der GRIPS Instrumente an der UFS. In der Anfangszeit des GRIPS 7 ab dem 20.01.2010 wurde mit einem Zenitwinkel von 45° und einem Azimutwinkel von 180° gemessen (siehe Abb. 3.4 roter Bereich). Auf diese Winkel wurde auch GRIPS 8 bei Inbetriebnahme am 02.09.2010 eingestellt. GRIPS 7 hat vom 17.10.2011 bis zum 18.09.2013 mit einem größeren Gesichtsfeld gearbeitet als GRIPS 8. Dabei wurde der Zenitwinkel des GRIPS 7 auf 61° geändert, während der Azimutwinkel bei 180° verblieb (siehe Abb. 3.4 blauer Bereich). In der Zeitspanne vom 18.09.2013 bis zum 01.10.2015 wurde GRIPS 7 auf das Gesichtsfeld von GRIPS 8 zurückgesetzt. Ab dem 01.10.2015 bis zum 22.06.2017 wurde bei GRIPS 7 der Zenitwinkel auf 57° und der Azimutwinkel auf 124° variiert (siehe Abb. 3.4 violetter Bereich). Seit dem 22.06.2017 messen GRIPS 7 und GRIPS 8 wieder mit denselben Gesichtsfeldern. Bei einheitlichem Gesichtsfeld, kombiniert mit dem gleichen Standort der Instrumente, sollte theoretisch dieselbe Strahlungsdichte gemessen werden. Somit können die aufgezeichneten Spektren verglichen werden, da alle verbleibenden Differenzen durch die Instrumente bedingt sein müssen. Dies stellt auch eine Möglichkeit dar, die Qualität der ermittelten Daten zu evaluieren. Große Unterscheide zwischen den Messreihen können als Indikator einer Änderung am System gedeutet werden.

#### 3.4. Kalibration der PTB

Im Lauf einer Messkampagne wurden die beiden Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 an der UFS in Zusammenarbeit mit der PTB kalibriert. Die relevanten Daten und Informationen wurden von Max Reiniger bereitgestellt. Die Messkampagne fand vom 21.06.2017 bis zum 07.09.2017 statt. Dabei wurde einerseits jedem Pixel eine Wellenlänge zugeordnet (siehe Abb. 3.5), andererseits wurde die spektrale Strahlungsenergieflussdichte kalibriert.

Für die Kalibration wurde ein Mittelwert der individuellen Kalibrationen vom 05.07.2017 bis zum 07.09.2017 gebildet. Die Analog Digital Konverter (ADC) der GRIPS-Instrumente liefern für jedes Pixel die gemessene Intensität in Zählereignissen (engl. *Counts*). Das Signal ist dabei proportional zum Photostrom an der jeweiligen Diode.

Durch eine Ermittlung der Proportionalitätskonstante mittels Kalibration an einem Schwarzkörper kann das Signal zu einer absoluten Intensität als spektrale Flussdichte in der Einheit Wm<sup>-2</sup>m<sup>-1</sup>sr<sup>-1</sup> umgerechnet werden. Der verwendete Schwarzkörper ist auf die sog. Primärnormale der PTB rückgeführt.

Abbildung 3.6 zeigt die Umrechnung des Signals in eine spektrale Strahlungsdichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Charakteristik der Kurve zeigt mehrere Phänomene. Die leicht wellenförmigen Schwankungen im Signal sind wahrscheinlich auf den Langpassfilter im Filterrad des GRIPS zurückführen. Ein Beispiel für die Transmission des Langpassfilters ist im Anhang in Abbildung A.1 dargestellt.

Die Abflachung der Kurve ab ca. 1585 nm ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Effekte an der Bandkante des Detektors bei ca. 1600 nm zurückzuführen. Durch die Kalibration wird die Auswirkung der Bandkante des Detektors auch bei den absoluten Intensitäten berücksichtigt. Allerdings kann auch die Ausleuchtung der 512 Photodioden am Rand der



**Abb. 3.5.:** Quadratische Kalibrationskurve der PTB. Mithilfe der quadratischen Gleichung kann jedem Pixel eine bestimmte Wellenlänge zugeordnet werden. Die Parameter wurden durch einen Fit an die Kalibrationsmessungen ermittelt. Quelle: Max Reiniger, persönliche Kommunikation.

Detektorzeile für die Abflachung ab ca. 1585 nm mitverantwortlich sein, zumal ein leichter Knick auch am anderen Rand unterhalb von ca. 1510 nm erkennbar ist. Zusätzlich wirken sich alle verwendeten optischen Komponenten des GRIPS auf das Signal aus.

Bei der Kalibrationskurve von GRIPS 7 fällt auf, dass die Differenz zwischen den beiden Verstärkern im Vergleich zu GRIPS 8 größer ausfällt (siehe Abschnitt 3.2). Dies zeichnet sich durch einen scheinbar breiteren Verlauf der schwarzen Kurve aus. Diese Strahlungsenergieflussdichtekalibration wird bei der Verarbeitung auf die Rohdaten multipliziert.



**Abb. 3.6.:** Kalibration des Signals in eine spektrale Strahlungsdichte mit der Einheit  $\frac{Wm^{-2}m^{-1}sr^{-1}}{cts}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Multipliziert man diese auf das gemessene Signal (schwarz), erhält man eine absolute Intensität mit der Einheit  $Wm^{-2}m^{-1}sr^{-1}$ . Die von der PTB bestimmte 2 $\sigma$  Unsicherheit wird durch rote Fehlerbalken verdeutlicht. Quelle: Max Reiniger, persönliche Kommunikation.

Die in Abb. 3.6 aufgetragene Kalibration stellt den Mittelwert von insgesamt drei Kalibrationsmessungen dar. Diese sind an zwei verschiedenen Tagen im Abstand von zwei Monaten durchgeführt worden. Die dazugehörige von der PTB bestimmte  $2\sigma$  Unsicherheit beträgt etwa 0,015  $\frac{Wm^{-2}m^{-1}sr^{-1}}{cts}$  bzw. ca. 1,23 % und ist in beide Graphen rot eingezeichnet.

### 4. Prozessierung der OH-Daten

Ziel der Auswertung ist es, die von den Instrumenten gesammelten Daten zu kalibrieren und unter anderem Zeitreihen absoluter Intensitäten über viele Jahre zu erzeugen. Teil der Kalibrierung ist die Bestimmung der Wellenlänge jedes Pixels, die in der bisherigen Prozessierung jede Nacht aus sechs bekannten Referenzpeaks mittels linearer Interpolation der Wellenlänge bestimmt wird. Dieses Verfahren wird durch ein quadratisches Modell verbessert. Falls eine Wellenlängenbestimmung über diese Methode nicht möglich ist, soll dieser Fehler erkannt werden und automatisch eine statische Wellenlängenkalibrierung gesetzt werden. Diese stammt von der PTB.

Das aufgenommene Signal wird mithilfe der Kalibration der PTB zu einer spektralen Strahlungsenergieflussdichte umgerechnet. Anschließend wird der verbleibende Untergrund genauer untersucht. Um aussagekräftige Zeitreihen absoluter Intensitäten zu erhalten, werden die aufgenommenen Spektren nach externen Einflüssen, wie starker Bewölkung bzw. übermäßigem Mondschein sortiert und die Unsicherheit bestimmt.

#### Dunkelstromkorrektur

Während der Messung werden periodisch Dunkelstrommessungen durchgeführt. Hierfür wird das Filterrad genutzt (siehe Kapitel 3), um einen Strahlungseinfall in das Instrument zu blockieren. Dieser Dunkelstrom ist maßgeblich durch die 512 InGaAs-Dioden des Detektors bedingt und als Limitation der Detektortechnologie zu verstehen. Der Dunkelstrom muss vom Messsignal abgezogen werden. Die pixelabhängige Intensität des Dunkelstroms wird durch Umgebungsvariablen, wie die Temperatur des Detektors, beeinflusst (siehe z.B. MacDougal et al., 2009). Der Dunkelstrom wird im Abstand von 15 Minuten gemessen, da sich die Einflussfaktoren in der Nacht ändern. Eine häufigere Messung wird nicht genutzt, um die Effizienz der Datengewinnung nicht übermäßig zu senken.

Eine typische Messung ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Rohdaten (schwarz) enthalten sowohl das gesuchte Spektrum als auch den Dunkelstrom (rot). Es ist klar erkennbar, dass die Basislinie des Spektrums in guter Näherung durch den gemessenen Dunkelstrom bestimmt wird.



**Abb. 4.1.:** Die aus dem Zeilendetektor aufgenommenen Rohdaten enthalten sowohl das OH-Spektrum, wie auch den durch den Detektor bedingten Dunkelstrom. Um das Spektrum auswerten zu können, muss der gemessene Dunkelstrom abgezogen werden. Beides ist hier beispielhaft für je ein zeitgleich aufgenommenes Spektrum beider Instrumente der Nacht vom 28. auf den 29.04.2022 aufgetragen.

#### 4.1. Bestimmung der Wellenlänge einer Nacht

Die Intensitätsdaten des Detektors werden als Liste von 512 Werten aufgezeichnet, die jeweils von einem Pixel erfasst werden. Um jedem Pixel eine Wellenlänge zuzuordnen, ist eine Kalibration notwendig. Bisher wurden hierfür sechs charakteristische Peaks genutzt:  $P_1(2) = 1524,10 \text{ nm}, P_1(3) = 1533,24 \text{ nm}, P_1(4) = 1543,22 \text{ nm} \text{ und } R_1(3) = 1554,35 \text{ nm}, R_1(2) = 1559,76 \text{ nm} \text{ und } R_1(1) = 1565,50 \text{ nm} \text{ nach}$  (Wellenlängen nach Rousselot et al., 2000). Eine spektrale Übersicht ist in Abb. 2.1 gegeben.



**Abb. 4.2.:** Um das aufgenommene Signal des GRIPS 8 zu verarbeiten, wird jedem Pixel eine Wellenlänge zugeordnet. Die Wellenlängenkalibrierung (linear) ist die bisherige lineare Interpolation der 6 charakteristischen Peaks. Dieselben sechs Peaks werden auch für eine quadratische Wellenlängenkalibrierung verwendet. Die beiden Peaks der Q(3-1) und Q(4-2)-Zweige werden bei einer weiteren Wellenlängenkalibrierung mit acht Peaks zusätzlich verwendet. Als Referenz ist die von Max Reiniger (PTB) bestimmte quadratische Wellenlängenfunktion eingezeichnet.

Die Peak-Positionen im Spektrum werden nun ermittelt, indem das Spektrum zuerst mithilfe eines Savitzky-Golay-Filters geglättet wurde (Savitzky und Golay, 1964). Dieser approximiert die Datenpunkte innerhalb der Größe des Fenster durch ein Polynom. Anschließend wurden mit der Python-Funktion *scipy.signal.find\_peaks\_cwt* (Du et al., 2006) die entsprechenden Intensitätsmaxima gesucht. Die bekannte Wellenlänge dieser Peaks kann dann der jeweiligen Peakposition zugeordnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein quadratischer Fit genutzt. Diese Fit-Funktion wurde ausgewählt, da frühere Arbeiten und die Kalibration der PTB (siehe Abschnitt 3.4) darauf hindeuten, dass ein quadratischer Zusammenhang zwischen Pixelposition und Wellenlänge besteht. Im direkten Vergleich mit dem bisherigen linearen Fit zeigt sich eine geringe Abweichung vor allem an den Rändern des Detektors, die in Abb. 4.2 dargestellt ist.

Um das Ergebnis mittels quadratischem Fit weiter zu verbessern, wurden zusätzlich zu den bisher betrachteten Peaks zwei weitere berücksichtigt. Dabei wurden die Peaks des OH(3-1) Q-Zweigs = 1505,90 nm und des OH(4-2) Q-Zweigs = 1583,70 nm genutzt. Die Wellenlängen sind Mittelwerte der sich überlappenden Emissionslinien der jeweiligen Q-Zweige (Rousselot et al., 2000). Die Verwendung zusätzlicher Marker im Spektrum sollte die Fehlertoleranz erhöhen. Um die Kalibration quantitativ zu bewerten, wurden für bestimmte Wellenlängen die dazugehörigen Pixel identifiziert und die Ergebnisse der verschiedenen Methoden in Relation gesetzt.

Vergleicht man die bisherige lineare Wellenlängenkalibrierung mit der quadratischen 6-Peaks (Q6P) bzw. 8-Peaks-Methode (Q8P), so ergeben sich, für eine auf dem Sensor mittig befindliche Wellenlänge (1550 nm), in beiden Fällen eine Abweichung zur linearen Fitfunktion von 2 Pixeln. Betrachtet man die Randbereiche des Spektrums bei 1500 nm und 1590 nm, zeigt sich ein anderes Verhalten. Der niedrigere Wellenlängenbereich zeigt eine Abweichung von 4 Pixel (Q6P) bzw. 1 Pixel (Q8P). Im höheren Wellenlängenbereich beträgt die Abweichung dagegen 7 Pixel (Q6P) bzw. 3 Pixel (Q8P). 7 Pixel entsprechen dabei einer Wellenlänge von ca. 1,4 nm.

In Abschnitt 3.4 ist die Wellenlängenkalibration der PTB gegeben. Diese Kalibrierung ist zur zusätzlichen Kontrolle in Abbildung 4.2 eingezeichnet. Diese Kalibration fand einmalig 2017 statt. Somit ist nicht gesichert, dass die damals mit den Mitteln der PTB erfasste Wellenlängenzuordnung für den gesamten Messzeitraum von 2010-2022 gilt. Von der bisherigen linearen Kalibrierung weicht sie bei den drei Wellenlängen um maximal 7 Pixel ab. Die beiden quadratischen Methoden bieten im Vergleich zur PTB Wellenlängenkalibration den Vorteil, dass sie für jede Nacht neu und ohne zusätzliche Geräte (autark) bestimmt werden können. Die Qualität der autarken Kalibrationen muss jedoch charakterisiert und überwacht werden. Eine qualitativ hochwertige autarke Kalibrierung sollte möglichst mit der PTB-Kalibrierung übereinstimmen, da es seit 2017 kaum Änderungen an den Instrumenten gab. Berechnet man die mittlere Differenz über alle Pixel, so beträgt diese 0,445 nm (Q6P) bzw. 0,731 nm (Q8P). In den Randbereichen bei 1500 nm und 1590 nm weicht die PTB-Wellenlänge nur 1 bzw. 0 Pixel von der Q6P-Methode ab. Bei der Q8P-Methode dagegen liegt die Abweichung der beiden Randwellenlängen bei 4 Pixel (ca. 0,8 nm). Bei den quadratischen Verfahren wurde festgestellt, dass die Erhöhung um zwei Stützpunkte keine Verbesserung der Wellenlängenkalibrierung darstellt. Die Q6P-Methode liegt näher an der PTB-Kalibration während die Q8P-Methode näher an der bisherigen linearen Kalibration liegt (siehe Abb. 4.2).

Eine mögliche Erklärung für die größere Abweichung der Q8P-Wellenlängenkalibration ist, dass sich bei den zwei zusätzlich verwendeten OH-Peaks Q(3-1) und Q(4-2) mehrere Emissionslinien überlappen. Um eine einzige Wellenlänge für jeden Peak zu bestimmen, wurden alle überlappenden Linien mit verschiedenen Gewichtungen gemittelt. Trotzdem führt diese vereinfachte Betrachtung der Überlappungen zu Abweichungen bei der Peakpositionsbestimmung. Im Folgenden wird für beide Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 die Q6P-Methode verwendet, da bei dieser Methode die Abweichung zur PTB-Wellenlänge am geringsten ist. Falls bei einer Nacht aufgrund von Bewölkung oder ähnlichem die Wellenlänge nicht berechnet werden kann, so kann als Ersatz die PTB Wellenlänge verwendet werden.

### 4.2. Genauere Betrachtung der Untergrundhelligkeit

Bei Betrachtung der beispielhaften, kalibrierten Spektren in Abb. 4.3 fällt auf, dass das Untergundsignal auch nach der instrumentellen Korrektur (Abzug des Dunkelstroms) nicht verschwindet.



**Abb. 4.3.:** Zwei kalibrierte Spektren des GRIPS 7 und GRIPS 8 in der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 um ca. 23:00 UTC (passend zu Abb. 4.1). Die spektrale Auflösung von GRIPS 7 ist geringer als bei GRIPS 8, daher erscheinen die Peaks breiter als bei GRIPS 8. Der blaue Bereich kennzeichnet einen verbliebenen Untergrund, dessen Herkunft genauer untersucht wird.

