



Identifikation von stellaren Signaturen in Routinemessungen des OH-Airglow und Betrachtung ihrer Anwendungspotentiale

Bachelorarbeit

Erstprüfer: Prof. Dr. [REDACTED]

Zweitprüfer: Prof. Dr. [REDACTED]

Schreiber, Thomas

Matrikelnummer: [REDACTED]

B.Sc. Geographie, 7. Semester

thomas.schreiber@ [REDACTED]

Abgabetermin: 12.12.2025

Kurzfassung

Das *Network for the Detection of Mesospheric Change* (NDMC) ist ein globales Beobachtungsnetzwerk, das Veränderungen in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre überwacht und langfristige Trends beurteilen soll. Für die dafür eingesetzten Instrumente, darunter die GRIPS-Spektrometer, ist eine zuverlässige Kalibration von entscheidender Bedeutung, um Messungen verschiedener Stationen miteinander vergleichen zu können. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit, ob stellare Signale eine geeignete und effiziente Ergänzung zu bestehenden Kalibrationsmethoden darstellen können. Im Mittelpunkt steht ein regelmäßig auftretendes stellares Signal in den Routinemessungen des OH-Airglows von GRIPS 15 auf der Neumayer-Station III. Aufgrund seiner täglichen Verschiebung konnte das Signal eindeutig dem Stern Antares zugeordnet werden. Das Signal wird hinsichtlich seiner zeitlichen Regelmäßigkeit, spektralen Form, Dauer und Intensität charakterisiert, um seine Eignung als mögliche Kalibrierungsmethode für GRIPS-Spektrometer zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass Sterne unter geeigneten Voraussetzungen als Kalibrierungsmethode genutzt werden können, ihre Anwendbarkeit jedoch durch Faktoren wie atmosphärische Bedingungen und instrumentellen Eigenschaften begrenzt werden.

Abstract

The *Network for the Detection of Mesospheric Change* (NDMC) is a global observation network that monitors changes in the mesosphere and lower thermosphere and assesses long-term trends. For the instruments used for this purpose, including the GRIPS-spectrometers, a reliable calibration is crucial in order to be able to compare measurements from different station. Against this background, this thesis investigates whether stellar signals can be a suitable and efficient addition to existing calibration methods. The focus is on a regularly occurring stellar signal in the routine measurements of the OH-airglow by GRIPS 15 at the Neumayer-Station III. Due to its daily shift, the signal could be clearly assigned to the star Antares. The signal is characterized in terms of its temporal regularity, spectral shape, duration, and intensity to assess its suitability as a possible calibration method for GRIPS-spectrometers. The results show that stars can be used as a calibration method under suitable conditions, but their applicability is limited by factors such as atmospheric conditions and instrumental properties.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	6
2	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Airglow	8
2.2	NDMC & GRIPS Messinstrumente	9
2.3	Motivation	11
3	Methodik	13
3.1	GRIPS-Datenlevel.....	13
3.2	Untergrundpositionen.....	14
3.3	Intensitätsberechnung.....	17
4	Ergebnisse & Diskussion	18
4.1	Zeitpunkt	19
4.2	Spektrale Form	22
4.3	Signaldauer.....	24
4.4	Intensität.....	26
4.5	Intensität von Antares zwischen 2015 und 2022.....	30
4.6	Neumayer-Station III.....	33
4.7	GRIPS 19	36
4.8	GRIPS 8	37
5	Zusammenfassung & Ausblick	40
	Literaturverzeichnis.....	42
	Danksagung.....	44
	Eidesstattliche Erklärung.....	45

1 Einführung

Die Untersuchung der Mesopausenregion anhand bodengebundener Spektrometer ist eine wichtige Methode zur Analyse der atmosphärischen Dynamiken in der mittleren Atmosphäre. Die sogenannten GRIPS-Spektrometer (Ground-based Infrared P-branch Spectrometer) bilden einen wichtigen Bestandteil, da sie langfristige und kontinuierliche Beobachtungen ermöglichen (Schmidt et al., 2013, s. 125). Die Spektrometer sind global verteilt und messen die Emission des sogenannten OH-Airglow (Schmidt et al., 2013, s. 135). Da die Airglowintensität von Ort zu Ort variiert, unterscheiden sich die gemessenen Werte dementsprechend (Teiser and Von Savigny, 2017, s. 1).

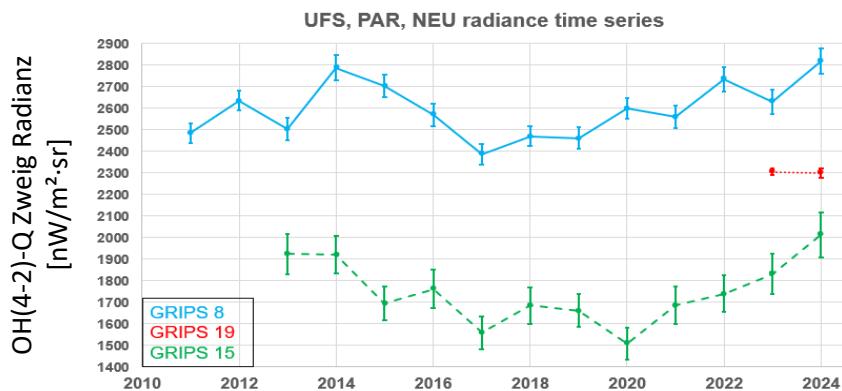


Abbildung 1.1 Jährliche Durchschnittswerte der Airglowintensität von drei GRIPS-Spektrometern (GRIPS: Deutschland, GRIPS 15: Antarktis, GRIPS 19: Chile). Die Instrumente sind auf unterschiedliche Weise kalibriert und es stellt sich die Frage, ob die systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten (in dieser Größe) real sind.

Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, ist eine regelmäßige Kalibration notwendig. Da viele GRIPS-Stationen an abgelegenen Orten betrieben werden und nur eingeschränkt gewartet werden können, besteht ein besonderes Interesse an Methoden, die eine Einschätzung der instrumentellen Eigenschaften erlauben (Schmidt et al., 2013, s. 130).

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die grundlegenden Bedingungen zu identifizieren, unter denen ein Verfahren zur Bewertung oder Validierung eines GRIPS-Spektrometers eingesetzt werden kann, dass auf Beobachtungen eines Sterns mit verschiedenen Spektrometern beruht. Dies umfasst sowohl die Analyse der detektierbaren Signale als auch die Bewertung der instrumentellen und standortspezifischen Faktoren, die die Nutzbarkeit solcher Methoden beeinflussen. Darüber hinaus wird untersucht, ob sich dieser Ansatz auf weitere GRIPS-Stationen übertragen lässt und welche Einschränkungen sich aus unterschiedlichen Instrumenten oder lokalen Bedingungen ergeben.

2 Theoretische Grundlagen

Die Erdatmosphäre ist Treiber der Klimaprozesse und essenziell für das Leben auf der Erde (Schönwiese, 2024, s. 18). Sie ist eine durch Gravitation gebundene Gashülle und in mehrere Schichten gegliedert, die sich durch Temperaturverlauf, chemische Zusammensetzung und physikalische Prozesse unterscheiden (Kramer, 2015, s. 6). So finden beispielsweise in der untersten Atmosphärenschicht - der Troposphäre - sämtliche Wetterphänomene statt und in der Stratosphäre befindet sich die Ozonschicht, die einen Großteil der UV-Strahlung zurück ins All reflektiert (Höppner, 2008, s. 13; Schönwiese, 2024, s. 7). Für diese Arbeit ist insbesondere die Mesosphäre/untere Thermosphäre (MLT-Region) in 70 bis 120 km Höhe relevant (Höppner, 2008, s. 13). Dort herrschen niedrige Temperaturen und es treten charakteristische Leuchterscheinungen wie Airglow auf (siehe Abbildung 2.1). Dieses Phänomen spielt eine zentrale Schlüsselrolle für die Atmosphärenforschung und ermöglicht Einblicke in dynamische und klimatologische Prozesse (Kramer, 2015, s. 8f.).