Dies deutet auf eine verbleibende Untergrundhelligkeit hin, die zur besseren Übersicht hellblau transparent markiert wurde. Da die Spektren später integriert werden sollen, um einen Schätzwert für die Intensität zu erhalten, hat auch dieser geringe Untergrund einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis des Integrals. Deswegen sollte dieser Untergrund vorher möglichst präzise vom Spektrum abgezogen werden.

Die hier dargestellten Spektren sind um ca. 23:00 UTC aufgenommen worden und sind mit der PTB- und der Fenstertransmission kalibriert worden. Um den Untergrund zu bestimmen, werden mehrere Wellenlängenbereiche ausgewählt, in denen das Signal besonders niedrig ist. Zum Vergleich werden auch Bereiche an Flanken oder um einen OH-Peak ausgewählt. Zunächst ist zu prüfen, ob es sich um Untergrundhelligkeit aus dem Gerät bzw. der Atmosphäre handelt oder OH-Intensität aus Linienflanken.



**Abb. 4.4.:** Das Spektrum, das aus den 85% dunkelsten Spektren der Nacht gemittelt wurde, um Dämmerungszeiten und andere Störeinflüsse auszuschließen, ist hier gegenüber der Wellenlänge dargestellt. So lässt sich das Rauschen eliminieren, dadurch wird die Betrachtung des Graphen vereinfacht. Zur Untergrundbestimmung wurde eine Studie von Wellenlängenbereichen durchgeführt. In den markierten Kästchen wird dazu das jeweilige lokale Minimum (rote Kästchen) bzw. Maximum (blaue Kästchen) identifiziert.

In jedem gewählten Wellenlängenbereich wird ein gleitendes Mittel über 4 Pixel gebildet, um keinen Vorverstärker zu bevorzugen (siehe Abschnitt 3.2). Daraufhin wird für jeden gemittelten Bereich das lokale Extremum ermittelt. Um zu entschieden, ob es sich um Untergrund oder OH-Intensität handelt, wird die Dynamik der Minima mit der des bekannten OH-Anteils verglichen. In Abbildung 4.4 sind alle Suchintervalle eingetragen und nummeriert. Maxima sind blau markiert und Minima rot. Suchintervall 1 und 2 liegen dicht beieinander, da je nach Instrument der Spektralbereich eingeschränkt sein kann. Die Wahl zweier kleinerer Suchbereiche bietet somit den Vorteil einer modularen Nutzung. Um das Verfahren zu testen, wurden auch zwei Minimabereiche absichtlich

Minima	Minimale Wellenlänge	Maximale Wellenlänge	nominelle Emissionslinie
1	1500,0 nm	1502,0 nm	-
2	1502,1 nm	1504,3 nm	-
3	1515,0 nm	1517,0 nm	-
4	1522,5 nm	1523,5 nm	Flanke OH (3-1)-P <sub>1</sub> (2)
5	1529,0 nm	1530,5 nm	Hg (Kunstlicht)
6	1536,0 nm	1538,0 nm	-
7	1545,0 nm	1548,0 nm	-
8	1568,0 nm	1569,0 nm	-
9	1573,0 nm	1574,5 nm	O <sub>2</sub> -Linie
10	1593,0 nm	1596,5 nm	-
11	1520,5 nm	1523,0 nm	-
Maxima			
1	1504,5 nm	1507,0 nm	Q(3-1)-Zweig
2	1523,6 nm	1524,7 nm	OH (3-1)-P <sub>1</sub> (2)
3	1538,1 nm	1541,0 nm	OH (3-1)-P <sub>2</sub> (4)
4	1542,5 nm	1544,3 nm	OH (3-1)-P <sub>1</sub> (4)
5	1582,5 nm	1585,0 nm	Q(4-2)-Zweig

**Tabelle 4.1.:** Die Tabelle stellt die Suchbereiche für die 16 Extrema dar. Die minimale Wellenlänge gibt den Beginn und die maximale Wellenlänge das Ende des Suchbereichs an. In Abbildung 4.4 sind die Minima rot und die Maxima blau eingezeichnet.

auf die Flanken bekannter OH-Peaks gelegt (Minimum 4 und 5). In Tabelle 4.1 sind die jeweiligen Suchintervalle zu den Extrema aufgetragen.

Die Intensität der Maxima sollte sich im Verlauf der Nacht ändern, da sich die Konzentration des OH ändert. Die Intensität des Untergrunds sollte sich dagegen weitgehend unabhängig von der OH-Intensität ändern oder gar konstant bleiben. In Abbildung 4.5 ist der Intensitätsverlauf aller Extrema über die Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 aufgetragen. Hierbei wurden für jedes Spektrum alle 16 Extrema bestimmt und deren Intensität über die Zeit aufgetragen. Im Verlauf der Nacht zeigt sich für die Intensität der fünf Maxima, die durch blaue Kästchen markiert sind, eine starke Zeitabhängigkeit. Die Intensitäten erreichen jeweils um ca. 02:00 UTC ihre maximale Intensität und sinken dann wieder ab.

Die Minima wurden in drei Kategorien eingeteilt - farblich gekennzeichnet durch rote Kreise, schwarze Hexagone und gelbe Dreiecke. Während die Dynamik im Verlauf der



**Abb. 4.5.:** Die in Abb. 4.4 eingezeichneten Bereiche liefern pro Spektrum 16 Extremwerte. Diese Extremwerte sind hier über den Verlauf einer ganzen Nacht vom 28. auf den 29.04.2022 aufgetragen. Es sind zum Vergleich sowohl die Maxima in blau als auch die Minima - aufgeteilt in drei Kategorien, farblich gekennzeichnet durch rot, schwarz und gelb - eingezeichnet. Bei GRIPS 7 erkennt man sporadisch eine störende Emission durch Kunstlicht in Minimum 5.

Maxima gut sichtbar ausgeprägt ist, ist sie im Verlauf der roten und gelben Minima kaum zu erkennen. Diese verlaufen nahezu konstant.

Die Ausnahme bilden Minimum 4 und 5 (schwarze Hexagone). Bei Minimum 4 und 5 entspricht dies den Erwartungen, da diese absichtlich an Flanken von Linien gesucht

wurden. Zusätzlich befindet sich im Suchbereich von Minimum 5 eine Quecksilberlinie bei 1529,582 nm (Humphreys, 1953), besonders sichtbar bei GRIPS 7 in Abb. 4.5a als Stufenfunktion des Verlaufs von Minimum 5. Aufgrund von Bauarbeiten wurde im Frühjahr 2022 bisweilen Streulicht registriert - betroffen war jedoch immer nur GRIPS 7.

Nun werden die gelben dreieckig markierten Minima näher untersucht. Minimum 9 wird durch einen benachbarten  $O_2$ -Übergang beeinflusst (siehe Abb. 2.2b). Trotz Verkleinerung des Suchbereichs blieb der Effekt aufgrund der spektralen Verbreiterung bestehen. Besonders bei GRIPS 7 kann aufgrund der spektralen Auflösung der Suchbereich 9 nicht verwendet werden, da die Intensität der  $O_2$ -Emission zu hoch ist, um sie bei der Untergrundbestimmung zu verwenden. Der Suchbereich von Minimum 6 kann ebenfalls durch das GRIPS 7 nicht spektral aufgelöst werden, daher wird auch dieser ausgeschlossen.

Minimum 7 befindet sich zwischen zwei Peaks bei 1545,0 nm bis 1548,0 nm. Im Beispiel in Abbildung 4.4 ist kein eindeutiges Tal zu erkennen, sondern ein über den Suchbereich schwankender Verlauf. Untersucht man diesen Bereich in einer Modellierung, wie in Abbildung 2.2a dargestellt, so ist durchaus OH-Intensität vorhanden. Aus historischen Gründen wird diese Position aber unter Zuhilfenahme von diversen Korrekturverfahren (Schmidt, 2016; Lange, 1982) zur Untergrundbestimmung für die Berechnung der Rotationstemperaturen des OH (3-1)-P-Zweigs verwendet. Für die präzise Bestimmung der OH-Intensitäten eignet sich dieser Punkt bei der Untergrundbestimmung dennoch nicht.

Um die Korrelation zwischen den zeitabhängigen Intensitätsverläufen der einzelnen Extrema zu quantifizieren, wurde für GRIPS 8 eine Pearson Korrelationstabelle Tab. 4.6 aufgestellt (Rodgers und Nicewander, 1988, GRIPS 7 siehe Anhang Tab. A.2). Anstatt lediglich die Korrelation zwischen zwei Datensätzen darzustellen, sind hier die Korrelationswerte zwischen allen Datensätzen angegeben. Ein Wert nahe 1 spiegelt eine hohe Korrelation wieder, Werte um 0 deuten auf keine Korrelation hin und Werte bei -1 zeigen eine inverse Korrelation an. Hierbei ist zu erkennen, dass die Maxima wie erwartet stark korreliert sind (siehe Tab. 4.6 blau markierter Bereich). Dies äußert sich in einem Korrelationskoeffizienten nahe 1. Bei den Minima im roten Bereich ist dieser Trend nicht zu erkennen. Auffällig ist, dass die Minima der Suchbereiche 4 und 5 auch hohe Korrelationskoeffizienten mit den Maxima aufweisen (pink schraffierter Bereich). Dies ist allerdings durch die Position an den Flanken zu erwarten.

					Pear	son Korre	lationsko	effizient:	GRIPS_8	_202204_	2829					
	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Minimum 4	Minimum 5	Minimum 6	Minimum 7	Ainimum 8	Ainimum 9	linimum 10 M	inimum 11	Aaximum 1	Aaximum 2 N	Aaximum 3 N	aximum 4	Maximum 5
Minimum 1	1,0	0,27	-0,33	0,06	0,07	-0,03	-0,02	-0,06	-0,05	-0,33	-0,17	0,1	0,1	0,07	0,09	0,09
Minimum 2	-0,27	7 1,0	-0,36	0,39	0,42	0,04	0,21	-0,13	-0,2	-0,4	-0,19	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Minimum 3	-0,33	3 -0,36	1,0	-0,19	-0,21	-0,03	-0,13	0,05	0,08	-0,21	-0,01	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
Minimum 4	0,06	s 0,39	-0,19	1,0	0,91	0,2	0,57	-0,17	-0,34	-0,22	-0,2	0,92	0,92	0,91	0,92	0,92
Minimum 5	0,07	7 0,42	-0,21	0,91	1,0	0,22	0,65	-0,19	-0,37	-0,23	-0,22	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
Minimum 6	-0,00	3 0,04	-0,03	0,2	0,22	1,0	0,3	0,07	-0,07	-0,03	0,11	0,18	0,18	0,21	0,19	0,19
Minimum 7	-0,02	2 0,21	-0,13	0,57	0,65	0,3	1,0	-0,06	-0,31	-0,08	-0,03	0,59	0,59	0,67	0,64	0,64
Minimum 8	-0,06	3 -0,13	0,05	-0,17	-0,19	0,07	-0,06	1,0	0,39	0,1	0,14	-0,23	-0,23	-0,22	-0,23	-0,22
Minimum 9	-0,05	5 -0,2	0,08	-0,34	-0,37	-0,07	-0,31	0,39	1,0	0,13	0,15	-0,41	-0,4	-0,42	-0,43	-0,41
Minimum 10	-0,33	3 -0,4	-0,21	-0,22	-0,23	-0,03	-0,08	0,1	0,13	1,0	-0,04	-0,26	-0,26	-0,23	-0,24	-0,24
Minimum 11	-0,17	7 -0,19	-0,01	-0,2	-0,22	0,11	-0,03	0,14	0,15	-0,04	1,0	-0,26	-0,25	-0,24	-0,26	-0,26
Maximum 1	0,1	0,43	-0,22	0,92	0,97	0,18	0,59	-0,23	-0,41	-0,26	-0,26	1,0	1,0	0,98	0,99	0,99
Maximum 2	0,1	0,43	-0,22	0,92	0,97	0,18	0,59	-0,23	-0,4	-0,26	-0,25	1,0	1,0	0,98	0,99	0,99
Maximum 3	0,07	7 0,43	-0,22	0,91	0,97	0,21	0,67	-0,22	-0,42	-0,23	-0,24	0,98	0,98	1,0	0,99	0,99
Maximum 4	0,06	9 0,43	-0,22	0,92	0,98	0,19	0,64	-0,23	-0,43	-0,24	-0,26	0,99	0,99	0,99	1,0	1,0
Maximum 5	0,06	9 0,43	-0,22	0,92	0,98	0,19	0,64	-0,22	-0,41	-0,24	-0,26	0,99	0,99	0,99	1,0	1,0

**Abb. 4.6.:** Tabelle des Pearson Korrelationskoeffizienten des GRIPS 8 für die 16 Extrema der Nacht vom 28. auf den 29.04.2022. Neben der hohen Korrelationswerte der Peaks untereinander (blau schraffierter Bereich), zeigt sich die erwartete Korrelation mit den Flankenpositionen Minimum 4 und 5 (pink schraffierter Bereich), aber auch mit Minimum 7 weist mit Werten um 0,6 systematisch höhere Korrelationswerte mit den Peaks auf als die anderen Minima, das damit offensichtlich auch Airglow-Anteil enthält.

Alle 16 Extrema wurden nicht nur in einer klaren Nacht untersucht, sondern auch in einer bewölkten. In Abbildung 4.7 vom 20. auf den 21.07.2017 ist zwischen 20:00 UTC und 22:00 UTC und nochmals um ca. 02:00 UTC eine starke Absorption durch Wolken erkennbar.



**Abb. 4.7.:** Hier ist im Gegensatz zu Abb. 4.5 eine Nacht mit wechselnder Bewölkung dargestellt (20-21.07.2017). Zwischen 20:00 und 22:00 UTC und nochmals um ca. 02:00 UTC findet durch die Wolken eine starke Absorption statt. Diese ist sowohl in den Maxima als auch in den Minima erkennbar. Dies bedeutet, dass der verbleibende Untergrund kein residueller Instrumenteneffekt ist.

Diese ist sowohl in den Maxima als auch in den Minima sichtbar. Die Korrelation zwischen Minima und Maxima ist im Anhang Tab. A.3 für GRIPS 8 und für Tab. A.4 GRIPS 7 gezeigt. Insbesondere die Minima 6, 7, 8, 9 und 11 scheinen bei Bewölkung höher korreliert zu sein. Erschwert wird die Interpretation der Daten allerdings durch die Tatsache, dass auch Wolken und Wasserdampf eine spektrale Abhängigkeit aufweisen. Es ist also pausibel, dass die Minima 1,2 und 10 ein anderes Verhalten zeigen. Dies deutet darauf hin, dass der Untergrund tatsächlich aus der Atmosphäre stammt, da er von den Wolken beeinflusst wird. Es war bis jetzt nicht eindeutig geklärt, ob dieser verbliebene Untergrund maßgeblich aus der Atmosphäre stammt oder doch aus dem Instrument stammt und bei der Dunkelstrommessung nicht richtig erfasst wird.



**Abb. 4.8.:** Das Ergebnis, das aus den 85% dunkelsten Spektren der Nacht gemittelt wurde, ist hier gegenüber der Wellenlänge dargestellt. Zur Untergrundbestimmung werden die lokalen Minima den fünf markierten Wellenlängenbereichen verwendet.

Abschließend zeigen sich die rot kreisförmig markierten Minima 1, 2, 3, 10 und 11 aus Abb. 4.5 zur Untergrundbestimmung als am besten geeignet. In Abbildung 4.8 wurden diese fünf Minima zu besseren Übersicht alleine eingezeichnet und mit 1 bis 5 neu benannt.

Um den Untergrund vom Spektrum abzuziehen, ist es nötig, diesen für das gesamte Spektrum zu bestimmen. Es wurden dabei zwei alternative Möglichkeiten näher untersucht. Zum einen wurde aus allen Intensitätswerten der fünf Minima der Mittelwert gebildet und global abgezogen. Zum anderen wurde ein linearer Fit durch die fünf Minima gelegt.

Eine individuelle Interpolation durch verschiedene Punkte wurde von Schmidt et al. (2013) eingeführt, die den hier gewählten Punkten zum Teil entsprechen. Sie stellt die Basis der derzeitigen operationellen Prozessierung dar. Im Laufe der vergangenen Jahre zeigten sich jedoch eine Reihe von Fällen, in denen dieser Ansatz unzureichende Ergebnisse lieferte, z.B. in der Nähe der Dämmerung oder bei Mondschein (Carsten Schmidt, persönliche Kommunikation). Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob es dabei zu einer Überanpassung des Untergrunds kommt und ob die deutlich einfacheren Verfahren nicht doch zu einem besseren Ergebnis führen.



**Abb. 4.9.:** Das Verhältnis der Q(3-1)-/Q(4-2)-Zweige mit abgezogenem Untergrund der kalibrierten Spektren (schwarz) wird hier mit dem Verhältnis der Q(3-1)-/Q(4-2)-Zweige aus der vorherigen Prozessierung (rot) verglichen. Durch die Nutzung des Verhältnisses ist die Vergleichbarkeit gewährt. Die Streuung der Werte fällt bei einfacher Mittelung am geringsten aus.

Nun werden die Verfahren für GRIPS 8 im Hinblick auf ihre Auswirkung auf die zwei Q(3-1)- und Q(4-2)-Zweige untersucht. Hierfür wird nur der Bereich der zugehörigen Peaks integriert. Dabei werden beide Bereiche auf dieselbe Bandbreite von ca. 13 nm begrenzt.

Das Intensitätsverhältnis der Q-Zweige ist relevant, um auf Wellenaktivitäten in der Atmosphäre rückzuschließen bzw. um Bewölkung festzustellen. Aufgrund dieser Eigenschaften stellt das Verhältnis der Q-Zweige einen simplen Marker der Datenqualität dar. In Abbildung 4.9 ist das Verhältnis der Q-Zweige des GRIPS 8 mit beiden Untergrundbestimmungen dargestellt (schwarz). Zusätzlich wurde das Verhältnis der Q-Zweige aus der vorherigen Prozessierung als Vergleich aufgetragen (rot). Trotz der unterschiedlichen Kalibration ist durch die Nutzung des Verhältnisses die Vergleichbarkeit gewahrt.

Im zeitlichen Verlauf liegt die Streuung für den gemittelten Untergrund sowohl deutlich unterhalb der bisher genutzten Prozessierung als auch unter der linearen Untergrundbestimmung. Um trotz der zeitlichen Veränderung des Verhältnisses der Q(3-1)-/Q(4-2)- Zweige eine quantitative Aussage über das Signalrauschen zu tätigen, muss diese langperiodische Schwankung isoliert und abgezogen werden.

Hierfür wurde ein gleitender Durchschnitt auf die drei Datenreihen angewendet. Als Fenstergröße wurden dabei elf Datenpunkte gewählt, da die so entstehende Zeitspanne deutlich unter der Brunt-Väisälä-Frequenz (ca. 5 min; Wüst et al., 2017) liegt. Mit dieser Frequenz schwingt ein vertikal ausgelenktes Luftpaket in einer idealisierten, stabil geschichteten Atmosphäre. Dieser gleitende Durchschnitt wird vom Signal abgezogen und vom so isolierten Rauschen die Standardabweichung bestimmt. Die Resultate dieser Signalverarbeitung sind in Abbildung 4.10 dargestellt.



**Abb. 4.10.:** Das Verhältnis der Q(3-1)-/Q(4-2)-Zweige mit abgezogenem Untergrund von kalibrierten Spektren wird hier mit dem Verhältnis der Q(3-1)-/Q(4-2)-Zweige aus der vorherigen Prozessierung (Version 1.0) verglichen. Durch die Nutzung des Verhältnisses ist die Vergleichbarkeit gewährt. Links wird die Standardabweichung aus dem gemittelten Untergrund, mittig aus dem linearen Untergrund und rechts aus der vorherigen Prozessierung gezeigt.

Für die drei unterschiedlichen Verarbeitungsmethoden ergeben sich Standardabweichungen von 0,013 im Fall des gemittelten Untergrunds, 0,034 für den linearen Untergrund und 0,025 für die derzeitige operationelle Prozessierung. Dies bestätigt die in Abbildung 4.9 erkennbaren Unterschiede der Intensität des Rauschens. Eine gemittelte Bestimmung des Untergrunds mit anschließender Entfernung dieses Werts führt zum geringsten verbleibenden Rauschen im Verhältnis der Q(3-1)-/Q(4-2)-Zweige unter den hier getesteten Optionen.



**Abb. 4.11.:** Vergleich der zwei Untergrundbestimmungsarten mit vier bzw. fünf Referenzpunkten des in Abb. 4.4 gezeigten Spektrums. Der Untergrund wird bestimmt durch zweifache Gewichtung der Punkte 1 bis 4 und einfache Gewichtung des Punktes 5. Aus der Abweichung der Mittelwerte mit vier bzw. fünf Punkten wird die Unsicherheit der Untergrundbestimmung angegeben. Der bestimmte Untergrund bei diesem Spektrum des GRIPS 7 beträgt 23,93 ± 2,31 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> und des GRIPS 8 31,70 ± 1,90 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>.

Daher wird die gemittelte Untergrundbestimmung als verbesserte Untergrundbestimmung identifiziert. Der Minimumbereich 11 in Abb. 4.4 bzw. 5 in Abb. 4.8 wurde als letzter Bereich hinzugefügt, da der zunächst erprobte Bereich 9 aufgrund der geringen spektralen Auflösung des GRIPS 7 ausgeschlossen werden musste.

#### 4. Prozessierung der OH-Daten

Der Punkt 5 (ehemals 11) liegt dennoch deutlich näher zwischen zwei Emissionslinien, sodass er im folgenden bei der konkreten Berechnung und Unsicherheitsabschätzung einfach gewichtet wird. Damit wird der letztlich verwendete Untergrund berechnet, indem die Intensität an den Punkten 1-4 doppelt und an Punkt 5 einfach gewichtet wird:

$$\frac{\text{Mittelwert [1;4] + Mittelwert [1;5]}}{2}.$$
(4.1)

Diese Bestimmung des Untergrunds ist beispielhaft in Abb. 4.11 für beide GRIPS Instrumente dargestellt, dabei ist der Mittelwert [1;4] links und der Mittelwert [1;5] rechts in blau eingezeichnet. Der resultierende Untergrund aus Gl. 4.1 ist mithilfe einer rot durchgezogen Linie durch beide Bilder markiert. Um die Unsicherheit dieses Werts zu bestimmen, werden die mittleren Intensitäten beider Methoden verglichen:

$$\frac{\text{Mittelwert [1;4]} - \text{Mittelwert [1;5]}}{2}.$$
(4.2)

Bei der Bildung von Zeitreihen der absoluten Intensitäten wird der Untergrund in Zukunft auf diese Weise (siehe Abb. 4.11) abgezogen.
## 4.3. Qualitätssicherung

Nach Abzug des Untergrunds können die einzelnen Spektren integriert werden. Diese werden, um für beide Instrumente vergleichbar zu sein, von 1501 bis 1596 nm integriert.



**Abb. 4.12.:** Jedes Spektrum der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 wurde vollständig integriert und gegen die Zeit aufgetragen. Dabei erkennt man, dass die OH-Intensität in der Nacht - besonders zwischen 0 und 2 Uhr - ansteigt und ab 2 Uhr wieder sinkt. Der vorläufige Mittelwert der ganzen Nacht wurde gebildet und beträgt 97,2 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 104,3 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8. Es zeigt sich, dass es während der Dämmerung Spektren gibt, die bzgl. ihrer Relevanz näher untersucht werden müssen.

Es resultiert eine Strahldichte in der Einheit  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>. Die integrierten Spektren können dann über den Verlauf der Nacht aufgetragen werden. Ein solches Beispiel zeigt Abb. 4.12. Hier wurden alle Spektren der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 vollständig integriert und gegen ihren Aufnahmezeitpunkt aufgetragen. Diese Nacht wurde aufgrund des guten Wetters gewählt und da sie eine besonders hohe Variation der Intensität aufweist. Die Messung startet kurz nach 18:30 UTC und läuft bis nach 03:30 UTC. Die Intensität schwankt zu Beginn bis 23:00 UTC nur leicht, steigt aber dann steil an - ca. eine Verdreifachung der Intensität - und erreicht um 02:00 UTC ihr Maximum. Danach fällt das Signal wieder ab. Die Strahldichten steigen ab 03:30 UTC aufgrund der Dämmerung rapide an. Um die Intensität einer Nacht zu quantifizieren wird ein Mittelwert über alle Einzelmessungen gebildet. Es ist klar erkennbar, dass Dämmerung den Mittelwert der Nacht verfälscht. Daher sollte die Dämmerung bei Bestimmung eines Werts pro Nacht exkludiert werden. Die vorläufigen Mittelwerte der ganzen Nacht liegen zunächst bei 97,2  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> für GRIPS 8. Der Unterschied für die Nacht durch die zwei Instrumente liegt vorläufig also bei 7,2  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> (7 %).

Aber nicht nur die Dämmerung spielt eine große Rolle, auch Wolken oder der Mond haben einen Einfluss auf den Intensitätsverlauf der Nacht. Bisher wurde eine klare Nacht betrachtet. Die Abbildung 4.13 zeigt für beide Instrumente eine Nacht mit Wolken. Diese beeinflussen stark die gemessene Intensität. Die Messung startet nach 19:00 UTC mit einem Peak um 20:30 UTC. Von 21:00 UTC bis 23:00 UTC verläuft die Messung relativ konstant. Aber ab 23:00 UTC bis 02:00 UTC ist ein starker Abfall der Intensitäten aufgrund der Absorption des Signals durch Wolken erkennbar. In diesem Bereich fällt die Intensität zweimal auf fast 0. Nach 02:00 UTC steigt die Intensität wieder an und es sind zwei bis drei Peaks inklusive Dämmerungseffekte zu sehen. Die vorläufigen Mittelwerte der ganzen Nacht beträgen bei GRIPS 7 39,7  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> und bei GRIPS 8 42,0  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>. Aufgrund der gleichen Bewölkung im Sichtfeld beider Geräte ist hier die Abweichung sogar gering. Sie liegt nur bei 2,3  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> (6 %).

Zur Qualitätssicherung wird deshalb ein Bewertungssystem für Spektren eingeführt. Dieses wird durch sogenannte Flags repräsentiert. Dafür wird ein binäres System mit Einsen und Nullen gewählt. Diese binären Flaglisten können einfach auf die Intensitäten multipliziert werden und alle auf null gesetzten Intensitäten werden nachfolgend maskiert, sodass sie in weitere Berechnungen nicht mit einfließen. Dabei bedeutet, dass Spektren mit gesetzten Flags (Flag = 1) die Rahmenbedingungen erfüllen.

Um Variablen zur Bestimmung der Flags einzuführen, wird zuerst die Betrachtung der Absorption der Atmosphäre durch beispielsweise Wolken, Wasser und Wasserdampf eingeschoben. Abbildung 4.14 stellt die atmosphärische Transmissivität zwischen 1500 nm und 1600 nm dar. Die Transmission zeigt keinen konstanten Verlauf, sondern weist vor allem bis ca. 1520 nm starke Einbrüche auf. Der Q(3-1)- Zweig wird von 1503,5 nm bis



**Abb. 4.13.:** Jedes Spektrum der Nacht vom 31.05. auf den 01.06.2018 wurde vollständig integriert und gegen die Zeit aufgetragen. Dabei erkennt man, dass die OH-Intensität in der Nacht erst ansteigt und zwischen 0 und 2 Uhr stark sinkt. Dies ist ein Indiz für Bewölkung. Der vorläufige Mittelwert der ganzen Nacht beträgt 39,7 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 42,0 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8.

1516,5 nm integriert. Man könnte erwarten, dass die OH-Emissionen in diesem Bereich also viel stärker absorbiert werden als jene des OH(4-2)-Zweigs bei 1581,5 nm bis 1594,5 nm. Jedoch sind die Emissionslinien sehr schmal und liegen überwiegend zwischen den H<sub>2</sub>O-Absorptionslinien. Die senkrechten roten Linien kennzeichnen die drei P<sub>1</sub>(3-1)-Linien, die zur Bestimmung der OH-Rotationstemperatur herangezogen werden. Ihre Transmission liegt nach dieser Betrachtung bei über 99,0% (Schmidt, 2016).



**Abb. 4.14.:** Das Bild zeigt die Transmission der Atmosphäre bei tropischer und arktischer Wasserdampfkonzentration gegenüber der Wellenlänge zwischen 1500 nm und 1600 nm. Die eingezeichneten drei roten Linien sind drei Übergänge des OH(3-1) P-Zweigs, die zur Berechnung der OH-Rotationstemperatur herangezogen werden. Die Fälle a) und b) zeigen die Transmissivität unter Berücksichtigung hoher (tropischer) und niedriger (arktischer) Wasserdampfkonzentration. Mit zunehmender Wellenlänge geht die Transmission konstant gegen 1. Quelle: Schmidt, 2016.

Dabei wurde ausschließlich Wasserdampf betrachtet, aber Wolken bestehen nicht nur aus Wasserdampf. Deswegen wird noch das Verhalten für Wasser betrachtet. In Abb. 4.15 ist die Eindringtiefe für drei Wassertemperaturen eingezeichnet. Die Eindringtiefe ist invers proportional zum Brechungsindex. Bei Wasser und unterkühltem Wasser ist die Eindringtiefe deutlich abhängiger von der Wellenlänge als bei Eis. Beim Q(3-1)-Zweig beträgt die Eindringtiefe ca. 0,5 mm, während sie bei dem Q(4-2)-Zweig über 1 mm liegt.

Bildet man also das Verhältnis der Q-Zweige und erhält einen niedrigen Wert, dann ist das ein Indiz für Wolken. Generell ist dieses Verhältnis kleiner als 1, da die Intensität des Q(4-2)-Zweigs immer höher ist als die des Q(3-1)-Zweigs. Dies ist auf die höhere Übergangswahrscheinlichkeit beim Übergang vom vierten auf das zweite Vibrationsniveau zurückzuführen. Die Übergänge 4-2 und 3-1 stellen dabei die stärksten Emissionslinien aller OH-Übergänge.

Das bedeutet, das Verhältnis der Q-Zweige kann als Indikator für Bewölkung verwendet werden. Dabei müssen jedoch die Randbedingungen für eine sichere Identifikation



**Abb. 4.15.:** Die Eindringtiefe für drei verschiedene Wassertemperaturen ist gegenüber der Wellenlänge aufgetragen. Es wurde Wasser bei 22 °C, unterkühltes Wasser bei –8 °C und Eis bei –22 °C untersucht. Die senkrechten Linien geben die Position der für die Temperaturberechnung benutzten OH-Linien an. Quelle: Schmidt (2016).

festgelegt werden. Bei Sonneneinstrahlung kann das Q-Verhältnis in der Dämmerung oft höher als 1 sein, wodurch diese mithilfe des Flags zusätzlich eliminiert werden. Das Verhältnis der Q-Zweige sollte unter optimalen Bedingungen unter 1 liegen. Somit ergibt sich das erste Kriterium:

$$1 > \frac{Q(3-1)}{Q(4-2)}.$$
(4.3)

Die untere Grenze dagegen ist schwieriger zu bestimmen.

Als zweiter Flag wird noch die Höhe des Untergrunds betrachtet. Bei jedem Spektrum wird einzeln der Untergrund bestimmt und abgezogen. Je höher die integrierte Intensität ist, desto höher ist auch der abgezogene Untergrund. Somit können Einflüsse der Dämmerung und des Mondes über Randbedingungen der Größe des Untergrunds exkludiert werden. Die erste Bedingung für den Untergrund ist einfach zu bestimmen. Der Untergrund darf nicht negativ sein, da er per Definition einem positiven Grundsignal entspricht.

Untergrund 
$$\ge 0 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$
. (4.4)

Um für beide Flags die jeweils noch fehlende Randbedingungen festzulegen, wurde eine Studie durchgeführt. Dafür wurden im Fall der unteren Grenze des Q-Verhältnisses zwei plausible Untergrundwerte gewählt und dabei das Q-Verhältnis in Schritten von 0,5 zwischen 0,65 und 0,8 variiert.