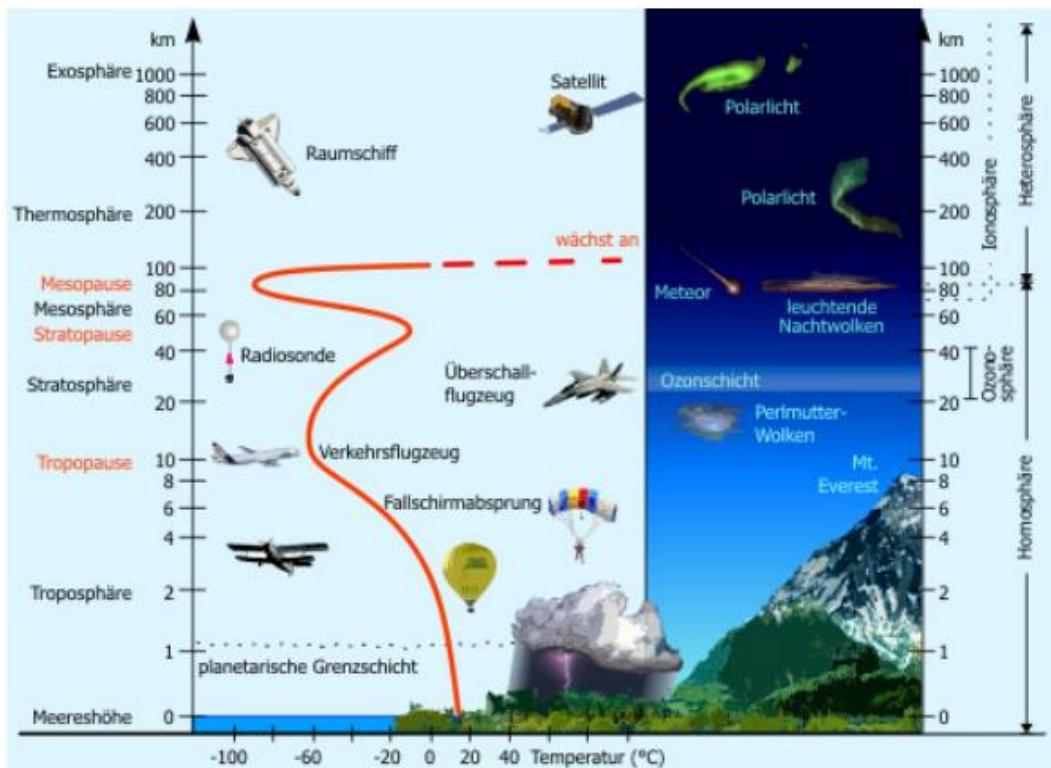


Abbildung 2.1 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre. In 82,4 km Höhe sind die leuchtenden Nachtwolken eingezeichnet. In dieser Höhe wird das OH-Airglow mit bodengebundenen Spektrometern erforscht (80 -100 km).

Quelle: (Kramer, 2015)

2.1 Airglow

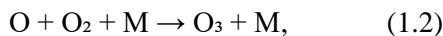
Die Erdatmosphäre zeigt bei Nacht ein schwaches, natürliches Leuchten, das als Airglow bezeichnet wird. Im Gegensatz zu Polarlichtern, die durch hochenergetische Teilchen aus dem Sonnenwind verursacht werden und nur in Polregionen auftreten, ist das Airglow ein global verbreitetes und kontinuierlich stattfindendes Phänomen (Schmidt, 2016, s. 5). Airglow entsteht durch chemische Reaktionen verschiedener Gase in der MLT-Region (Hecht, 2004). Atome und Moleküle werden durch das Sonnenlicht angeregt und emittieren überschüssige Energie in Form von Strahlung (Schmidt, 2016, s. 9). Je nach Spezies finden diese Reaktionen in unterschiedlicher Höhe statt und sind in unterschiedlichen Wellenlängen sichtbar. Hauptvertreter sind atomarer Sauerstoff (OI) in ca. 95 km und über 200 km Höhe, Natrium (Na) in 92 km Höhe und Hydroxyl (OH), dessen Maximum in ca. 86 km Höhe liegt (Hecht, 2004, s. 1). Der Fokus liegt auf dem OH-Airglow, das mit bodengestützten Messinstrumenten beobachtet wird. Die Emissionen des angeregten Hydroxylradikals (OH*) liegen im nahen Infrarot zwischen 1,5 - 1,6 Mikrometer (μm) und werden kontinuierlich detektiert (Wüst et al., 2023, s. 1600).

Die Entstehung des OH-Airglows basiert auf einer Reaktionskette, die mit der Photodissoziation von Sauerstoff durch solare UV-Strahlung beginnt (vgl. Gl. 1.1) und über Ozonbildung zur Anregung von Hydroxyl-Molekülen führt (vgl. Gl. 1.2). Diese geben die aufgenommene Energie zeitverzögert als Photon ab (vgl. Gl. 1.3, Gl. 1.4). Dadurch bleibt das Airglow auch während der Nacht bestehen (Schmidt, 2016, s. 9):

Photodissoziation:



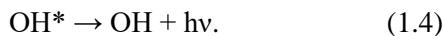
Bildung von Ozon:



Reaktion mit Wasserstoff:



Strahlungsemision (Airglow):



Die emittierte Strahlung wird mit den GRIPS-Spektrometern des DLR gemessen. Aus dem Spektrum lassen sich atmosphärische Parameter ableiten, sodass Rückschlüsse auf die Dynamik der Atmosphäre, wie Schwerewellen oder Planetare Wellen, geschlossen werden können (Wüst et al., 2023, s. 1599). Das OH-Airglow stellt damit eine zentrale Grundlage für Langzeitbeobachtungen der mittleren Atmosphäre dar und liefert wichtige Parameter für die Klimaforschung.

2.2 NDMC & GRIPS Messinstrumente

Das NDMC steht für Network for the Detection of Mesospheric Change und ist ein globales Programm zur Förderung internationaler Zusammenarbeit zwischen Forschungsgruppen, die die Mesopausenregion untersuchen. Das Ziel ist die frühzeitige Erkennung von Klimaveränderungen in der Mesosphäre. Das Netzwerk besteht derzeit aus ca. 50 global verteilten Messstationen, die kontinuierlich Daten und Informationen für die Erforschung der mesosphärischen Dynamik liefern (["ndmc.dlr.de"](http://ndmc.dlr.de), n.d.).

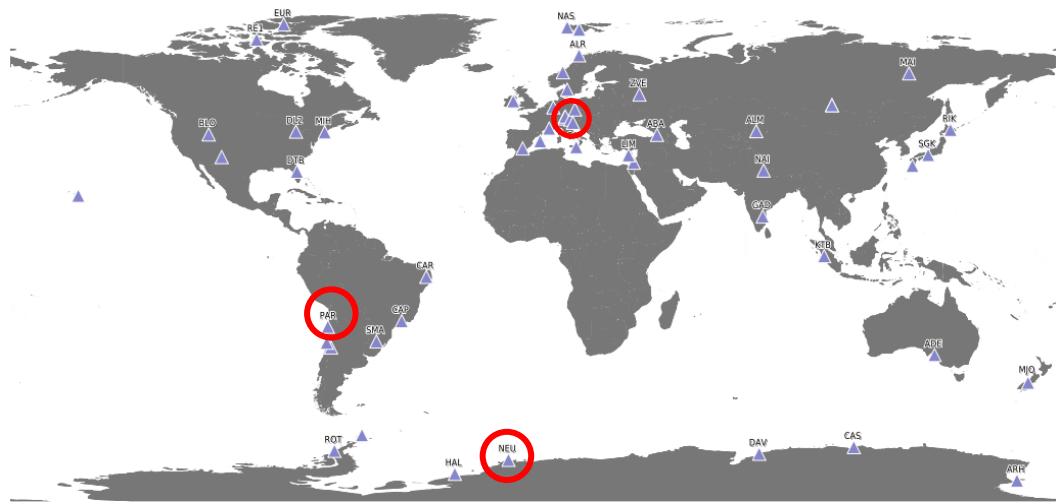


Abbildung 2.2 NDMC-Karte - Verteilung der Instrumente, die Teil des NMDC sind. Die roten Kreise markieren GRIPS 15 auf der Neumayer-III Forschungsstation in der Antarktis, GRIPS 19 auf dem Cerro Paranal in Chile und GRIPS 8 auf der UFS (Umweltforschungsstation Schneefernerhaus) auf der Zugspitze.

Quelle: verändert nach ndmc.dlr.de, download am 27.08.2025

Zentrale Instrumente innerhalb des Netzwerks sind die GRIPS-Spektrometer (Ground-based Infrared P-branch Spectrometer), die seit 2005 vom DLR betrieben werden (["GRIPS,"](http://GRIPS) n.d.). Diese Geräte sind speziell für die Messung von Airglow und dessen OH-Emissionen im nahen Infrarot zwischen 1,5 und 1,6 μm (1500 und 1600 Nanometer (nm)) entwickelt, weil dort die starken Emissionslinien des Hydroxyl-Radikals liegen (Wüst et al., 2023, s. 1605). Das Prinzip der Messungen beruht auf der bodengebundenen Infrarotspektroskopie. Die Geräte detektieren die einfallende elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich. Die Detektorkamera im Gerät kann die Strahlung in 512 Pixeln aufnehmen. Das bedeutet, dass der Wellenlängenbereich von 1,5 bis 1,6 μm in 512 schmale Wellenlängenintervalle geteilt wird und die Kamera für jeden einzelnen dieser Kanäle Datenwerte von einer Messung aufzeichnet. Die Spektrometer - mit Ausnahme von GRIPS 19 - sind so ausgerichtet, dass sie in einer festen Blickrichtung kontinuierlich den Nachthimmel beobachten. Die einfallende Strahlung wird durch Umlenkspiegel in die Spektrometer gelenkt (siehe Abbildung 2.3). Dort wird sie spektral zerlegt und

wellenlängenabhängig vom Detektor mit 512 Pixeln digital erfasst. Daraus entsteht ein vollständiges Spektrum, das die Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge im genannten Bereich zeigt (Schmidt, 2016, s. 76ff.).