Dabei fiel auf, dass oft einzelne Spektren bei Bewölkung aufgrund der so gewählten Flags nicht aussortiert wurden, weil in der Momentaufnahme von 10 s bzw. 15 s die Bedingungen kurzzeitig erfüllt wurden, sie aber trotzdem den Mittelwert der Intensität stark



**Abb. 4.16.:** Flagging-Studie für beide GRIPS-Instrumente. Dabei wurden alle gesetzten Flags der Nächte der Jahren 2010 bis 2022 gezählt. Dies wurde für 10 verschiedene Konfigurationen durchgeführt. Der Mindestuntergrund wurde zwischen 100 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> und 200 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> variiert und das Q-Verhältnis in 0,5er Schritten von 0,65 bis 0,8. Es wurden verschiedene Mindestanzahlen an gesetzten Flags untersucht. Die zugehörige Konfiguration zur jeweiligen Balkennummer ist in Tab. 4.2 dargestellt.

beeinträchtigten. Daher wurde in der Flaggingstudie ein weiterer Parameter eingeführt. Es muss eine Mindestanzahl an konsekutiven gesetzten Flags existieren, ansonsten werden alle Flags des betreffenden Bereichs auf Null gesetzt. Für eine geforderte Mindestanzahl von vier konsekutiven, gesetzten Flags und eine Messung fünf konsekutiver Flags ergibt sich durch dieses Verfahren kein Unterschied:

$$011110 \rightarrow 011110.$$
 (4.5)

Für eine Messung mit einer geringeren Zahl als die vier geforderten konsekutiven, gesetzten Flags, wird der betreffende Bereich eliminiert:

$$01110 \to 00000.$$
 (4.6)

Dasselbe wurde auch für eine Mindestanzahl an sieben konsekutiven, gesetzten Flags durchgeführt:

$$011111110 \to 011111110. \tag{4.7}$$

Werden unter sieben konsekutive, gesetzte Flags gemessen, so sieht die maximale Konstellation, die noch eliminiert wird, folgendermaßen aus:

$$01111110 \to 00000000. \tag{4.8}$$

Bei beiden Verfahren werden alle Kombinationen unter 4 bzw. 7 konsekutiven, gesetzten Flags auf Null gesetzt. 6 auf Null gesetzte Flags entsprechen einer Aufnahmezeit von einer Minute bei GRIPS 7 bzw. 1,5 Minuten bei GRIPS 8. In dieser Zeitspanne ist ein rapider Umschwung des Wetters von vollständig unbewölkt auf vollständig bewölkt wenig wahrscheinlich. Vielmehr gibt es eine kurze Übergangsphase, in der die Transmissivität der Atmosphäre sinkt. Die bisherige Prozessierung optimiert die Ableitung der Rotationsparameter, diese ist mit entsprechend hoher Unsicherheit auch bei teilweise bedecktem Himmel noch möglich. Für die Bestimmung der Intensitäten gilt dies nicht. Für die Studie wurden nun alle gesetzte Flags bei verschiedenen Bedingungen für alle Nächte der Jahre 2010 bis 2022 gezählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Die zugehörige Konfiguration zur jeweiligen Balkennummer ist in Tab. 4.2 dargestellt.

Es wird eine Mindestanzahl konsekutiver, gesetzter Flags von 7 verwendet, da ein rapider Umschwung des Wetters in 1 bzw. 1,5 Minuten im Verlauf der ganzen Nacht wenig wahrscheinlich ist. Aufgrund dieser Studie werden jetzt die fehlenden Grenzen bestimmt. Gleichung 4.3 wird zu:

$$1 > \frac{Q(3-1)}{Q(4-2)} > 0,65.$$
(4.9)

Die untere Grenze des Q-Verhältnisses von 0,65 wurde deshalb gewählt, da besonders helle Nächte diesen Wert erreichen und gleichzeitig keine Indikation für Bewölkung besteht. Dies wurde mit Wettermodellen abgeglichen. Daher wird angenommen, dass eine Filterung nach dem Grenzwert des Q-Verhältnisses über einem Wert von 0,65 gleichzeitig einer Filterung nach den Wetterbedingungen entspricht. Ein höherer Grenzwert würde höchstwahrscheinlich auch Spektren mit guten Wetterbedingungen eliminieren.

Zu Beginn der Studie wurde absichtlich ein höherer Untergrundwert von 200 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> gewählt. In der Studie (siehe Abb. 4.16) werden die Effekte des Untergrundwerts und

Balken	Untergrund	Q-Verhältnis	Mindestanzahl konsekutiver Flags
1	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,65	0
2	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,65	4
3	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,65	7
4	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,7	7
5	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,75	7
6	$  200  W  m^{-2}  m^{-1}  sr^{-1}$	0,8	7
7	$  100 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	0,65	7
8	$  100 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	0,7	7
9	$  100 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	0,75	7
10	$  100 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	0,8	7

**Tabelle 4.2.:** Die Tabelle stellt die zugehörigen Konfigurationen der jeweiligen Balkennummer von Abbildung 4.16 dar. Die Konfigurationen bestehen aus der Obergrenze für den Untergrund, der Untergrenze des Q-Verhältnisses und der Mindestanzahl konsekutiver, gesetzter Flags nach Gl. (4.6) bzw. Gl. (4.8).

der Mindestanzahl konsekutiver gesetzter Flags, sowie eine Reduktion des Untergrundwerts auf 100 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> untersucht. Dabei fällt auf, dass der Unterschied zwischen dem Untergrundwert von 200 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> mit bzw. ohne Mindestanzahl konsekutiver gesetzter Flags deutlich größer ist, als der Unterschied des Untergrundwerts von 200 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> auf 100 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> mit einer Mindestanzahl konsekutiver gesetzter Flags. Unter denselben Bedingungen führt die Mindestanzahl an konsekutiven gesetzten Flags zu einer höheren Anzahl an aussortierten Spektren als die Reduktion des Untergrunds. Daher wird die obere Grenze des Untergrunds aus Gl. 4.4 auf 100 W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> festgelegt:

$$100 \text{ W } \text{m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1} > \text{Untergrund} \ge 0 \text{ W } \text{m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}.$$
(4.10)

Vereint man nun die integrierten Spektren von Abb. 4.12 mit den vorher beschriebenen, erstellten Flaglisten, so ergibt sich Abb. 4.17. Der Mittelwert der ganzen Nacht beträgt nun bei GRIPS 7 101,3  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> und bei GRIPS 8 102,9  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>. Das heißt der Mittelwertunterschied beträgt nur noch 1,7  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> (1,7%). Die Dämmerung wurde vollständig aus dem Verlauf der Nacht eliminiert.

Auch Abb. 4.13 wurde mit der erstellten Flagliste für diese Nacht multipliziert. Das Ergebnis ist in Abb. 4.18 dargestellt. Die Dämmerung am Anfang und am Ende der Nacht wurde entfernt. Die Bewölkung zwischen 23:00 UTC und 02:00 UTC wurde bis auf einen kleinen Rest kurz vor 01:00 UTC eliminiert. Der Mittelwert der ganzen Nacht beträgt nun 58,6  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 57,5  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8. Der Unterschied beträgt 1,1  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>. Die Strahldichte des GRIPS 7 liegt insgesamt um 1,9 % höher. Die starken



**Abb. 4.17.:** Jedes Spektrum der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 wurde vollständig integriert und gegen die Zeit aufgetragen. Durch die Einführung von Flags wird in diesem Fall die Dämmerung der Nacht entfernt. Der Mittelwert der ganzen Nacht beträgt nun 101,3 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 102,9 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8.

Gradienten gegen 02:30 UTC zeigen jedoch, dass auch mit diesen Flags offenbar nicht alle bewölkten Spektren entfernt werden. Das Ergebnis der Flagging-Studie war jedoch, dass bei weiterer Einschränkung der Parameter in anderen Situationen zu viele gute Spektren entfernt werden.



**Abb. 4.18.:** Jedes Spektrum der Nacht von dem 31.05. auf den 01.06.2018 wurde vollständig integriert und gegen die Zeit aufgetragen. Durch die Einführung von Flags werden in diesem Fall die Dämmerung und die Bewölkung zwischen 0 und 2 Uhr der Nacht entfernt. Der Mittelwert der ganzen Nacht beträgt nun 58,6 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 57,5 µW m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8.

## 4.4. Unsicherheitsabschätzung

Nach Entfernung der kontaminierten Spektren wird der Mittelwert über alle verbleibenden Intensitäten der Nacht gebildet, um die Nacht auf einen Wert zu reduzieren:

$$M_L = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_N}{N},$$
(4.11)

dabei steht  $L_N$  für die Strahlungsenergieflussdichte des N-ten Spektrums und N für die Anzahl aller verbleibenden Spektren. Nachfolgend steht die Bewertung des Mittelwert  $M_L$ an. Dies geschieht aufgrund von Unsicherheitsabschätzungen. Die Unsicherheit kann in zwei große Bereiche aufgeteilt werden.

Der erste Bereich ist die technische Unsicherheit und der zweite die geophysikalische Unsicherheit aufgrund der Variationen der Intensität im Verlauf einer Nacht. Der Fokus liegt zunächst auf der Bestimmung der technischen Unsicherheit. Diese tritt bei der Bestimmung der Intensität eines einzelnen Spektrums auf und pflanzt sich entsprechend fort. Um die Intensität eines Spektrums zu bestimmen, wird als erstes das aufgenommene Signal *S* mit der Fenstertransmission  $x_F$  und der PTB-Kalibration  $x_{PTB}$  kalibriert und von der Intensität *I* der Untergrund *U* abgezogen:

$$L = \int_{1501 \,\mathrm{nm}}^{1596 \,\mathrm{nm}} (I(\lambda) - U(\lambda)) \,\mathrm{d}\lambda = \sum (I(\lambda) - U(\lambda)) \,. \tag{4.12}$$

L bezeichnet dabei die endgültige Strahlungsdichte eines Spektrums. Das Integral von 1501 bis 1596 nm kann durch eine Summierung über die entsprechenden Pixel des Detektors der einzelnen Spektren in diesem Wellenlängenbereich ersetzt werden. Die Intensität *I* und der Untergrund *U* werden durch Kalibrationen beeinflusst, dadurch spalten sich *I* und *U* auf in:

$$L = \sum \left( \frac{S \cdot x_{\text{PTB}}}{x_{\text{F}}} - \frac{U_s \cdot x_{\text{PTB}}}{x_{\text{F}}} \right).$$
(4.13)

Das Signal *S* hat schon bei Spektrumaufnahme ein Untergundsignal  $U_S$ . Für die einzelnen Größen  $x_F$ ,  $x_{PTB}$ , *S* und *U* kann jetzt eine spezifische Unsicherheit bestimmt werden. Aus Kapitel 3 können die Unsicherheiten für  $x_F$  und  $x_{PTB}$  zusammengefasst (d.h. vereinfacht) werden:

$$\Delta x_{\rm F} = 0,27 \,\%, \tag{4.14}$$

$$\Delta x_{\rm PTB} = 1,23\%. \tag{4.15}$$

Diese beiden Unsicherheiten werden zu den Kalibrationsunsicherheiten gezählt. Diese Unsicherheiten können nur mit großem Aufwand reduziert werden. Die PTB hat die Intensitätskalibrierung und die Fenstertransmission bereits mit verfügbarer Präzision gemessen (siehe Abb. 3.2 und 3.6).



**Abb. 4.19.:** Die vier einzelnen Komponenten sowie die gesamte technische Unsicherheit wurden hier pro Spektrum im Verlauf der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 aufgetragen. Die Transmissionsunsicherheit wird durch rote Kreise ( $\Delta x_F = 0.27\%$ ), die PTB-Intensitätsunsicherheit durch gelbe Dreiecke ( $\Delta x_{PTB} = 1.23\%$ ), die Untergrundunsicherheit durch violette Hexagone (Gl. 4.16) und die Signalunsicherheit durch blaue Rauten (Gl. 4.18) dargestellt. Schwarze Quadrate markieren die gesamte technische Unsicherheit aus Gl. (4.19).

Zu Verbesserung von  $\Delta x_{PTB}$  hat die PTB ein neues GRIPS-Instrument beispielsweise vollständig überarbeitet, es mit besserer thermischer Isolierung und einer stabileren Wasserkühlung (± 0,02 °C) ausgestattet, sodass der Sensor bis auf -80 °C gekühlt werden kann.

Die Untergrundunsicherheit  $\Delta U$  wird in Abschnitt 4.2 aus den verschiedenen Gewichtungen der Untergrundspunkte bestimmt. Um diesen absolut Wert mit den anderen Unsicherheiten zu vereinen und auch in Prozent anzugeben, wird dieser über den Wellenlängenbereich integriert, also aufsummiert, und dann durch die Strahlungsdichte eines Spektrums geteilt:

$$\Delta U_L = \frac{\sum \left(\frac{x_{\rm PTB}}{x_{\rm F}} \cdot \Delta U_s\right)}{L} = \frac{\sum \left(\Delta U\right)}{L}.$$
(4.16)

Die Signalunsicherheit  $\Delta S_L$  dagegen ist aufwändiger zu bestimmen. Dafür wird ein Rauschverhältnis bei der Spektrumaufnahme verwendet. Vor der Kalibration wird das Rohsignal mit abgezogenen Dunkelstrom mit einem Bereich von 2 Pixeln gemittelt. Dieses gemittelte Spektrum wird von dem Rohsignal abgezogen. Von dieser Differenz wird die Standardabweichung bestimmt. Diese gibt den Fehler des Signals  $\Delta S$  an.  $\Delta S_L$  wird anschließend durch den Standardfehler von *L* berechnet und für eine Angabe in Prozent durch *L* geteilt:

$$\Delta S_L = \frac{\sqrt{\sum \left(\frac{dL}{dS}\right)^2}}{L}.$$
(4.17)

Somit bestimmt sich  $\Delta S_L$  endgültig aus:

$$\Delta S_L = \frac{\sqrt{\sum \left(\frac{x_{\rm PTB}}{x_{\rm F}} \cdot \Delta S\right)^2}}{L}.$$
(4.18)

Das Ziel ist, eine technische Unsicherheit  $\Delta L$  pro Spektrum zu bestimmen. Dafür werden jetzt die vier oben beschriebenen Unsicherheitsquellen nochmals mithilfe eines Standardfehlers zusammengeführt:

$$\Delta L = \sqrt{\Delta x_{\rm F}^2 + \Delta x_{\rm PTB}^2 + \Delta U^2 + \Delta S^2}.$$
(4.19)

Die Strahldichte eines Spektrums beträgt also  $L \pm \Delta L$ . Die maximale Strahldichte ist  $L_{\text{max}} = L + \Delta L$  und die minimale  $L_{\text{min}} = L - \Delta L$ . Dies wurde anhand eines Beispiels in Abbildung 4.19 zur Verdeutlichung eingezeichnet. Die gesamte technische Unsicherheit (schwarze Quadrate) liegt über allen einzelnen Komponenten. Die Kalibrationsunsicherheiten - Transmission des Fensters (roter Kreis) und PTB (gelbes Dreieck) - sind feste relative Unsicherheiten. Die Signalunsicherheit (blaue Raute) zeigt auch einen stetigen, nächtlichen Verlauf und ist bei niedrigen Intensitäten höher (vgl. Abb. 4.20). Dagegen zeigt die Untergrundunsicherheit (violettes Hexagon) eine geringe Korrelation mit den

#### 4. Prozessierung der OH-Daten

Intensitäten. Aber auch hier steigt die Streuung und der maximale Wert der Untergrundunsicherheit bei niedrigen Intensitäten an. Da GRIPS 7 in etwa fünfzig Prozent mehr Spektren pro Nacht aufnimmt, ist hier die höhere und vermehrte Streuung der Untergrundwerte zu erwarten (siehe Abb. 4.19a). Der Untergrund ist offenbar der kritischste Faktor bei der Bestimmung der Gesamtunsicherheit. Eine präzisere Bestimmung des Untergrunds hätte also derzeit die meiste Auswirkung auf die Gesamtunsicherheit. Abschließend liegt der gesamte technische Fehler für diese Nacht bei jedem Spektrum unter fünf Prozent.