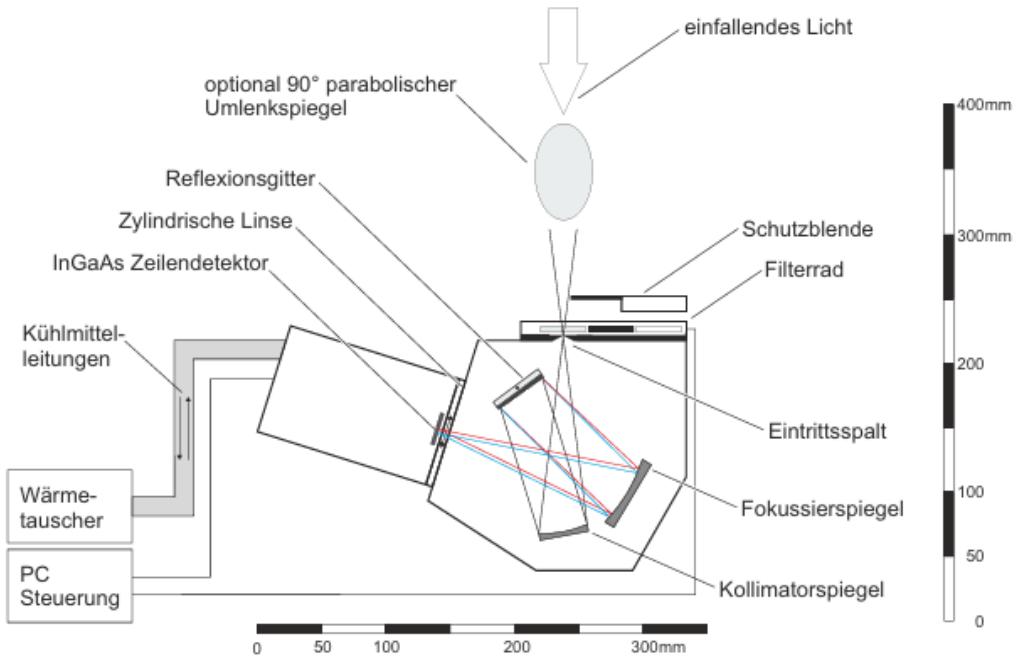


Abbildung 2.3 Beispielhafter Aufbau eines GRIPS-Spektrometers (Schmidt, 2016). Der Parabolspiegel ist nicht notwendig für ein einsatzbereites Instrument. GRIPS 15 und GRIPS 19 besitzen einen, GRIPS 8 nicht. Mit einem Parabolspiegel kann der Öffnungswinkel verkleinert werden.

Die durch das NDMC erhobenen Messdaten ermöglichen eine globale Beobachtung, da viele GRIPS-Spektrometer nach dem gleichen Messprinzip arbeiten und an verschiedenen Orten stationiert sind. Für eine genaue und vergleichbare Auswertung der Messergebnisse über Zeit und Ort hinweg ist eine regelmäßige und zuverlässige Kalibrierung entscheidend, weshalb die Spektrometer vor der Stationierung kalibriert werden (s.o.). Viele dieser Messgeräte sind an abgelegenen und schwer zugänglichen Standorten wie Hochgebirgsregionen, außerhalb der EU oder den Polarstationen installiert. Eine regelmäßige Wartung oder Neukalibrierung ist nur mit erheblichem logistischem und finanziellem Aufwand möglich. Dennoch ist eine verlässliche Kalibrierung unerlässlich, um die Datenqualität langfristig sicherzustellen und eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Stationen des NDMC-Netzwerks zu gewährleisten. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. In den Messungen von GRIPS 15 auf der Neumayer-III-Station in der Antarktis wurde ein regelmäßig auftretendes stellares Signal identifiziert, das das Potential besitzt, als alternative und effiziente Kalibrierungsmethode für schwer zugängliche Instrumente genutzt zu werden.

2.3 Motivation

Das regelmäßige wiederkehrende Signal von GRIPS 15 hebt sich deutlich von den bekannten Airglowsignaturen ab und erscheint täglich für wenige Minuten. Auffällig ist die tägliche zeitliche Verschiebung des Signals um etwa vier Minuten. Dieses Muster entspricht genau dem Unterschied zwischen siderischem und solarem Tag und legt nahe, dass es sich um den Durchgang eines Fixsterns durch das Sichtfeld des Spektrometers handelt. Das Signal konnte durch den Abgleich mit astronomischen Daten dem Stern Antares (α Scorpii), einem roten Überriesen im Sternbild Skorpion, zugeordnet werden. Antares mit einer scheinbaren Helligkeit von 0,91 Magnituden (mag) einer der hellsten Sterne am Nachthimmel und eignet sich gut für einen klaren Nachweis in den GRIPS-Daten (“Antares: Betelgeuse’s Neglected Twin | aavso,” n.d.; Wenger et al., 2000).

Das wiederkehrende Signal wirft mehrere Fragen auf, die das Potential für eine Weiterentwicklung von GRIPS-Messungen bergen. Zunächst stellt sich die Frage, ob das Signal in GRIPS 15 im Detail charakterisiert werden kann, im Hinblick auf zeitliche Regelmäßigkeit, spektrale Form, Sichtbarkeitsdauer und vor allem der Intensität. Zusätzlich muss geklärt werden, ob ähnliche stellare Signale (eventuell dasselbe Signal) in anderen GRIPS-Instrumenten aufgezeichnet wurden. Dieses Prinzip wird in Abbildung 2.4 veranschaulicht. Ein Stern ist von vielen Standorten aus zu sehen und wird als Bezugspunkt verwendet. Dadurch können potentielle Veränderungen eines GRIPS-Spektrometers durch langjährige Beobachtung des Sterns von Oberpfaffenhofen aus erkannt und möglicherweise gezielt korrigiert werden. Ein solcher Referenzpunkt wäre von großer Bedeutung, wenn er für die regelmäßige Kalibrierung eingesetzt werden könnte. Die Datenqualität sowie Vergleichbarkeit der Instrumente wären dadurch gewährleistet, ohne aufwendige Wartungseinsätze an Standorten wie der Antarktis oder anderen entlegenen Orten.

Neben dem Einsatz als Langzeitreferenz stellt sich zudem die Frage, ob ein Sternsignal auch zur präzisen Ermittlung des Öffnungswinkels genutzt werden kann. Ist die Sichtbarkeitsdauer des Sterns bekannt, so kann der Öffnungswinkel einfach bestimmt werden. Diese Idee ist für das Instrument GRIPS 19 interessant, das sich an der Europäischen Südsternwarte (ESO) auf dem Cerro Paranal in den chilenischen Anden befindet und seit 2022 Daten liefert. Der Parabolspiegel von GRIPS 19 ist beweglich und somit verändert sich die Blickrichtung je nach Bedarf. Da die Bestimmung des Öffnungswinkels sehr aufwendig ist, wurde er bei GRIPS 19 nur für die Standardposition vermessen. Dabei besteht die Annahme, dass sich der Öffnungswinkel mit der Blickrichtung nicht ändert, sofern der Spiegel korrekt justiert ist. Diese Annahme kann

gegebenenfalls durch die gezielte Beobachtung eines Sterns in verschiedenen Blickrichtungen überprüft werden.