Um nun eine technische Unsicherheit für den Mittelwert  $M_L$  aus allen verbleibenden Spektren anzugeben, wird einmal  $M_{Y(max)}$  als Mittelwert aus allen  $L_{max}$  bestimmt:

$$M_{Y(\max)} = \frac{L_{1(\max)} + L_{2(\max)} + \dots + L_{N(\max)}}{N}.$$
(4.20)

Dasselbe Verfahren wird für  $M_{Y(\min)}$  angewendet:

$$M_{L(\min)} = \frac{L_{1(\min)} + L_{2(\min)} + \dots + L_{N(\min)}}{N}.$$
(4.21)

Der nächtliche Mittelwert kann nun mit der technischen Unsicherheit angegeben werden als  $M_L \pm \Delta M_L$ , dabei gilt:

$$\Delta M_L = (M_{L(\max)} - M_{L(\min)})/2.$$
(4.22)

Bis jetzt wurde nur der technische Bereich der Unsicherheit betrachtet. Der zweite Bereich ist die geophysikalische Unsicherheit. Diese folgt aus dem nächtlichen Verlauf der Strahldichten. Bildet man den Mittelwert der Intensitäten, unterschlägt man die Variation des Verlaufs, die von der Dynamik der Atmosphäre beeinflusst wird. Um diesen Wert bei der Berechnung des Mittelwerts zu quantifizieren wird über den gesamten Verlauf die Standardabweichung  $\sigma$  gebildet. Diese setzt sich aus der Wurzel der Varianz zusammen, die ein Maß für die Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichte um ihren Schwerpunkt ist (Weisberg, 2005):

$$\sigma = \sqrt{\text{Varianz}}.$$
(4.23)

In Abbildung 4.20 ist die technische Unsicherheit eingezeichnet, dabei wurden die Punkte der Strahldichten *L* so klein dargestellt, dass die Größe des Symbols nicht den Fehlerbalken überdeckt. Dies ist nötig, da die technische Unsicherheit deutlich unter 5 % liegt. Sie liegen in diesem Beispiel bei  $M_{L7} = 1,61 \,\mu\text{W} \,\text{m}^{-2} \,\text{sr}^{-1}$  bzw. 1,6 % und bei  $M_{L8} = 1,58 \,\mu\text{W} \,\text{m}^{-2} \,\text{sr}^{-1}$  bzw. 1,5 %. Betrachtet man hier die geophysikalische Unsicherheit, so liegt diese bei 36,6  $\mu\text{W} \,\text{m}^{-2} \,\text{sr}^{-1}$  bzw. 36,14 % für GRIPS 7 und bei 37,3  $\mu\text{W} \,\text{m}^{-2} \,\text{sr}^{-1}$  bzw. 36,28 % für GRIPS 8. Die Variation der Intensitäten des Nachthimmelleuchtens im Verlauf



**Abb. 4.20.:** Die technischen Unsicherheiten  $\Delta L$  der Nacht von dem 28. auf den 29.04.2022 wurden gegen die Zeit aufgetragen. Die Punkte der Strahldichten *L* wurden klein dargestellt, so dass die Größe des Symbols nicht den Fehlerbalken überdeckt. Die geophysikalische Unsicherheit  $\sigma$  beträgt 36,6  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 7 und 37,3  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> bei GRIPS 8.

der Nacht und somit die Erzeugung einer geophysikalischen Unsicherheit macht also den Großteil der Unsicherheiten aus.

Vergleicht man die Strahldichten in ihrem Wert mit der Literatur, so gibt Leinert et al. (1998) einen relativ großen Bereich zwischen 10 und 100  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> an. In dieser Größenordnung liegen auch die beobachteten Strahldichten. In Nishiyama et al. (2021) können die Intensitäten bzw. die maximale Intensität der Q-Zweige verglichen werden. Konzentriert man sich auf den Q(3-1)-Zweig, so gibt Nishiyama et al. (2021) in Fig. 2a den Wert 30  $\frac{kR}{nm}$  an. Mithilfe der Formel aus Gl. (2.8) kann diese Einheit umgerechnet werden in:

$$30 \frac{\mathrm{kR}}{\mathrm{nm}} = 30 \cdot 10^{12} \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{m}} = 3130 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \mathrm{msr}}$$
(4.24)

Vergleicht man diesen Wert mit der Intensität des Q(3-1) um ca. 23:00 UTC in der Nacht von dem 28.04. auf den 29.04.2022 des GRIPS 8, so liegt dieser bei 1100  $\mu$ W m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>, also ca. um den Faktor drei höher. Dies ist auf die geringere spektrale Auflösung und die unterschiedliche mittlere Wellenlänge der beiden Messungen zurückzuführen. Insgesamt passen die Messungen aber gut mit den Literaturwerten überein.

# 5. Messungen und Diskussion der Strahlungsenergieflussdichten

## 5.1. Jahre 2010 bis 2022

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Aussagekraft des Mittelwerts einer Nacht mit sinkender Beobachtungszeit abnimmt. Um die Qualität der Daten zu sichern, wird daher als Kriterium für die Bildung des Mittelwerts eine Mindestbeobachtungszeit festgelegt. Andere Forscher haben bereits Überlegungen für die Berechnung eines Nachtmittelwerts der Temperatur angestellt, wie z.B. "mindestens zwei Stunden Beobachtungszeit" von Schmidt et al. (2013) und "mindestens vier Stunden Beobachtungszeit" von Taylor et al. (2019). Für Intensitäten liegen jedoch keine vergleichbaren Erfahrungswerte vor. Um die effektive Beobachtungszeit zu bestimmen, werden die gesetzten Flags gezählt. Für GRIPS 7 (mit einer Belichtungszeit von 10 Sekunden) entsprechen zwei Stunden 720 Flags und vier Stunden 1440 Flags. Für GRIPS 8 (mit einer Belichtungszeit von 15 Sekunden) entsprechen zwei Stunden 480 Flags und vier Stunden 960 Flags. Im Folgenden werden daher beide Beobachtungszeiten detailliert betrachtet und genauer untersucht.

#### Jahr 2018

Bevor die lange Zeitreihe von 2010 bis 2022 dargestellt wird, wird zunächst die Zeitreihe von 2018 exemplarisch genauer betrachtet. In diesem Jahr war die Konfiguration beider Geräte bezüglich des Gesichtsfeldes (siehe Abschnitt 3.3) identisch und es kam zu keinen Datenlücken oder sonstigen Änderungen an den Instrumenten.

Abbildung 5.1 zeigt die Strahlungsenergieflussdichten-Zeitreihe von 2018 für beide Instrumente. Ein gleitender Durchschnitt von 60 Tagen bzw. 2 Monaten wurde über alle Datenpunkte gebildet, um den Langzeitverlauf besser zu erkennen. Sowohl im Winter als auch im Sommer bilden sich Maxima aus. Es konnten drei Maxima (olive Pfeile) und zwei Minima (violette Pfeile) identifiziert werden. Die drei Maxima entsprechen zwei Wintermaxima und einem Sommermaximum. Die Wintermaxima sind dabei stärker ausgeprägt als die Sommermaxima. Die Unsicherheit ist als schraffierter Bereich dargestellt und setzt sich hauptsächlich aus der geophysikalischen Unsicherheit zusammen, die um mindestens eine Größenordnung höher liegt, als die technische Unsicherheit. Der genaue Verlauf der jeweiligen Unsicherheiten ist für eine Messzeit von 2 Stunden (Abb. A.5) und von 4 Stunden (Abb. A.6) im Anhang gezeigt.



**Abb. 5.1.:** Die Strahldichten des OH-Moleküls im Verlauf des Jahres 2018. Mit den Daten der Zeitreihe von GRIPS 7 bzw. GRIPS 8 wurde ein gleitender Durchschnitt von 2 Monaten bzw. 60 Tagen gebildet, um den Jahresverlauf zu beschreiben. Die oliven Pfeile markieren in der Dynamik der Strahldichten die Maxima und die violetten Pfeile die Minima.

Der Verlauf der Strahldichten im Jahr 2018 kann nun mit der Literatur verglichen werden, beispielsweise mit den Modellierungen der OH-Emissionen von Grygalashvyly et al. (2021).

Abbildung 5.2 zeigt das nächtliche Mittel der gleitenden 1-Monats-Volumenemission des angeregten Hydroxylmoleküls. Das Modell setzt sich aus mehreren Einflüssen zusammen, wie der Temperatur, der Emissionshöhe und der Dichte an atomarem Sauerstoff. Die Emis-

sionshöhe liegt bei dem Modell im Vergleich zu Messungen von Wüst et al. (2017), die eine Höhe von ca. 86 km identifiziert haben, deutlich höher. Atomarer Sauerstoff ist eine bedeutende Kenngröße. Es ist möglich, mithilfe der absoluten Strahlungsenergieflussdichten Informationen über die Konzentration von atomaren Sauerstoff in der MLT zu erhalten. Die Maxima und Minima entlang der in schwarz eingezeichneten geographischen Breite der UFS (47°24′59″ N) bzw. der Gesichtsfelder der GRIPS-Instrumente werden durch komplexe Vorgänge beeinflusst. Die gleichen Pfeile wie in Abbildung 5.1 wurden auch hier eingezeichnet. Vergleicht man nun das Modell mit den gemessenen Strahldichten, so ist zu erkennen, dass bei beiden ein Halbjahresgang deutlich wird. Auffällig ist, dass insbesondere das beobachtete Wintermaximum von 2018 im Vergleich mit dem Modell nicht präzise lokalisiert ist. Ansonsten stimmen das Frühlingsminimum und das Herbstminimum gut überein. Insgesamt weisen die gemessenen Strahldichten und das Modell von Grygalashvyly et al. (2021) große Übereinstimmung auf: Insbesondere die Doppelstruktur mit zwei Maxima im November und zum Jahreswechsel stimmen gut überein.



**Abb. 5.2.:** (a) zeigt die Modellierung des nächtlichen Mittels der gleitenden 1-Monats-Volumenemissionen des angeregten Hydroxylmoleküls, (b) die Temperatur, (c) die Konzentration des atomaren Sauerstoffs bei dem OH-Peak und (d) die Höhe des OH-Peaks. Zur Übersicht wurde der Standort der UFS bzw. der Gesichtsfelder der GRIPS bei ca. 46-47°N mittels einer schwarzen Linie eingezeichnet. Entlang der Linie können in guter Näherung dieselben drei Maxima und zwei Minima identifiziert werden wie in Abb. 5.1 (siehe Pfeile). Quelle: Grygalashvyly et al. (2021).

#### Jahre 2010 bis 2022

Im Laufe der 12 Jahre haben an den Instrumenten einige Änderungen stattgefunden, die vor der Darstellung der Langzeitreihe der Strahldichten berücksichtigt werden müssen.



**Abb. 5.3.:** Die täglichen Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 für beide Mindestmesszeiten des GRIPS 7 dargestellt. Die geophysikalische Unsicherheit ist hellgrau für jeden Datenpunkt eingezeichnet. Die Abweichung des Gesichtsfeldes von dem Standardbereich des GRIPS 8 ist farbig markiert. Blau zeigt hier denselben blau markierten Bereich wie in Abb. 3.4. Dasselbe gilt auch für den violetten Bereich.

Normalerweise misst GRIPS 7 mit einer Belichtungszeit von 10 Sekunden. In den Zeiträumen vom 04.08.2009 bis 02.09.2010, vom 16.02.2011 bis 11.03.2011 sowie vom 16.07.2016 bis 29.11.2016 wurde jedoch mit einer Belichtungszeit von 15 Sekunden gemessen. Da das Instrument 2017 von der PTB auf 10 Sekunden Belichtungszeit kalibriert wurde, wurde in diesen Zeiträumen die Intensität durch 1,5 dividiert.

Abbildung 5.3 zeigt die Strahlungsenergieflussdichten der Jahre 2010 bis 2022 von GRIPS 7 zusammen mit der geophysikalischen Unsicherheit bei einer Mindestmessdauer von 2 Stunden (Abb. 5.3a) bzw. 4 Stunden (Abb. 5.3b). Die Wahl der geophysikalischen Unsicherheit begründet sich damit, dass sie im Gegensatz zur technischen Unsicherheit den größten Anteil an der Gesamtunsicherheit ausmacht. Es wurde im Laufe der Zeit nicht nur die Belichtungszeit, sondern auch das Gesichtsfeld des GRIPS 7 Instruments verändert. Diese Änderungen werden in Abschnitt 3.3 beschrieben. In Abbildung 5.3 sind die Änderungen des Gesichtsfeldes farblich markiert. Die Farben entsprechen dabei den Gesichtsfeldern aus Abb. 3.4. Die Kalibration ist auf das Standard-Gesichtsfeld von GRIPS 8 ausgerichtet. Zudem sind Vergleiche mit den Strahldichten von GRIPS 8 nur aussagekräftig, wenn die Gesichtsfelder übereinstimmen.

Wie in Abb. 5.1 bilden sich bei der Zeitreihe der Strahldichten des GRIPS 7 sowohl im Winter als auch im Sommer Maxima aus. Die Wintermaxima sind dabei systematisch stärker ausgeprägt als die Sommermaxima. Die Maxima sind maßgeblich auf die erhöhte Konzentration von atomarem Sauerstoff O in der Atmosphäre zurückzuführen. Für den Anstieg der Konzentration von O sind in erster Linie vertikale Transportprozesse verantwortlich, denn die Konzentration von atomaren Sauerstoff steigt mit zunehmender Höhe über der MLT stark an. Abwärts gerichtete Strömungen sind ein Kennzeichen der winterlichen MLT. Insofern ist die Ausbildung des sekundären Maximums im Sommer zunächst überraschend. Aktuelle Modellierungen von Grygalashvyly et al. (2021) zeigen jedoch, dass sich aufgrund der zonalen Struktur der Temperatur, der O-Konzentration und der Höhe der OH-Schicht in mittleren Breiten ein Sommermaximum ausbilden sollte.

Auch für GRIPS 8 sind die Strahlungsenergieflussdichten der Jahre 2010 bis 2022 zusammen mit der geophysikalischen Unsicherheit bei einer Mindestmessdauer von 2 Stunden (Abb. 5.4a) bzw. 4 Stunden (Abb. 5.4b) dargestellt. Bei diesem Instrument wurde weder das Gesichtsfeld noch die Belichtungszeit geändert. Stattdessen wurde eine Wellenlängenverschiebung detektiert. Der gewählte Wellenlängenbereich des Instruments wird maßgeblich aus der Gitterkonstante bestimmt. Seit Beginn der Messung bis 23.04.2015 wurde eine Gitterkonstante von 783 nm eingestellt. Diese wurde zwischen 23.04.2015 und 21.05.2015 auf 785 nm variiert. Ab 21.05.2015 betrug die Gitterkonstante einen Wert von 782-782,5 nm. Die Kalibration der PTB fand im Jahr 2017 statt, dabei wurde die Gitterkonstante erneut bestimmt. Sie betrug zu diesem Zeitpunkt 782  $\frac{2}{3}$  nm. Daher wurde die Wellenlänge der Spektren für die Strahldichten vor dem 23.04.2015 um 9 Pixel verschoben, um die Kalibration anwenden zu können. Die Verschiebung um 9 Pixel ist in der Abb. 5.4 durch den großen pinken Bereich dargestellt. Auf den pink markierten Bereich folgt ein vergleichsweise



**Abb. 5.4.:** Die täglichen Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 für beide Messdauern des GRIPS 8 dargestellt. Der große pinke und kleine gelbe Bereich deuten eine Wellenlängenverschiebung vor der Kalibration der PTB 2017 an. Bei der Berechnung der Strahldichten wurde die Verschiebung um 9 Pixel berücksichtigt.

kurzer, gelb markierter Bereich. Dieser kennzeichnet eine Verschiebung der Wellenlänge in den Monaten April und Mai 2015. In den Monaten August, September und Oktober des Jahres 2019 weist das GRIPS 8 Instrument aufgrund eines technischen Defekts fehlerhafte Daten auf. Daher wurden diese Monate aus der Zeitreihe entfernt.

Neben den Zeitreihen der Strahldichten auf Tagesbasis wurden auch Monatsmittelwerte gebildet. Im Folgenden wird sich nun auf eine Mindestmessdauer von 4 Stunden pro Nacht

beschränkt, da so die Aussagekraft und die Qualität der Daten im Gegensatz zu einer Messdauer von 2 Stunden erhöht werden. Die Monatsmittelwerte für beide Instrumente sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Es sind 13 Graphen für die Datenreihen 2010 bis 2022 mit unterschiedlichen Farben und Symbolen eingezeichnet. Die Unsicherheit besteht aus der Variation der Strahldichten der Tage im Monat. Jeder Graph repräsentiert ein Jahr. In Abb. 5.5a stechen deutlich die Jahre 2011 (rote Dreiecke), 2012 (blaue Dreiecke nach oben zeigend) und 2013 (grüne Dreiecke nach unten zeigend) heraus, da in diesen Jahren das Gesichtsfeld von GRIPS 7 vergrößert wurde. Auch die Jahre 2016 (türkise Dreiecke nach rechts zeigend) und 2017 (braune Hexagone) sind mit Vorsicht zu betrachten, da auch hier das Gesichtsfeld geändert wurde. Die zwei hellsten Sommermaxima wurden im Juni 2010 und Juni 2019 aufgezeichnet. Insgesamt ist auch hier deutlich ein Sommermaximum und zwei Wintermaxima erkennbar. Dasselbe ist auch in Abb. 5.5b für GRIPS 8 dargestellt. Die Wellenlängenverschiebung um 9 Pixel wurde erfolgreich berücksichtigt und es sind keine extremen Ausreißer erkennbar. Die Monate August, September und Oktober 2019 wurden exkludiert. Die zwei hellsten Sommermonate wurden im Mai 2012 und Juni 2019 detektiert, welche die Wintermaxima in der Intensität übertreffen. Ansonsten sind die Wintermaxima intensitätsstärker als die Sommermaxima.