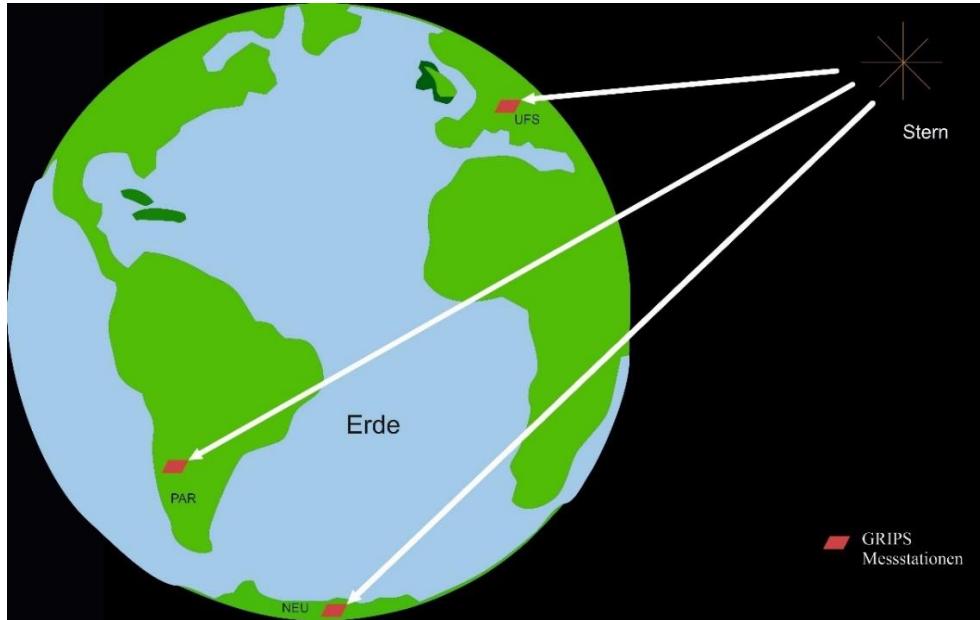


Abbildung 2.4 Veranschaulichung der Kalibrierungsmethode mit einem stellaren Signal. Ist ein Stern von mehreren Standorten aus zu sehen sollte sein Signal in allen Instrumenten vergleichbar sein. Weicht die Messung eines Instruments stark ab oder verändert es sich mit der Zeit, dann driftet gegebenenfalls die Empfindlichkeit dieses Instruments.

Quelle: verändert nach [How to Draw a Cartoon Earth - Step by Step Guide](#), Download am 26.08.2025

Damit bietet das stellare Signal gleich mehrere Anwendungsmöglichkeiten für Genauigkeit und Vergleichbarkeit im GRIPS-Netzwerk. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die zentrale Motivation dieser Arbeit. Das in den Daten von GRIPS 15 identifizierte Sternsignal soll im Hinblick auf seine Eigenschaften und Anwendungspotenziale untersucht werden. Daraus leiten sich die folgenden Forschungsfragen ab:

1. Charakterisierung:

Lässt sich das stellare Signal in GRIPS 15 hinsichtlich zeitlicher Regelmäßigkeit, spektraler Form, Dauer und Intensität charakterisieren?

2. Instrumentelle Anwendbarkeit:

Eignet sich das stellare Signal zur Erkennung einer potentiellen Drift der Empfindlichkeit des GRIPS-Instruments über mehrere Jahre hinweg?

3. Übertragbarkeit:

Können vergleichbare stellare Signaturen in den GRIPS-Instrumenten identifiziert werden und ist die Methode verwendbar?

Zusatzfrage: Kann das stellare Signal zur präzisen Bestimmung des Öffnungswinkels eines GRIPS-Instruments verwendet werden, wie beispielsweise am Standort GIRPS 19 in Chile?

3 Methodik

Ziel dieses Abschnitts ist es zu zeigen, wie das Sternsignal aus den Messdaten von GRIPS 15 isoliert wird, sodass anschließend eine Analyse seiner Charakteristika möglich ist. Zunächst gilt es, die Vorgehensweise bei der Datenprozessierung darzustellen und die Identifizierung des Signals zu beschreiben. Danach wird erläutert, wie der Öffnungswinkel und die Intensität berechnet werden können.

3.1 GRIPS-Datenlevel

GRIPS-Spektrometer produzieren Daten in jeder Nacht, in der sie aktiv sind. Die Detektorkamera nimmt im Abstand von 15 Sekunden (s) alle einfallenden Signale auf und speichert sie ab. Es handelt sich um erstmals um Rohdaten, deren Werte als sogenannte Counts bezeichnet werden und der Menge der registrierten Photonen bzw. des registrierten Photonenstroms entsprechen. Aus diesen Daten lassen sich noch keine konkreten Aussagen über physikalische Parameter, wie Wellenlänge oder Intensität, treffen. Die Daten werden automatisch weiterverarbeitet, bis Temperaturwerte abgeleitet werden können. Der jeweilige Grad der Verarbeitung wird als Datenlevel bezeichnet. Bei den GRIPS-Spektrometern werden für gewöhnlich zwei Datenlevel abgespeichert: Level-0- und Level-2-Daten. Level-0-Daten sind Spektren aus den Rohdaten und Level-2-Daten sind die abgeleiteten Spektren. Alle Messungen besitzen einen Zeitstempel im Format YYYY-MM-DD (Jahr-Monat-Tag) sowie den Azimutal- und Zenitwinkel zur Bestimmung des Blickfeldes. Die Datenprozessierung bei GRIPS 15 läuft unter der neueren Version 2.1, bei der zusätzlich die Zwischendaten abgespeichert werden, die sonst nur im Hintergrund berechnet, aber nicht gespeichert werden (das sogenannte Level-1, kalibrierte Spektren). In Abbildung 3.1 sind die fünf Datenlevel der Reihe nach dargestellt und mit dem Grad ihrer Verarbeitung beschrieben.



Abbildung 3.1 GRIPS 15 Datenlevel und Verarbeitungsstufen. Von links nach rechts werden die Daten Schritt für Schritt verarbeitet. Von den Rohdaten (Level-0) über die kalibrierten Spektren (Level-1) bis hin zu den abgeleiteten Parametern, wie der Temperatur (Level-2).

Level-0B sind Level-0-Daten, bei denen der gemessene Dunkelstrom abgezogen wird. Der Dunkelstrom ist ein Signal, das im Detektor auch ohne einfallendes Licht entsteht. Um ihn aufzuzeichnen, werden regelmäßige Messungen bei geschlossenem Filterrad durchgeführt, (Schmidt, 2016, s. 92f.). Aus diesen Messungen wird der Mittelwert bestimmt, der von den Rohdaten subtrahiert wird. Als nächstes werden anhand der Level-1B-Daten die sogenannten Level-1A-Daten erzeugt. Bei dieser Prozesserweiterung erhalten die Werte physikalische Einheiten, sodass Wellenlänge in Nanometer (nm) und Intensität in der Einheit $\text{nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ dargestellt wird. Das physikalisch interpretierbare Spektrum enthält Hintergrundstrahlung, verursacht durch den Nachthimmel, Temperaturschwankungen im Labor und Kunstlicht. Um die Störsignale zu eliminieren werden spektrale Bereiche ohne OH-Emissionen genutzt und vom Gesamtspektrum abgezogen. Das Ergebnis sind Level-1B-Daten, die das reine Airglow-Signal darstellen. Die höchste Verarbeitungsstufe bildet Level-2, die aus der Berechnung der Rotations- und Vibrationsübergänge des OH-Moleküls entstehen. Daraus werden die Temperaturwerte der Mesopausenregion bestimmen. Diese Temperaturzeitreihen stellen den eigentlichen Endpunkt der Datenprozessierung dar und sind die Grundlage vieler klimatologischer Auswertungen.

Die Analyse des Sternsignals erfolgt unter Verwendung von Level-1A-Daten. Einerseits sind diese physikalisch interpretierbar, andererseits beinhalten sie die Untergrundsignale, in denen das Sternsignal vermutet wird. Die Level-1A-Daten werden in Form von Textdateien gespeichert und umfassen alle Ergebnisse einer Messperiode. Jede Zeile entspricht einer Aufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt, die Spalten repräsentieren jeweils eine Wellenlänge. Im folgenden Abschnitt wird als nächstes erläutert, wie die Level-1A-Daten untersucht werden, um die relevanten Charakteristika systematisch zu erfassen.

3.2 Untergrundpositionen

Für die Prozessierung von Level-1A zu Level-1B werden bestimmte Positionen gewählt, um das Untergrundsignal zu entfernen. Hier wird dieses Prinzip umgekehrt genutzt, um das

Untergrundsignal zu untersuchen. Für die Wahl der Untergrundpositionen wird das Verfahren von Moser (2023) und Schmidt (2016) herangezogen und ihre Auswahl der Positionen genutzt. Im Spektrum zwischen 1500 und 1600 nm eignen sich vier Wellenlängenbereiche, bei denen keine OH-Emissionen vorhanden sind. Diese Positionen werden als Kanäle bezeichnet. Die Kanäle sind so gewählt, dass sie einem Nanometer breit sind. So entspricht Kanal 1 dem Wellenlängenintervall von 1500 bis 1501 nm, Kanal 2 dem Bereich von 1501 bis 1502 nm, Kanal 3 dem von 1515 bis 1516 nm und Kanal 4 dem von 1593 bis 1594 nm (siehe Abbildung 3.2).

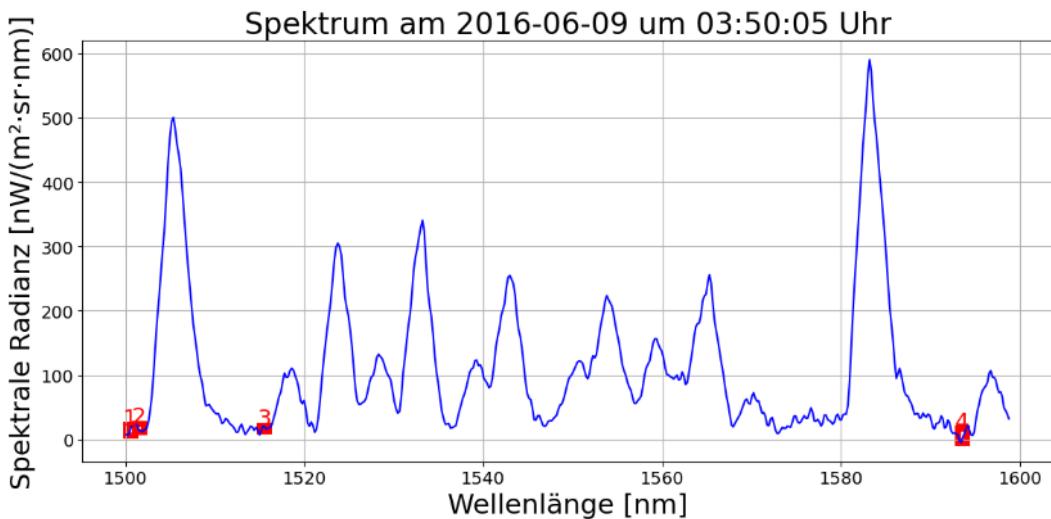


Abbildung 3.2 Level-1A-Daten vom 09.06.2016 mit Untergrundpositionen zwischen 1500 und 1600 nm. Der blaue Graph entspricht einem klassischen Airglowspektrum. Die vier Kanäle befinden sich an den roten Punkten. Die spektrale Radianz liegt dort knapp über 0, weil das OH-Molekül bei diesen Wellenlängen keine Strahlung emittiert (Schmidt, 2016).

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, besteht die Detektorkamera aus 512 Pixel und jeder Pixel entspricht einer Wellenlänge. Die Wellenlänge variiert je nach Spektrometer. Beispielsweise entsprechen bei GRIPS 15 die ersten fünf Pixel dem Wellenlängenintervall 1500 bis 1501 nm. Bei anderen GRIPS-Instrumenten kann der Zusammenhang zwischen Pixel und Wellenlänge variieren.

Das Diagramm in Abbildung 3.2 stellt das OH-Spektrum der Level-1A-Daten vom 09.06.2016 um kurz vor vier Uhr nachts dar. Die kalibrierten Daten zeigen die Spektrale Radianz in Abhängigkeit von der Wellenlänge an. Die Werte der vier untersuchten Kanäle liegen knapp über 0 $\text{nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$, was auf den Untergrund zurückzuführen ist. Aus dieser Darstellung kann das ungewöhnliche Signal noch nicht erkannt werden.

In Abbildung 3.3 sind die Messwerte von Kanal 1 über die Zeit zu sehen. Der Mittelwert wurde aus den ersten 5 Pixelspalten berechnet und graphisch dargestellt. Die grüne Linie im Diagramm entspricht der Intensität zu Zeitpunkt x. Auf Grund der Helligkeit der

Morgen- und Abenddämmerung werden die Werte zu Beginn und am Ende stark beeinflusst. Im Verlauf der Nacht bleibt der Wert nahezu konstant bis auf einen kleinen Peak kurz nach 0 Uhr, bei dem die Intensität für einen kurzen Moment deutlich ansteigt.

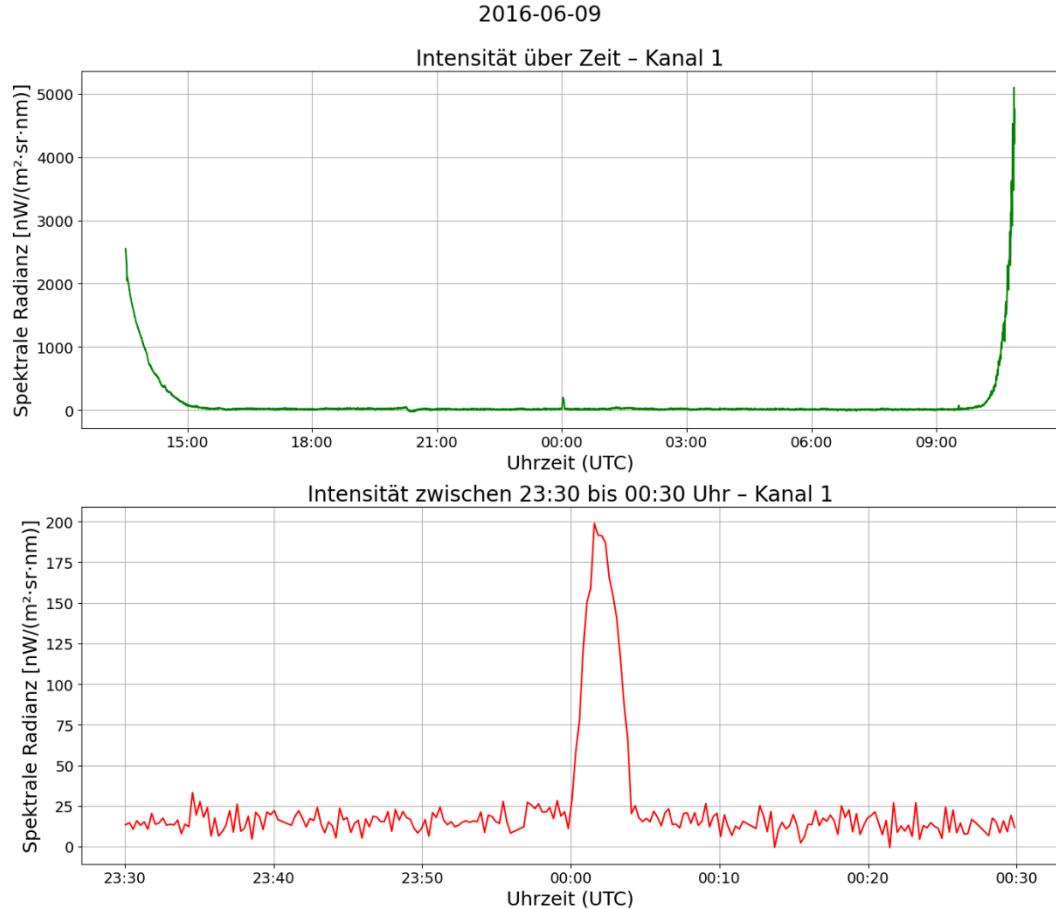


Abbildung 3.3 Level-1A-Daten abgebildet über die Zeit im Kanal 1. Alle 15 s wird eine Aufnahme gemacht. Das Instrument schaltet sich zur Abenddämmerung selbstständig ein und zur Morgendämmerung aus. Die gesamte Messnacht vom 08.06. auf den 09.06.2016 ist im oberen Teildiagramm zu sehen. Die Linie entspricht den gemittelten Werten von Kanal 1 - Wellenlänge 1500 - 1501 nm. Das Untergrundsignal verhält sich relativ konstant und um 0 Uhr ist ein kleiner Peak verzeichnet. Das untere Teildiagramm vergrößert den Bereich um 0 Uhr.

Im unteren Teil von Abbildung 3.3 ist der Peak vergrößert dargestellt. Eine Intensitätszunahme von wenigen Minuten ist zu sehen. In der Beispielnacht liegt das Untergrundsignal im Bereich von etwa $20 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ und bleibt über den Großteil der Messung relativ konstant, bis auf den Intensitätsanstieg auf rund 200 nW m^{-2} um ca. 00:02 Uhr. Dieser einzelne Peak stellt ein ungewöhnliches Signal dar.

Ein solcher Anstieg erscheint während mehrerer Messperioden und ist keine Einzelheit. Das Signal tritt für kurze Zeit im Spektrum auf, der exakte Zeitpunkt verschiebt sich dabei von Tag zu Tag. Diese konstante zeitliche Verschiebung deutet auf ein systematisches Phänomen hin, dessen Intensität im folgenden Kapiteln genauer untersucht wird.

3.3 Intensitätsberechnung

Die nächste Herausforderung ist es, die Amplitude des Signals zu bestimmen. Dazu wird eine Methode verwendet, bei der das Integral des Signals berechnet wird. Das Schema wird im Folgenden mit Hilfe von Abbildung 3.4 erläutert. Ziel ist es, das Signal vom Untergrundsignal zu trennen.