Vor allem bei den niedrigen und sehr hohen Monatsmittelwerten ist zu beachten, aus wie vielen Tagen ein Monatsmittelwert gebildet wurde. Um dies zu berücksichtigen ist in Abbildung 5.6 zu den zugehörigen Monatsmittelwerten die Anzahl an relevanten Tagen eingezeichnet. Betrachtet man die hellsten Sommermaxima im Juni 2010 und Juni 2019 des GRIPS 7, so besteht der Monatsmittelwert vom Juni 2010 aus 6 Tagen und das Maximum vom Juni 2019 aus 3 Tagen. Die Monatsmittelwerte geringer Strahldichte wie zum Beispiel Januar 2010 wurde aus 4 Tagen gebildet, August 2016 aus 6 Tagen bzw. August 2019 dagegen aus 12 Tagen. Für GRIPS 8 besteht der Monatsmittelwert vom Mai 2012 aus 5 Tagen und vom Juni 2019 aus 3 Tagen. Monate mit niedriger Strahldichte sind August 2016, April 2019 und März 2021. Diese bestehen der Reihenfolge nach aus 15, 20 und 16 Tagen.

Für beide Instrumente bestehen die zwei hellsten Sommermaxima aus höchstens 6 Tagen. Im Vergleich zu den restlichen Monaten werden diese Datenpunkte also aus einer relativ geringen Anzahl an Messtagen gebildet. Daher ist die die Aussagekraft dieser hellsten Sommermaxima beschränkt. Die Monatsmittelwerte geringerer Strahldichte bestehen auch teilweise aus mehr als 20 Tagen. Das bedeutet, gerade für die geringen Strahldichten ist das Sortierungsverfahren gut geeignet.

Die meisten Monatsmittelwerte bestehen aus mindestens 10 Tagen. In Abb. 5.5 wurde durch eine schwarze horizontale Linie die 10 Tage Grenze eingezeichnet.



**Abb. 5.5.:** Die Monatsmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind gegenüber des jeweiligen Monats für GRIPS 7 bzw. 8 für eine Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Es sind die Datenreihen von 2010 bis 2022 gezeigt. Bei GRIPS 7 muss berücksichtigt werden, dass in den Jahren 2011, 2012, 2013 sowie 2016 und 2017 das Gesichtsfeld des Geräts geändert wurde. Die ist besonders auffällig bei den hohen Werten von Ende 2011, 2012 bis Mitte/Ende 2013. Beide Instrumente zeigen zwei Winter- und ein Sommermaximum.



**Abb. 5.6.:** In dieser Abbildung ist die Anzahl an Tagen, aus denen die Monatsmittelwerte für die Datenreihen der Jahre 2010 bis 2022 aus Abb. 5.5 gebildet werden, gegeben. Der horizontale Strich grenzt die Monate der Jahren über und unter 10 Tagen pro Monatsmittelwert ab.

#### 5. Messungen und Diskussion der Strahlungsenergieflussdichten

Die Datenreihen der Monatsmittelwerte der einzelnen Jahre aus Abb. 5.5 wurden nicht nur auf Jahresbasis, sondern auch als ein Datensatz für alle Jahre gemittelt. Das Ergebnis ist in Abb. 5.7 gezeigt. Dabei liegen die Strahldichten von GRIPS 7 leicht höher als die von GRIPS 8, da die unterschiedlichen Instrumentenänderungen nicht berücksichtigt wurden. Der Verlauf der zwei Graphen ist ähnlich. Beide weisen ein Sommermaximum im Juni und zwei Wintermaxima im Januar und November auf. Die Monatsmittelwerte folgen dem Verlauf aus Abb. 5.2(a) - zur besseren Übersicht sind dieselben Pfeile eingezeichnet. Der zweite violette Pfeil ist um einen Monat verschoben zu dem Minimum der gemittelten Monatsmittelwerte. Je nach Berechnungsart der 1-Monats-Volumenemissionen von Grygalashvyly et al. (2021) kann die Lage der Minima und Maxima im Jahresverlauf um einen Monat variieren (Mykhaylo Grygalashvyly, persönliche Kommunikation).



**Abb. 5.7.:** Die Monatsmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind gegenüber des jeweiligen Monats für GRIPS 7 bzw. 8 für eine Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Die Monatsmittelwerte setzen sich aus den Tagen im Monat der Jahre 2010-2022 zusammen. Es sind dieselben Pfeile wie in Abb. 5.2 eingetragen.

Neben den einzelnen Datenreihen der Jahre 2010 bis 2022 wurden die Monatsmittelwerte auch im Verlauf der Jahre dargestellt. Für GRIPS 7 sind die Strahldichten des jeweiligen Monats in Abbildung 5.8 eingezeichnet. Die Unsicherheit besteht wieder aus der Variation der Strahldichten der Tage im Monat. Wie in Abbildung 5.3 sind auch hier die Änderungen am Gesichtsfeld aus Abschnitt 3.3 farblich passend gekennzeichnet. Zudem sind alle Monatsmittelwerte, die aus weniger als 10 Tagen bestehen, grau und die ab 10 Tagen schwarz markiert. Vor allem in dem blauen Bereich sind die Strahldichten sehr hoch, was auf das größere Gesichtsfeld zurückzuführen ist. Im violetten Bereich dagegen spiegelt sich das größere Gesichtsfeld nicht in den Intensitäten wieder. Gerade von Beginn der Messung bis 2012 wurden lediglich 7 Monatsmittelwerte aus mehr als 10 Messtagen gebildet. Ab der Kalibrationskampagne 2017 in Verbindung mit der PTB sind die Messungen des GRIPS 7 sehr beständig und die Monatsmittelwerte bestehen, bis auf einen Monat, aus mindestens 10 Tagen. Ab 2019 ist eine Intensitätszunahme der Sommermaxima erkennbar. Nach der Kampagne, sowie für eine Zeit zwischen 2014 und 2015, ist es verlässlich möglich, die beiden GRIPS-Instrumente miteinander zu vergleichen.



**Abb. 5.8.:** Die Monatsmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 für GRIPS 7 mit Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Hellgrau markierte Punkte sind Monatsmittelwerte, die sich aus weniger als 10 Tagen (nach Abb. 5.6a) zusammensetzen. Die Abweichung des Gesichtsfeldes von dem Standardbereich des GRIPS 8 ist farbig markiert. Blau zeigt hier denselben blau markierten Bereich wie in Abb. 3.4. Dasselbe gilt auch für den violetten Bereich.

Die Monatsmittelwerte sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 in Abbildung 5.9 auch für GRIPS 8 dargestellt. Die Unsicherheit setzt sich aus der Variation der Strahldichten der Tage im Monatsverlauf zusammen. Der große pinke und darauffolgende kleine gelbe Bereich deutet wie in Abb. 5.4 die berücksichtigte Wellenlängenverschiebung an. Die Monatsmittelwerte, die aus weniger als 10 Tagen bestehen, sind hellblau und die ab 10 Tagen dunkelblau markiert. Hier ist zu erkennen, dass die Strahldichten vor 2015 eine höhere Intensität aufweisen als die nach 2015. Dies wird nachfolgend mit Jahresmittelwerten noch genauer untersucht. Zudem ist erkennbar, dass ab 2019 die Sommermaxima, ähnlich zu GRIPS 7, in ihrer Intensität zunehmen. Es wurden auch ab 2016 - bis auf zwei Monate nur noch Monatsmittelwerte aus mindestens 10 Tagen gebildet.



**Abb. 5.9.:** Die Monatsmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 für GRIPS 8 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Hellblau markierte Punkte sind Monatsmittelwerte, die sich aus weniger als 10 Tagen (nach Abb. 5.6b) zusammensetzen. Der große pinke und kleine gelbe Bereich weisen auf eine Wellenlängenverschiebung vor der Kalibration der PTB 2017 hin. Bei der Berechnung der Strahldichten wurde die Verschiebung um 9 Pixel berücksichtigt.

### 5.2. Langzeitentwicklung

Abbildung 5.10 zeigt die Jahresmittelwerte der Strahldichten des GRIPS 8 der Jahre 2011 bis 2022 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden. Da 2010 nur für drei Monate gemessen wurde, wurde dieses Jahr bei den Jahresmittelwerten exkludiert. In den hellblau markierten Jahren 2014 und 2019 wurden Messungen aufgrund von fehlerhaften Daten nicht mit beachtet. Die Unsicherheit setzt sich aus der Variation der Strahldichten jedes Tages im Jahr zusammen. Dasselbe ist für GRIPS 7 im Anhang in Abb. A.7 dargestellt. Da bei diesem Instrument viele Änderungen stattfanden, sind viele Jahreswerte ausgegraut.

Die Hydroxyl (OH) Strahlungsenergieflussdichte aus der Mesosphäre ist bekannt dafür, dass sie empfindlich auf Veränderungen in der solaren Aktivität reagiert (Li et al., 2022). Die solare Aktivität variiert aufgrund von Schwankungen in den Fusionsprozessen und dem Magnetfeld der Sonne, die sich im Laufe der Zeit ändern. Die solare Aktivität hat eine direkte Wirkung auf die Atmosphäre der Erde, insbesondere auf die obere Atmosphäre. Man spricht hier vom Strahlungsantrieb. Bei höherer Sonnenaktivität wird mehr Energie und Materie in Form von Partikeln und Strahlung in die obere Atmosphäre abgegeben. Daher gibt es eine positive Korrelation zwischen der solaren Aktivität und der OH-Strahlungsenergieflussdichte aus der Mesosphäre. Dies bedeutet, dass in Zeiten hoher



**Abb. 5.10.:** Die Jahresmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2011 bis 2022 für GRIPS 8 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Zusätzlich ist die solare Einstrahlung (F10,4 cm in solar flux units, *Goddard Space Flight Center / Space Physics Data Facility* 2023) im Verlauf derselben Jahre mit eingetragen. Die hellblau markierten Jahresmittel 2014 und 2019 deuten darauf hin, dass in diesen Jahren einige Messungen aufgrund von fehlerhaften Daten ausgeschlossen wurden. Die Senkung der Jahresmittelwerte ab 2015/2016 fällt mit der Verringerung der solaren Einstrahlung zusammen. Die exakten Jahresmittelwerte sind in Tab. A.1 gegeben.

solarer Aktivität die OH-Strahlungsenergieflussdichte aus der Mesosphäre tendenziell höher ist, als in Zeiten geringerer solarer Aktivität (Li et al., 2022).

Betrachtet man die Jahresmittelwerte im Vergleich mit der solaren Einstrahlung in Abb. 5.10, so korreliert der langfristige Verlauf der OH-Strahldichte offenbar mit der Änderung der solaren Einstrahlung. Erkennbar ist dies an den bis Ende 2015 erhöhten Werten, die mit dem Ende des Maximums des solaren Zyklus 24 zusammenfallen. Insgesamt folgen die beobachteten Jahresmittelwerte im Rahmen der Unsicherheit dem Verlauf der solaren Einstrahlung linear (siehe im Anhang Abb. A.8).

Ein genauer Zusammenhang zwischen solarer Einstrahlung und relativer OH-Intensität ist beispielsweise in Noll et al. (2017) gegeben. Hier wird beschrieben, dass der Einfluss der solaren Einstrahlung pro 100 sfu zu einer Erhöhung der relativen OH-Intensität um 15,6 bis 16,6 % führt. Diese Messungen wurden am *Cerro Paranal* in Chile durchgeführt. In Gao et al. (2016) wurde eine Erhöhung der OH-Intensität pro 100 sfu von ca. 13,3 % festgestellt. Diese Daten beruhen auf gemittelten Satellitenmessungen. In der Messung mit GRIPS 8 wurde eine Erhöhung um 20  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> pro 100 sfu identifiziert (siehe im Anhang Abb. A.8). Im Vergleich zu der Literatur liegt der relative Anstieg mit ca. 32 % also deutlich höher. In der Literatur wird sich auf den solaren Zyklus 23 beschränkt, während hier der aktuelle solare Zyklus 24 verwendet wird. Zudem ist der zeitliche und örtliche Rahmen der Messungen unterschiedlich. Eine deutliche Erhöhung im Vergleich zu der Literatur pro 100 sfu lässt sich an der UFS aber auch in den Rotationstemperaturen identifizieren (ca. 50 % stärker als bei vergleichbaren Stationen, Carsten Schmidt, persönliche Kommunikation).

Es ist jedoch zu beachten, dass die Korrelation zwischen der solaren Aktivität und der OH-Strahlungsenergieflussdichte aus der Mesosphäre nicht notwendigerweise linear ist und von vielen Faktoren abhängt. Es kann auch lokale Effekte in der Mesosphäre geben, die die Beziehung zwischen der solaren Aktivität und der OH-Strahlungsenergieflussdichte beeinflussen.

## 5.3. Vergleich der beiden Instrumente

In Abbildung 5.11 sind die Strahldichten der beiden Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 der Jahre 2010 bis 2022 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden gegeneinander aufgetragen. Es wurden nur die Daten berücksichtigt, die das gleiche Gesichtsfeld haben und keine fehlerhaften Messungen in den Daten auftraten. Durch die schwarzen Symbole (Strahldichten) ist ein linearer Fit - dargestellt als durchgezogene gelbe Linie - eingezeichnet. Des Weiteren ist die Winkelhalbierende blau aufgetragen. Die Fehlerbalken sind nur auf den größten Unsicherheitsfaktor - die geophysikalische Unsicherheit - zurückzuführen. Dasselbe ist für eine Mindestmessdauer von 2 Stunden im Anhang Abb. A.9 gezeigt, wobei sich die Steigung des gelben linearen Fits nicht in den angegebenen gültigen Ziffern ändert. Ein Qualitätsmerkmal für die Konvergenz von Fits ist der R-Quadrat Wert  $R^2$  (Weisberg, 2005):

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}},$$
(5.1)

dabei sind  $y_i$  die *n* beobachteten Datenpunkte,  $\hat{y}_i$  die vom Fit gelieferten Werte und  $\bar{y}$  der Durchschnitt aller Datenpunkte.  $R^2$  nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, ein Wert nahe 1 entspricht einem qualitativ hochwertigen Fit. Der lineare gelbe Fit weist eine Steigung von 1,03 mit einem R-Quadrat von 0,960 auf. Die Gleichung lautet:

$$I_{\rm G8} = 1,03 \cdot I_{\rm G7} - 0,9 \,\mu \rm W \, m^{-2} \, \rm sr^{-1}. \tag{5.2}$$

Die blaue Winkelhalbierende mit der auf 1 gesetzten Steigung weißt ein R-Quadrat von 0,958 auf:

$$I_{\rm G8} = 1 \cdot I_{\rm G7} \tag{5.3}$$

Vor allem für Strahldichten von 40 bis 80  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> ist die Streuung der Werte um beide Linien am größten. Zudem ist die geophysikalische Unsicherheit ein entscheidender Faktor. Der mit dem Auge erkennbare Unterschied zwischen den beiden Linien ist sehr



**Abb. 5.11.:** Die Strahldichten der beiden Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 der Jahre 2010 bis 2022 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden sind gegeneinander als Scatterplot aufgetragen. Durch die schwarzen Symbole (Strahldichten) ist ein linearer Fit - dargestellt als durchgezogene gelbe Linie - und zusätzlich ein weiterer Fit mit einer festen Steigung von 1 - blau gestrichelt - mit eingezeichnet. Die Fehlerbalken sind nur auf die geophysikalische Unsicherheit zurückzuführen. Hierbei wurden nur die Daten berücksichtigt, welche das gleiche Gesichtsfeld haben und keine fehlerhaften Messungen in den Daten auftraten.

gering. Auch der Vergleich mithilfe der R-Quadrat Werte zeigt nur einen Unterschied in der dritten gültigen Stelle. Dies zeigt, dass durch beide Fits die Daten annähernd gleich gut beschrieben werden. Im Vergleich zu den absoluten Strahldichten ist für den Fit aus Gl. (5.2) die konstante Verschiebung vernachlässigbar. Wird die Steigung als Parameter optimiert, liegt das Ergebnis mit 1,03 nahe an einer Steigung von 1. Dies würde einer exakten Übereinstimmung beider Geräte entsprechen. Würde sich ein Effekt nur auf die Messergebnisse eines Instruments auswirken, würde dies zu einer Verschiebung in dieser Analyse führen. Die Abwesenheit eines solchen Effektes weist auf keinen unterschiedlichen Drift der beiden Geräte hin. Sie erlaubt jedoch keine Aussage über Effekte, die für beide Instrumente gelten, beispielsweise die Alterung der Komponenten oder die Schwankung der Raumtemperatur.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei Berücksichtigung aller messtechnischen Unterschiede der Geräte, die Strahldichten der beiden Instrumente sehr gut zusammenpassen, was bei der Betrachtung der einzelnen Spektren noch nicht ersichtlich war. Dies unterstreicht erneut die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze. Außerdem ist der geringe Drift zwischen den Instrumenten ein Indikator für eine weiterhin gegebene Anwendbarkeit der ursprünglichen Kalibration der PTB. Eine weitere Kalibration könnte dies verifizieren.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Daten des GRIPS 7 und GRIPS 8 analysiert und existierende Kalibrationen der PTB auf bestehende Messungen des atmosphärischen OH-Leuchtens angewendet.