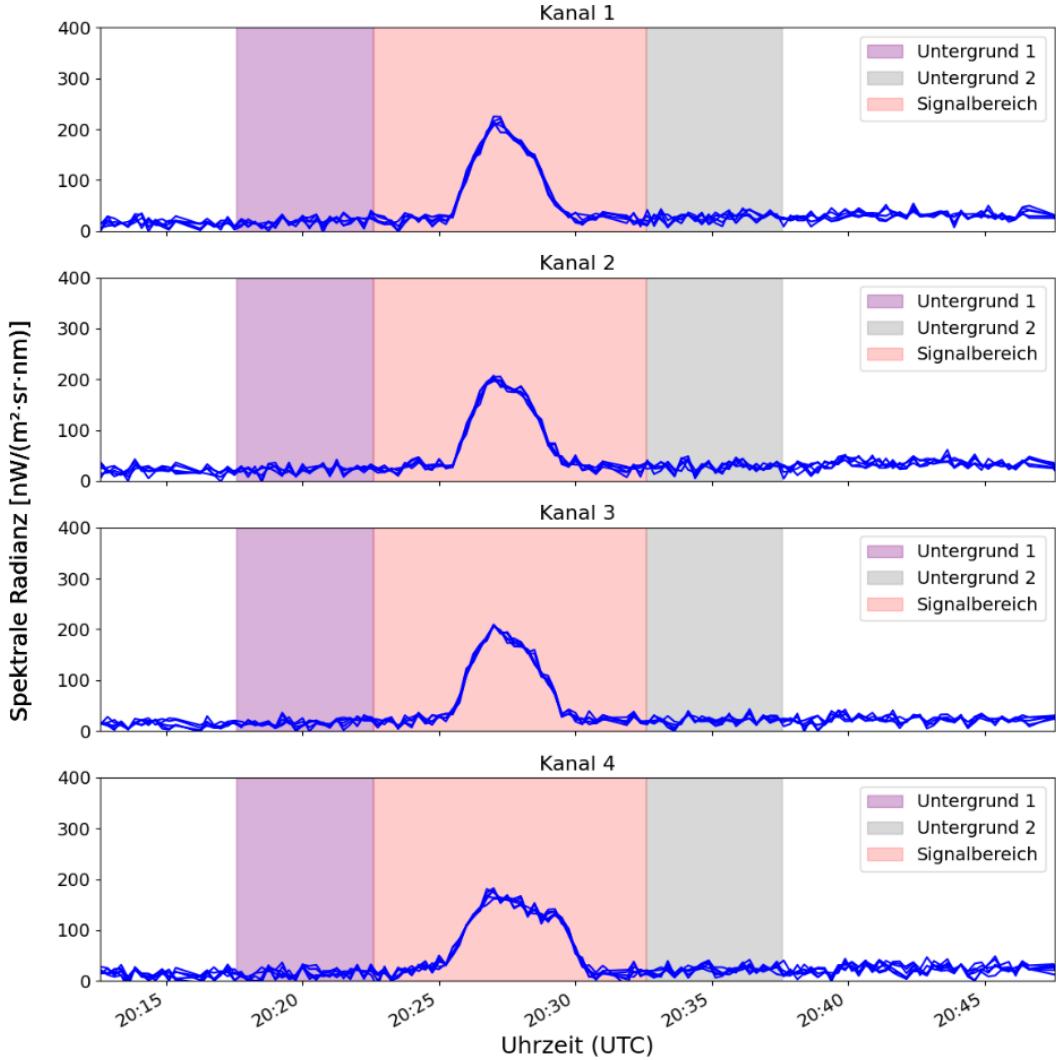


Abbildung 3.4 Schema der Intensitätsberechnung. Die rosa Fläche in der Mitte stellt den Signalbereich von ± 5 Minuten (min) bis zur Signalmitte. Da das Untergrundsignal im Signalbereich überlagert wird, wird es näherungsweise für dieses Intervalle interpoliert. Links befindet sich der Bereich von Untergrund 1 (violett) und rechts der für Untergrund 2 (grau). Das Schema wird für jeden Kanal einzeln angewendet.

Zur Bestimmung der Intensität des Signals wird zunächst der Untergrundwert berechnet. Dazu werden zwei Zeitintervalle herangezogen: 10 bis 5 min vor der Signalmitte (u_1) und 5 bis 10 min nach der Signalmitte (u_2). Aus den beiden Mittelwerten wird ein repräsentativer Untergrundwert u bestimmt:

$$u = \frac{u_1 - u_2}{2}.$$

Dieser Untergrundwert dient als Referenz und wird von allen Intensitätswerten innerhalb des Zeitfensters von 5 min vor bis 5 min nach der Signalmitte abgezogen. Die Differenzen $x_i - u$, mit x_i als gemessene Intensität zum Zeitpunkt i , repräsentieren den reinen Signalbetrag.

Die Summe dieser Differenzen über dem gesamten Zeitintervall ergibt die Signalintensität:

$$I = \sum_{i=-5 \text{ min}}^{+5 \text{ min}} (x_i - u).$$

Dieses Verfahren setzt voraus, dass sich der Untergrund, während der Präsenz des Signals, relativ konstant verhält. Unter dieser Voraussetzung kann der Untergrund zuverlässig entfernt werden und nur die zusätzliche Strahlung des Signals geht in die Berechnung der Intensität ein.

Das Prinzip der Intensitätsberechnung wird auf alle vier Kanäle angewendet (siehe Abbildung 3.4). Um Aussagen über eine mögliche langfristige Drift der Instrumente treffen zu können, muss das Signal über einen möglichst langen Zeitraum identifiziert werden. Die bestimmten Intensitäten werden miteinander verglichen - sowohl auf monatlicher als auch auf jährlicher Basis. Anhand der Intensitätsberechnungen lassen sich zeitliche Veränderungen der Signalstärke überprüfen, die auf eine Empfindlichkeitsänderung des Instruments hindeuten könnten.

Neben der Intensitätsbestimmung wird zusätzlich die Signaldauer erfasst. Zusammen mit der bekannten Himmelsrotation wird der Öffnungswinkel des Instruments bestimmt. Die Methode zur Berechnung der Signaldauer wird im Ergebniskapitel erläutert (siehe Kapitel 4.3).

4 Ergebnisse & Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse des in GRIPS 15 beobachteten Signals vorgestellt und diskutiert. Für die Untersuchung des Signals in GRIPS 15 wurden die Monate April, Juni und August gewählt und seit dem Beginn der Aufzeichnungen analysiert. Ziel ist es, die Eigenschaften des Signals zu beschreiben und mit den Methoden, die in Kapitel 3 vorgestellt wurden, zu quantifizieren. Dabei stehen vier zentrale Aspekte im Vordergrund: der Zeitpunkt des Auftretens, die spektrale Form, die Signaldauer sowie die Intensität des Signals. Die Ergebnisse für den Zeitpunkt, der spektralen Form und

Signaldauer werden in den gleichen Kapiteln direkt interpretiert. Die Interpretation der Intensitäten vom stellaren Signal in GRIPS 15 wird aufgeteilt in die Jahre 2015 bis 2022 und in die Jahre 2014, 2023 und 2024. Weiterhin soll die Erscheinung von Sternen in GRIPS 19 und GRIPS 8 diskutiert werden und die Einschätzung ihrer Eignung zum Vergleich der Instrumente an den verschiedenen Standorten.

4.1 Zeitpunkt

In den Level-1A-Daten von GRIPS 15 zeigt sich das untersuchte Signal als kurzer und deutlicher Intensitätsanstieg im Untergrund. Solche Ereignisse wurden in zahlreichen nächtlichen Messungen identifiziert. Die Uhrzeit des Auftretens verschiebt sich dabei von Tag zu Tag. Die Analyse mehrerer Nächte ergibt eine tägliche Verschiebung von etwa vier Minuten. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt. Mit dieser Untersuchung wird festgestellt, ob es sich bei dem Signal tatsächlich um das eines Fixsterns handelt. Im August 2019 konnte das Signal in zwölf aufeinanderfolgenden Tagen, mit Ausnahme von einem Tag, aufgezeichnet werden (Abbildung 4.1) und im April 2018 an neun Tagen (Abbildung 4.2).