Bei der Wellenlängenkalibration wurde die bisher genutzte lineare Wellenlängeninterpolation mit zwei neu definierten, quadratischen Interpolationen verglichen. Aufgrund einer ausführlichen Untersuchung wurde die quadratische Wellenlängeninterpolation basierend auf sechs Stützpunkten für die zukünftige Datenverarbeitung ausgewählt.

Bisher wurden aus den bestehenden Messdaten für lange Zeiträume nur Zeitreihen der Rotationstemperaturen gewonnen. Ziel dieser Arbeit war es, Zeitreihen absoluter Strahlungsenergieflussdichten zu erhalten. Um diese Auswertung auszuführen, wird sowohl der gemessene Dunkelstrom des Detektors als auch die verbliebene Untergrundhelligkeit bestimmt und abgezogen. Zusätzlich werden kontaminierte, d.h. durch Wolken, Mond oder generell, gestörte Spektren entfernt und eine Unsicherheitsabschätzung durchgeführt.

Die Bestimmung und der Abzug des gemessenen Dunkelstroms waren zu Beginn dieser Arbeit bereits gelöst. Dabei fiel auf, dass trotz dieser Operation das Spektrum nicht vollständig von Untergrund bereinigt werden konnte. Um diesen Untergrund zu quantifizieren, wurden geeignete Minima im Spektrum identifiziert. Über den nächtlichen Intensitätsverlauf der Minima und Maxima konnte das Gerät als Quelle des Untergrunds ausgeschlossen werden. Der restliche Untergrund scheint auf eine diffuse Resthelligkeit am Nachthimmel zurückzuführen zu sein. Bei diesen Untersuchungen wurde der Einfluss von Wolken auf das Messsignal gezielt genutzt und es zeigte sich, dass dieser Untergrund bei starker Bewölkung auch zurückgeht.

Mit den ausgewählten fünf Minima wurde ein potentiell spektral konstanter (Mittelwert) und ein linear von der Wellenlänge abhängiger Untergrund angenommen. Um die Qualität der Untergrundbestimmung zu verifizieren, wurden Spektren abschnittsweise bzw. vollständig integriert. Dabei konnten im Mittel keine signifikanten Unterschiede der beiden Methoden festgestellt werden. Betrachtet man allerdings das Intensitätsverhältnis der bekannten Q(3-1)- und Q(4-2)-Zweige, weist der Ansatz eines (spektral) konstanten Untergrunds ein geringeres Rauschen auf - sowohl im Vergleich zur linearen Methode als auch zur vorherigen Prozessierung.

#### 6. Zusammenfassung und Ausblick

Ein zentraler Aspekt der spektralen Analyse ist die Qualitätssicherung der Daten. Um gezielt kontaminierte Spektren auszuschließen, wurden Marker eingeführt. Diese entschieden über eine spätere Verwertung jedes einzelnen Spektrums. Sowohl die Höhe des Untergrunds als auch das Intensitätsverhältnis der Q-Zweige werden als Kriterien in Form separater Flaglisten abgebildet. Außerdem konnte ein Metakriterium eingeführt werden - eine Mindestanzahl konsekutiver gesetzter Flags. Dies verbessert die Identifikation gestörter Spektren bei schnell variierender Bewölkung wesentlich.

Die Unsicherheit der beobachteten Intensitäten kann in zwei Kategorien eingeteilt werden: Die technische Unsicherheit umfasst die Messung des Signals sowie die Bestimmung des Untergrunds und die Kalibrierung der Daten, wie durch die Fenstertransmission und die Intensitätskalibration der PTB. Die Unsicherheiten der Kalibrationen wurden durch die PTB bestimmt. Die Unsicherheit aufgrund der Messung des Signals und der Bestimmung des Untergrunds werden für jedes Spektrum einzeln bestimmt. Die technische Unsicherheit liegt bei der Mehrheit der Spektren unter 5 %.

Der zweite Bereich ist die geophysikalische Unsicherheit, die sich aus dem nächtlichen Verlauf der Strahldichten ergibt. Für die weitere Auswertung ist es zweckmäßig, den nächtlichen Intensitätsverlauf in einem Mittelwert abzubilden. Anhand dieses Mittelwerts ist jedoch keine Aussage über die nächtliche Variation der Strahldichten möglich. Um die Auswirkungen der atmosphärischen Dynamik dennoch zu berücksichtigen, wird bei der Berechnung des Mittelwerts der Intensitäten auch die Standardabweichung  $\sigma$ gebildet. Diese quantifiziert die Variation der Strahldichten über den Verlauf der Nacht. Die Standardabweichung kann somit auch als geophysikalische Unsicherheit angesehen werden, die für den überwiegenden Teil der Gesamtunsicherheit verantwortlich ist. Sie schwankt zwischen Werten von 10 % bis 40 % je nach Variabilität in der Nacht.

Mit diesen Analysemethoden konnte der Datensatz der beiden untersuchten GRIPS-Instrumente über die bisherige Betriebsdauer betrachtet werden. Als Kriterium für eine Weiterverarbeitung wurde eine nächtliche Mindestmessdauer festgelegt, die auch mit Literaturwerten verglichen wurde. In den so gewonnenen Zeitreihen der Intensitäten konnten jahreszeitliche Maxima und Minima identifiziert werden. In allen betrachteten Jahren wurden ein bis zwei (bzw. ein sehr langes) Wintermaxima und ein Sommermaximum beobachtet. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in aktuellen OH-Emissionsmodellen wieder.

Mit ähnlichen Methoden wurden Zeitreihen der Monatsmittelwerte genauer untersucht. Diese zeigen ebenfalls den durch das Modell prognostizierten Halbjahres- und Jahresgang. Gleichzeit fällt auf, dass ab dem Jahr 2015 ein Rückgang in den Intensitäten auftritt. Um dies auf Jahresbasis zu quantifizieren, wurden auch Jahresmittelwerte gebildet. Der Kausalzusammenhang zwischen solarer Einstrahlung und OH-Strahlungsenergieflussdichte legt die Hypothese einer Beeinflussung letzterer durch den solaren Zyklus nahe. Diese Vermutung konnte anhand eines Vergleichs der Strahlungsenergieflussdichten mit der solaren Einstrahlung bestätigt werden.

Um die Qualität der Messdaten der beiden Instrumente zu verifizieren, wurden die in Zeiten identischer Konfiguration aufgezeichneten mittleren nächtlichen Strahldichten verglichen. Die gute Übereinstimmung beider Instrumente lässt auf eine hohe Datenqualität schließen. Andererseits kann durch diese Untersuchung ein unterschiedliches Driftverhalten der beiden Geräte ausgeschlossen werden.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren wurden an einem Datensatz von 2010 bis 2022 getestet und sollen zukünftig automatisiert auf alle neuen Messungen angewendet werden. In Zukunft könnten diese Ergebnisse über weitere Kalibrationskampagnen verifiziert werden. Der Zusammenhang zwischen Strahlungsenergieflussdichte und Konzentration des atomaren Sauerstoffs kann nun untersucht werden. Zusätzlich könnte der Anstieg der Variabilität bei hohen Intensitäten, die oftmals von starker Dynamik geprägt sind, untersucht werden. Zudem bedarf es noch der Klärung, ob sich ein Trend abzeichnet. Dafür muss die solare Einstrahlung bei der Berechnung der Strahldichten präziser berücksichtigt werden, als es im Rahmen dieser Arbeit möglich war. Abschließend könnte eine alternative Metrik zum arithmetischen Mittelwert bei der Beschreibung der Intensität einer Nacht gewählt werden.
### Anhang

#### A. Abbildungen und Tabellen



**Abb. A.1.:** Typische Transmission des im Filterrad der GRIPS-Instrumente verbauten Langpassfilters. Die Grenzwellenlänge  $\lambda_{grenz}$  beträgt 1200 nm. Für das aufgenommene Signal ist der Bereich von 1500 nm bis 1600 nm interessant. Die hier gezeigten Daten stammen aus dem Datenblatt des Herstellers zum aktuellen Produkt (siehe Spectrogon, 2021).

					Pears	son Korre	elationsko	effizient:	GRIPS_7	202204_	2829					
	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Minimum 4	Minimum 5	Minimum 6	Minimum 7	Minimum 8	Minimum 9	Minimum 10 N	linimum 11	Maximum 1	Maximum 2	Maximum 3	Maximum 4	Maximum {
Minimum 1	1,0	-0,38	-0,28	-0,02	-0,02	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05	-0,3	-0,13	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
Minimum 2	-0,38	1,0	-0,43	0,2	0,12	-0,07	0,03	0,13	-0,15	-0,31	-0,08	0,22	0,22	0,2	0,21	0,21
Minimum 3	-0,28	-0,43	1,0	-0,33	-0,28	-0,1	-0,19	-0,29	0,12	-0,15	-0,19	-0,34	-0,34	-0,34	-0,34	-0,35
Minimum 4	-0,02	0,2	-0,33	1,0	0,62	0,28	0,53	0,78	-0,37	-0,13	0,47	0,98	0,98	0,96	0,97	0,97
Minimum 5	-0,02	0,12	-0,28	0,62	1,0	0,33	0,45	0,58	-0,06	-0,0	0,32	0,63	0,63	0,67	0,65	0,66
Minimum 6	-0,06	-0,07	-0,1	0,28	0,33	1,0	0,48	0,38	-0,02	0,13	0,26	0,27	0,27	0,36	0,31	0,31
Minimum 7	-0,07	0,03	-0,19	0,53	0,45	0,48	1,0	0,57	-0,18	0,08	0,35	0,53	0,52	0,61	0,57	0,57
Minimum 8	-0,06	0,13	-0,29	0,78	0,58	0,38	0,57	1,0	-0,18	0,0	0,41	0,79	0,79	0,82	0,81	0,81
Minimum 9	-0,05	-0,15	0,12	-0,37	-0,06	-0,02	-0,18	-0,18	1,0	0,17	-0,1	-0,4	-0,4	-0,39	-0,41	-0,36
Minimum 10	-0,3	-0,31	-0,15	-0,13	-0,0	0,13	0,08	0,0	0,17	1,0	-0,08	-0,14	-0,14	-0,1	-0,12	-0,11
Minimum 11	-0,13	-0,08	-0,19	0,47	0,32	0,26	0,35	0,41	-0,1	-0,08	1,0	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45
Maximum 1	-0,01	0,22	-0,34	0,98	0,63	0,27	0,53	0,79	-0,4	-0,14	0,46	1,0	1,0	0,98	0,99	0,96
Maximum 2	-0,01	0,22	-0,34	0,98	0,63	0,27	0,52	0,79	-0,4	-0,14	0,46	1,0	1,0	0,97	0,99	0,96
Maximum 3	-0,02	0,2	-0,34	0,96	0,67	0,36	0,61	0,82	-0,39	-0,1	0,46	0,98	0,97	1,0	0,99	0,96
Maximum 4	-0,02	0,21	-0,34	0,97	0,65	0,31	0,57	0,81	-0,41	-0,12	0,46	0,99	0,99	0,99	1,0	1,0
Maximum 5	-0,02	0,21	-0,35	0,97	0,66	0,31	0,57	0,81	-0,39	-0,11	0,45	0,99	0,99	0,99	1,0	1,0

# **Abb. A.2.:** Tabelle des Pearson Korrelationskoeffizienten des GRIPS 7 für die 16 Extrema der Nacht vom 28. auf den 29.04.2022. Neben der hohen Korrelationswerte der Peaks untereinander (blau schraffierter Bereich), zeigt sich die erwartete Korrelation mit den Flankenpositionen Minimum 4 und 5 (pink schraffierter Bereich), aber auch mit Minimum 8, sowie in Ansätzen auch mit 7 und 11, die damit offensichtlich auch Airglow-Anteile enthalten.

					Pears	son Korre	lationsko	effizient:	GRIPS_6	3_201707_	2021					
	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Minimum 4	Minimum 5	Minimum 6	Minimum 7	Minimum 8	Ainimum 9	Ainimum 10 M	inimum 11 N	1aximum 1	1aximum 2 M	laximum 3	Maximum 4	Maximum 5
Minimum 1	1,0	0,26	-0,73	-0,31	-0,01	-0,58	-0,63	-0,62	-0,65	-0,14	-0,63	0,13	0,11	0,07	0,1	0,08
Minimum 2	0,26	1,0	-0,63	-0,09	0,21	-0,46	-0,44	-0,5	-0,52	-0,21	-0,53	0,32	0,3	0,26	0,3	0,28
Minimum 3	-0,73	-0,63	1,0	0,3	-0,02	0,6	0,65	0,64	0,69	-0,23	0,58	-0,17	-0,14	-0,1	-0,13	-0,12
Minimum 4	-0,31	-0,09	0,3	1,0	0,73	0,51	0,63	0,38	0,49	-0,26	0,43	0,65	0,67	0,69	0,67	0,68
Minimum 5	-0,01	0,21	-0,02	0,73	1,0	0,22	0,35	0,02	0,13	-0,3	0,09	0,97	0,97	0,98	0,97	0,98
Minimum 6	-0,58	9-0,46	0,6	0,51	0,22	1,0	0,78	0,7	0,77	-0,08	0,69	0,06	0,09	0,14	0,1	0,12
Minimum 7	-0,63	-0,44	0,65	0,63	0,35	0,78	1,0	0,75	0,84	-0,16	0,74	0,18	0,21	0,27	0,22	0,24
Minimum 8	-0,62	-0,5	0,64	0,38	0,02	0,7	0,75	1,0	0,78	-0,04	0,69	-0,14	-0,11	-0,06	-0,11	-0,08
Minimum 9	-0,65	-0,52	0,69	0,49	0,13	0,77	0,84	0,78	1,0	-0,09	0,76	-0,04	-0,01	0,05	-0,0	0,02
Minimum 10	-0,14	-0,21	-0,23	-0,26	-0,3	-0,08	-0,16	-0,04	-0,09	1,0	-0,12	-0,29	-0,29	-0,29	-0,29	-0,28
Minimum 11	-0,63	-0,53	0,58	0,43	0,09	0,69	0,74	0,69	0,76	-0,12	1,0	-0,07	-0,04	0,01	-0,04	-0,01
Maximum 1	0,13	0,32	-0,17	0,65	0,97	0,06	0,18	-0,14	-0,04	-0,29	-0,07	1,0	1,0	0,99	1,0	0,99
Maximum 2	0,11	0,3	-0,14	0,67	0,97	0,09	0,21	-0,11	-0,01	-0,29	-0,04	1,0	1,0	0,99	1,0	1,0
Maximum 3	0,07	0,26	-0,1	0,69	0,98	0,14	0,27	-0,06	0,05	-0,29	0,01	0,99	0,99	1,0	0,99	0,99
Maximum 4	0,1	0,3	-0,13	0,67	0,97	0,1	0,22	-0,11	-0,0	-0,29	-0,04	1,0	1,0	0,99	1,0	1,0
Maximum 5	0,08	9,28	-0,12	0,68	0,98	0,12	0,24	-0,08	0,02	-0,28	-0,01	0,99	1,0	0,99	1,0	1,0

**Abb. A.3.:** Tabelle des Pearson Korrelationskoeffizienten des GRIPS 8 für die 16 Extrema der Nacht vom 20. auf den 21.07.2017. Die Korrelationskoeffizienten der bewölkten Nacht zeigen ein anderes Verhalten als bei der klaren Nacht. Insbesondere die Korrelation der Minima 3, 6, 7, 8, 9, 11 ist deutlich höher als im unbewölkten Fall, d.h. dass die Quelle der an diesen Positionen bestimmter Untergrundwerte am Nachthimmel und nicht etwa im Instrument liegt.