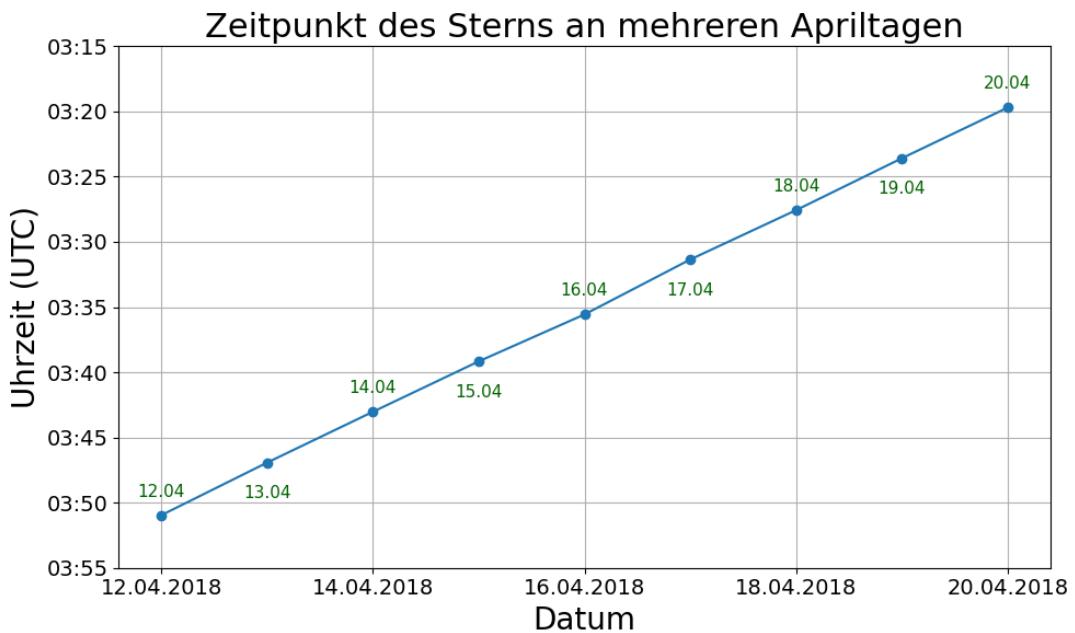


Abbildung 4.1 Zeitverschiebung des Signals im April. Die Punkte zeigen, um wie viel Uhr das Signal am jeweiligen Tag zu sehen war. 2018 tauchte es Mitte April zwischen 3 und 4 Uhr nachts auf und ist in den darauffolgenden Tagen immer früher identifiziert worden.

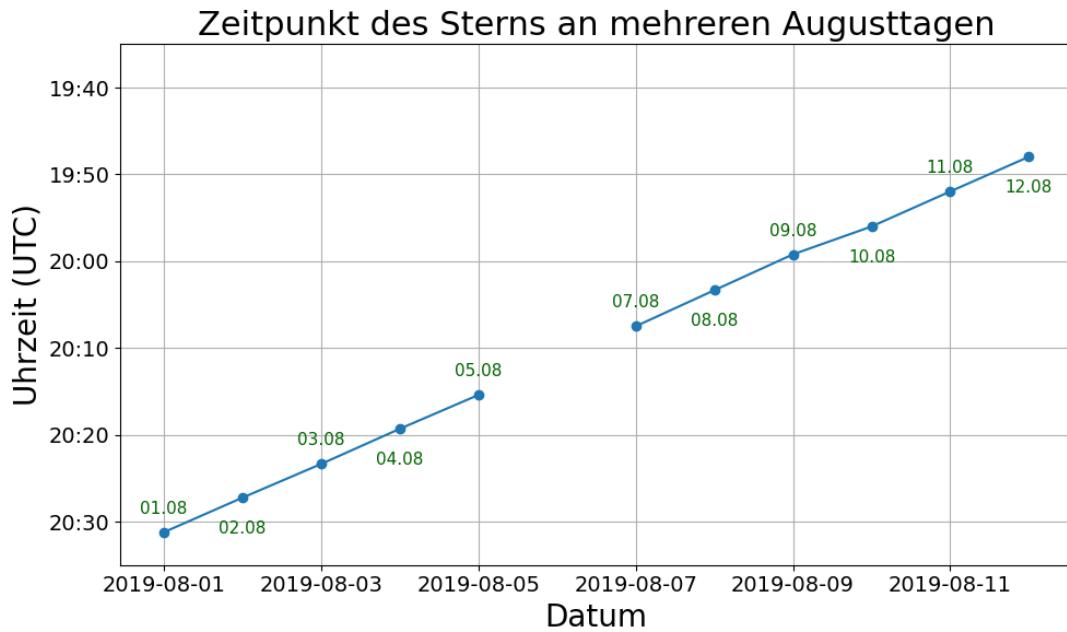


Abbildung 4.2 Zeitverschiebung des Signals im August. Das gleiche Schema wie in Abbildung 2.1 ist auch hier zu sehen. 2019 war das Signal Anfang August früher zu sehen - zwischen 20:30 Uhr und 19:30 Uhr. Am 06.08.2019 wurde das Signal nicht identifiziert worden ist.

Der Zeitpunkt wurde über das Intensitätsmaximum jeder Nacht bestimmt und mit dem des Folgetages verglichen. Die Uhrzeit, zu der das Signal auftritt, verfolgt ein klares Muster: Es verschiebt sich täglich um etwa vier Minuten. Wird angenommen, dass es sich bei dem Signal tatsächlich um das eines Fixsterns handelt, kann dieses Ergebnis genutzt werden, um das Auftreten des Signals zu einer bestimmten Zeit vorherzusagen. Der Stern war am 20. April um ca. 03:20 Uhr sichtbar. Nach einem Monat (30 Tage) verschiebt sich der Zeitpunkt um zwei Stunden. Am 01. August - 103 Tage später - ergibt sich daraus eine Verschiebung von 6 h und 52 min, sodass der Stern um 20:28 Uhr erscheinen müsste. Ein Vergleich mit Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 bestätigt, dass die berechneten Zeiten mit den gemessenen Beobachtungen übereinstimmen.

Dieses Ergebnis entspricht dem typischen Verhalten eines Fixsterns. Um diese Interpretation zu untermauern, wurde das Signal nicht nur über mehrere, aufeinanderfolgende Nächte betrachtet, sondern auch über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Das Signal wurde von 2015 und 2022 jeweils am 5. August aufgezeichnet. Ein Fixstern befindet sich nach genau einem Jahr wieder an derselben Stelle wie im Jahr zuvor (Abbildung 4.3). Die minimale zeitliche Verschiebung lässt sich auf das Schaltjahr zurückführen, das 2016 und 2020 deutlich erkennbar ist.

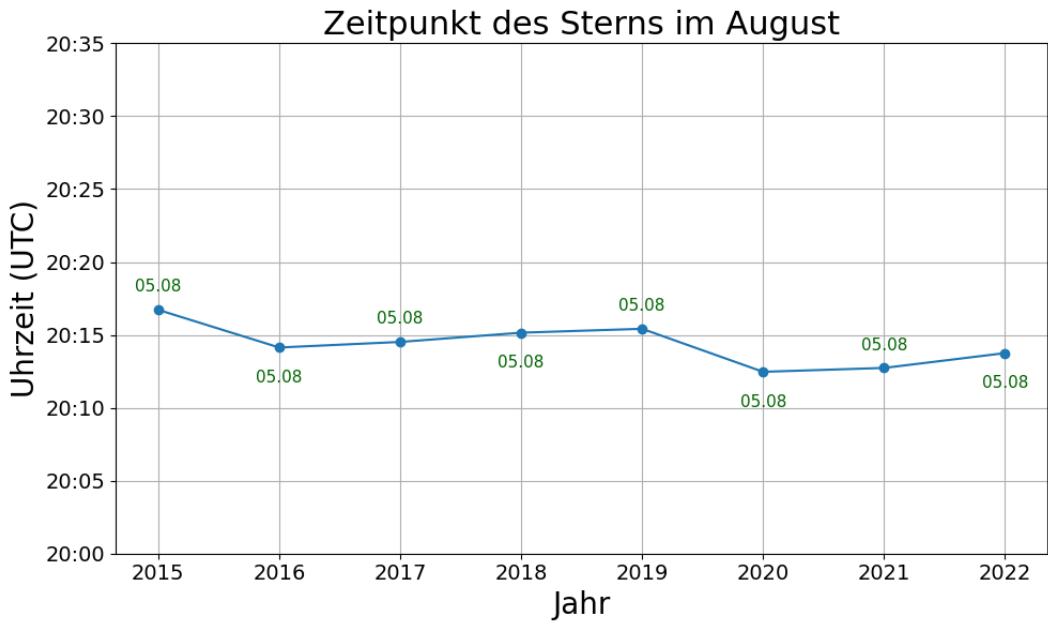


Abbildung 4.3 Verhalten eines Fixsterns am gleichen Tag über mehrere Jahre. Das Signal ist jedes Jahr zur fast gleichen Uhrzeit zu sehen. Der Sprung von 2015 auf 2016 und von 2019 auf 2020 kann durch die Schaltjahre begründet werden.