					Pears	on Korrel	ationsko	effizient:	GRIPS_7	_201707_	2021					
	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Minimum 4	Minimum 5	Ainimum 6	Ainimum 7	Ainimum 8	Ainimum 9 N	linimum 10 M	inimum 11 N	laximum 1	Maximum 2	Aaximum 3	1aximum 4 N	laximum 5
Minimum 1	1,0	-0,26	-0,28	-0,16	-0,15	-0,24	-0,23	-0,23	-0,26	-0,35	-0,24	-0,13	-0,14	-0,14	-0,14	-0,16
Minimum 2	-0,26	1,0	-0,4	0,17	0,17	-0,06	-0,12	0,01	-0,26	-0,43	-0,07	0,19	0,19	0,18	0,19	0,17
Minimum 3	-0,28	-0,4	1,0	-0,27	-0,26	-0,05	-0,04	-0,14	0,12	-0,12	-0,2	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27
Minimum 4	-0,16	0,17	-0,27	1,0	0,98	0,53	0,51	0,77	-0,0	-0,12	0,63	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
Minimum 5	-0,15	0,17	-0,26	0,98	1,0	0,51	0,51	0,76	-0,03	-0,15	0,63	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98
Minimum 6	-0,24	-0,06	-0,05	0,53	0,51	1,0	0,55	0,58	0,35	0,09	0,49	0,49	0,5	0,52	0,5	0,53
Minimum 7	-0,23	-0,12	-0,04	0,51	0,51	0,55	1,0	0,61	0,42	0,12	0,52	0,48	0,49	0,5	0,49	0,52
Minimum 8	-0,23	0,01	-0,14	0,77	0,76	0,58	0,61	1,0	0,28	0,03	0,61	0,75	0,76	0,76	0,76	0,78
Minimum 9	-0,26	-0,26	0,12	-0,0	-0,03	0,35	0,42	0,28	1,0	0,33	0,21	-0,06	-0,04	-0,03	-0,05	-0,0
Minimum 10	-0,35	-0,43	-0,12	-0,12	-0,15	0,09	0,12	0,03	0,33	1,0	-0,04	-0,16	-0,15	-0,14	-0,15	-0,12
Minimum 11	-0,24	-0,07	-0,2	0,63	0,63	0,49	0,52	0,61	0,21	-0,04	1,0	0,61	0,62	0,62	0,61	0,62
Maximum 1	-0,13	0,19	-0,27	0,99	0,99	0,49	0,48	0,75	-0,06	-0,16	0,61	1,0	1,0	0,99	1,0	0,99
Maximum 2	-0,14	0,19	-0,27	0,99	0,99	0,5	0,49	0,76	-0,04	-0,15	0,62	1,0	1,0	0,99	1,0	1,0
Maximum 3	-0,14	0,18	-0,27	0,98	0,98	0,52	0,5	0,76	-0,03	-0,14	0,62	0,99	0,99	1,0	0,99	0,99
Maximum 4	-0,14	0,19	-0,27	0,99	0,99	0,5	0,49	0,76	-0,05	-0,15	0,61	1,0	1,0	0,99	1,0	1,0
Maximum 5	-0,16	0,17	-0,27	0,99	0,98	0,53	0,52	0,78	-0,0	-0,12	0,62	0,99	1,0	0,99	1,0	1,0

# **Abb. A.4.:** Tabelle des Pearson Korrelationskoeffizienten des GRIPS 7 für die 16 Extrema der Nacht vom 20. auf den 21.07.2017, ähnlich zu Abb. A.3. Die Korrelation der Minima mit den Maxima bleibt niedrig, untereinander sind die Minima bei Bewölkung aber stärker korreliert. Die Interpretation ist dadurch erschwert, dass auch die Absorption durch Wasserdampf und Wolken eine spektrale Abhängigkeit aufweist.





**Abb. A.5.:** Die Unsicherheiten der Strahldichten sind im Verlauf des Jahres 2018 mit einer Mindestmesszeit von 2 Stunden dargestellt. Die schwarzen Symbole stellen die technische Unsicherheit und die blauen die geophysikalische Unsicherheit dar.



**Abb. A.6.:** Die Unsicherheiten der Strahldichten sind im Verlauf des Jahres 2018 mit einer Mindestmesszeit von 4 Stunden dargestellt. Die schwarzen Symbole stellen die technische Unsicherheit und die blauen die geophysikalische Unsicherheit dar.



**Abb. A.7.:** Die Jahresmittelwerte der Strahldichten des OH-Moleküls sind im Verlauf der Jahre 2010 bis 2022 für GRIPS 7 mit Mindestmessdauer von 4 Stunden dargestellt. Zusätzlich ist die solare Einstrahlung (Solar Flux, *Goddard Space Flight Center / Space Physics Data Facility* 2023) im Verlauf derselben Jahre mit eingetragen. Die grau markierten Jahresmittel deuten darauf hin, dass im Verlauf des Jahres Instrumentänderungen auftraten und deshalb die Jahresmittelwerte mit Vorsicht zu behandeln sind. Die exakten Jahresmittelwerte sind in Tab. A.1 gegeben.



**Abb. A.8.:** Die solare Einstrahlung ist gegenüber den Jahresmittelwerten der Strahldichten des GRIPS 8 der Jahre 2010 bis 2022 mit einer Mindestmessdauer von 4 Stunden als Scatterplot aufgetragen. Die Jahre 2014 und 2019 wurden dabei exkludiert. Durch die blauen Symbole (Strahldichten) ist ein linearer Fit - dargestellt als durchgezogene schwarze Linie mit einer Steigung von 0,204 - eingezeichnet. Dadurch ergibt sich eine Erhöhung um ca. 20  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> pro 100 sfu. Die genaue Gleichung für den linearen Fit mit Unsicherheit lautet:  $L = (0,204 \pm 0,027) \cdot F10,7 + (49,08 \pm 2,83)$ .

Jahr	Strahldichte GRIPS 8	Unsicherheit GRIPS 8	Strahldichte GRIPS 7	Unsicherheit GRIPS 7
2010			70,971	16,205
2011	74,481	12,235	80,987	24,615
2012	76,949	12,964	96,428	21,114
2013	74,835	15,688	81,125	19,568
2014	79,165	14,992	72,085	14,605
2015	71,472	13,471	69,820	11,798
2016	66,576	18,366	64,893	15,644
2017	62,138	11,512	61,322	10,456
2018	63,769	14,303	66,018	14,396
2019	62,838	16,895	66,123	14,628
2020	67,210	15,614	65,791	14,886
2021	64,801	15,880	63,745	15,124
2022	70,267	18,642	69,689	17,693

**Tabelle A.1.:** Die Jahresmittelwerten der Strahldichten des GRIPS 7 und GRIPS 8 aus Abb. A.7 und 5.10 sind in der Tabelle mit Unsicherheit in der Einheit  $\mu$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> eingetragen.



**Abb. A.9.:** Die Strahldichten der beiden Instrumente GRIPS 7 und GRIPS 8 der Jahre 2010 bis 2022 mit einer Mindestmessdauer von 2 Stunden sind gegenüber als Scatterplot aufgetragen. Durch die schwarzen Symbole (Strahldichten) ist ein linearer Fit - dargestellt als durchgezogene gelbe Linie mit einer Steigung von 1,03 und einem R-Quadrat von 0,958 - eingezeichnet. Zudem ist ein linearer Fit mit einer konstanten Steigung von 1 gegeben. Die Fehlerbalken sind nur auf die geophysikalische Unsicherheit zurückzuführen. Hierbei wurden nur die Daten berücksichtigt, welche das gleiche Gesichtsfeld haben und die keine fehlerhaften Messungen in den Daten aufwiesen.

#### Literaturverzeichnis

- Amiri, I. S. et al. (2019). "Temperature Effects on Characteristics and Performance of Near-Infrared Wide Bandwidth for Different Avalanche Photodiodes Structures". In: *Results in Physics* 14, S. 102399. ISSN: 2211-3797. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102399.
- Baker, Doran J. (1974). "Rayleigh, the Unit for Light Radiance". In: *Applied Optics* 13.9, S. 2160–2163. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/A0.13.002160.
- Baker, Doran J. und Gerald J. Romick (1976). "The Rayleigh: Interpretation of the Unit in Terms of Column Emission Rate or Apparent Radiance Expressed in SI Units". In: *Applied Optics* 15.8, S. 1966. ISSN: 0003-6935, 1539-4522. DOI: 10.1364/AD.15.001966.
- Baker, Doran J. und A. T. Stair (1988). "Rocket Measurements of the Altitude Distributions of the Hydroxyl Airglow". In: *Physica Scripta* 37.4, S. 611–622. ISSN: 1402-4896. DOI: 10.1088/0031-8949/37/4/021.
- Bates, D. R. und M. Nicolet (1950). "The Photochemistry of Atmospheric Water Vapor". In: DOI: 10.1029/JZ055I003P00301.
- Du, P., W. A. Kibbe und S. M. Lin (2006). "Improved Peak Detection in Mass Spectrum by Incorporating Continuous Wavelet Transform-Based Pattern Matching". In: *Bioinformatics* 22.17, S. 2059–2065. ISSN: 1367-4803, 1460-2059. DOI: 10.1093/bioinformatics/ bt1355.
- Gao, Hong, Jiyao Xu und Guang-Ming Chen (2016). "The Responses of the Nightglow Emissions Observed by the TIMED/SABER Satellite to Solar Radiation". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 121.2, S. 1627–1642. ISSN: 2169-9402. DOI: 10.1002/2015JA021624.
- Goddard Space Flight Center / Space Physics Data Facility (2023). GSFC/SPDF OMNIWeb interface. uRL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov (besucht am 16.01.2023).
- Grygalashvyly, M. et al. (2021). "Semi-Annual Variation of Excited Hydroxyl Emission at Mid-Latitudes". In: *Annales Geophysicae* 39.1, S. 255–265. ISSN: 1432-0576. DOI: 10. 5194/angeo-39-255-2021.

- Humphreys, C. J. (1953). "The First Spectrum of Mercury in the Region between 1.3 and 2.0 Micrometers". In: DOI: 10.1364/JOSA.43.001027.
- Lange, G. (1982). Messung Der Infrarotemissionen von OH\* Und O2 in Der Mesosphäre.
- Leinert, Ch. et al. (1998). "The 1997 Reference of Diffuse Night Sky Brightness". In: 127. DOI: 10.1051/aas:1998105.
- Li, Anqi et al. (1. März 2022). "11-Year Solar Cycle Influence on OH (3-1) Nightglow Observed by OSIRIS". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 229, S. 105831. ISSN: 1364-6826. DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105831.
- MacDougal, Michael et al. (2009). "Low Dark Current InGaAs Detector Arrays for Night Vision and Astronomy". In: *Infrared Technology and Applications XXXV*. Infrared Technology and Applications XXXV. Bd. 7298. SPIE, S. 1286–1295. DOI: 10.1117/12.820377.
- Meinel, A. B. (1948). "The Near-Infrared Spectrum of the Night Sky and Aurora". In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 60.357, S. 373–378. ISSN: 0004-6280.
- Nishiyama, Takanori et al. (Dez. 2021). "Temporal Evolutions of N2+ Meinel (1,2) Band near 1.5 Mm Associated with Aurora Breakup and Their Effects on Mesopause Temperature Estimations from OH Meinel (3,1) Band". In: *Earth, Planets and Space* 73.1 (1), S. 1–12. ISSN: 1880-5981. DOI: 10.1186/s40623-021-01360-0.
- Noll, S. et al. (2012). "An Atmospheric Radiation Model for Cerro Paranal I. The Optical Spectral Range". In: *Astronomy & Astrophysics* 543, A92. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201219040.
- Noll, Stefan et al. (2017). "15 Years of VLT/UVES OH Intensities and Temperatures in Comparison with TIMED/SABER Data". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. ISSN: 13646826. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.05.012.
- Oxford Instruments (2022). *iDus 1.7µm InGaAs Andor*. URL: https://andor.oxinst. com/products/idus-spectroscopy-cameras/idus-1-7-ingaas (besucht am 20.06.2022).
- Pearsall, T. und R. Hopson (1977). "Growth and Characterization of Lattice-Matched Epitaxial Films of GaxIn1-xAs/InP by Liquid-phase Epitaxy". In: DOI: 10.1063/1. 323399.

- Rayleigh, Lord (1930). "Absolute Intensity of the Aurora Line in the Night Sky, and the Number of Atomic Transitions Required to Maintain It". In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 129.811, S. 458–467. ISSN: 0950-1207.
- Rodgers, Joseph Lee und W. Alan Nicewander (1988). "Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient". In: *The American Statistician* 42.1, S. 59–66. ISSN: 0003-1305. DOI: 10.2307/2685263.
- Rousselot, Philippe et al. (2000). "Night-Sky Spectral Atlas of OH Emission Lines in the near-Infrared". In: *Astronomy and Astrophysics* 354, S. 1134–1150.
- Savitzky, Abraham. und M. J. E. Golay (1964). "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures." In: *Analytical Chemistry* 36.8, S. 1627–1639. ISSN: 0003-2700. DOI: 10.1021/ac60214a047.
- Schmidt, Carsten (2016). "Entwicklung Eines Bodengebundenen Infrarotspektrometers Für Die Zeitlich Hochaufgelöste Beobachtung Des OH-Leuchtens Aus Der Mesopausenregion."
- Schmidt, Carsten, Kathrin Höppner und Michael Bittner (1. Sep. 2013). "A Ground-Based Spectrometer Equipped with an InGaAs Array for Routine Observations of OH(3-1) Rotational Temperatures in the Mesopause Region". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 102, S. 125–139. ISSN: 1364-6826. DOI: 10.1016/j.jastp.2013. 05.001.
- Spectrogon (8. Feb. 2021). Longwave-Pass Filters. URL: https://www.spectrogon. com/products/optical-filters/spectrogon-ab/longwave-pass-filters/ (besucht am 30.06.2022).
- Taylor, Michael J. et al. (2019). "Large-Amplitude Mountain Waves in the Mesosphere Observed on 21 June 2014 During DEEPWAVE: 1. Wave Development, Scales, Momentum Fluxes, and Environmental Sensitivity". In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124.19, S. 10364–10384. ISSN: 2169-8996. DOI: 10.1029/2019JD030932.
- Van Rhijn, Pieter Johannes (1921). "On the Brightness of the Sky at Night and the Total Amount of Starlight". In: *Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory Groningen*. Bd. 31, S. 1–83.
- Weisberg, Sanford (2005). "Applied Linear Regression, Third Edition". In: John Wiley & Sons, Ltd, S. i-xvi. ISBN: 978-0-471-70409-6. DOI: 10.1002/0471704091.fmatter.

Wüst, Sabine et al. (2017). "Variability of the Brunt–Väisälä Frequency at the OH\* Layer Height". In: *Atmospheric Measurement Techniques* 10.12, S. 4895–4903. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-10-4895-2017.

## Danksagung

Zu guter Letzt möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Erarbeiten und Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank:

- Herrn Prof. Dr. Michael Bittner für die Aufnahme in die Arbeitsgruppe Atmosphärenfernerkundung und die Abteilung EOC am Deutschem Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen und die hervorragende Betreuung während der gesamten Arbeit,
- Herrn PD Dr. German Hammerl für die Übernahme der Zweitkorrektur.
- Herrn Dr. Carsten Schmidt für die hervorragende Betreuung, gewissenhaftes Korrekturlesen der Arbeit und das gute Arbeitsklima,
- Frau PD Dr. Sabine Wüst für die freundliche Aufnahme ins Dynamik-Team und Zusammenarbeit,
- der gesamten Dynamik-Gruppe für die freundliche Aufnahme und Zusammenarbeit während der gesamten Arbeit,
- meinen Eltern, Freunden und Großeltern, ohne deren Unterstützung das Entstehen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Augsburg, 13.04.2023