Die regelmäßige Verschiebung des Signals ist mit dem Unterschied zwischen siderischem und solarem Tag zu erklären. Die Abweichung zwischen dem siderischen und solaren Tag entsteht durch die Erdrevolution und die gleichzeitige Rotation um die Sonne. Der siderische Tag beschreibt die Zeitspanne, die die Erde benötigt, um eine volle Umdrehung relativ zu einem Fixstern zu vollziehen (siehe Abbildung 4.4, Position 1). Diese Zeit entspricht ca. 23 h und 56 min. Der solare Tag hingegen ist die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sonnenhöchstständen. Die Erde muss sich ein kleines Stück weiterdrehen, damit die Sonne ihren Zenit erreichen kann und wieder denselben Punkt am Himmel erreicht (siehe Abbildung 4.4, Position 2). Daher ist der solare Tag im Mittel um vier Minuten länger als der siderische Tag (Fiedler, 2024, s. 12; Fraknoi et al., 2022, s. 111f.).

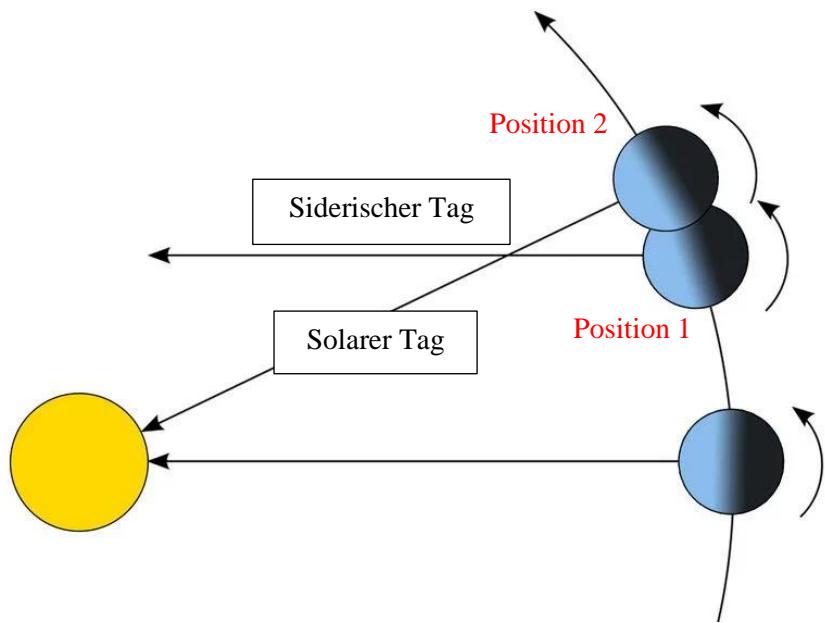


Abbildung 4.4 Die Grafik visualisiert den Unterschied zwischen einem solaren Tag und einem siderischen Tag. Position 1 verwendet einen Fixstern als Bezugspunkt und Position 2 die Sonne.

Quelle: verändert nach TU Wien (“Der kürzeste Tag des Jahres,” 2024)

Dieses Verhalten erklärt die zeitliche Verschiebung des Signals und beweist, dass es sich um einen Fixstern handelt, der das Sichtfeld des Spektrometers jeden Tag durchquert. Aus den astronomischen Daten und den Messungen von GRIPS 15 kann das Signal dem roten Überriesen Antares zugeschrieben werden. Der Stern Antares kreuzt zu den beobachteten Zeiten den Zenitwinkel von 45 ° Nord in der das Spektrometer ausgerichtet ist.

4.2 Spektrale Form

Als nächstes folgt die Untersuchung der spektralen Form des Sterns und der Beeinflussung auf das OH-Spektrum. Durch das Ergebnis aus 4.1 ist bekannt, dass der Stern durch das Sichtfeld wandert und nur zu diesem Zeitpunkt zu sehen ist. Die Idee ist es nun, das Spektrum während der Durchquerung zu analysieren. Dazu werden sechs Spektren untersucht (siehe Abbildung 4.5): vor Eintreten des Sterns in das Sichtfeld (A), während des Eintretens (B), zum Zeitpunkt der höchsten Intensität (C), zum zentralen Zeitpunkt der Passage (D), während des Austretens (E) und nach Verlassen des Sichtfelds (F).

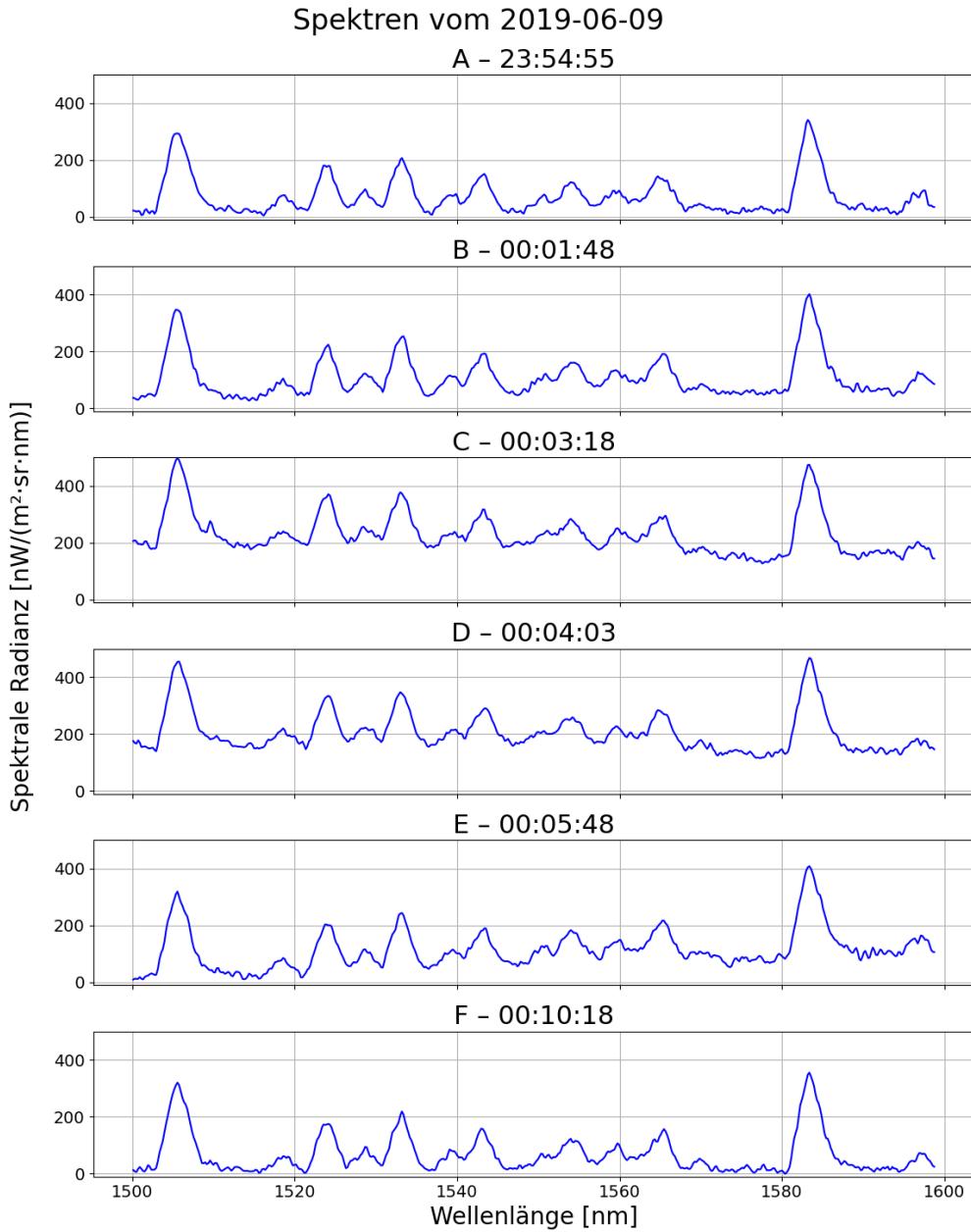


Abbildung 4.5 Die Intensität des Untergrunds steigt während der Durchquerung des Sterns im gesamten Spektrum an. In den Diagrammen A und F ist der Stern nicht zu sehen. Im Diagramm B nimmt die spektrale Radianz über den gesamten Wellenlängenbereich zu. Während des Intensitätsmaximums bei Punkt C erhöht sich die spektrale Radianz auf $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Das Spektrum der OH-Emission bleibt unverändert.

Die Strahlung des Sterns wird von der Detektorkamera erfasst. Die Erscheinung weist keine spektralen Grundzüge auf, da das Signal im gesamten Wellenlängenbereich in etwa gleichstark präsent ist. Es handelt sich um ein breitbandiges Signal und nicht um eine spektrale Linie, die das OH-Spektrum verändert. Das breitbandige Signal wird typischerweise dem Untergrund zugeordnet und ignoriert. Dies erklärt auch, warum es so lange unentdeckt blieb. Der Stern kann demnach nicht auf seine spektralen Eigenschaften analysiert werden. Der Star- und Endpunkt der Signaldauer lässt allerdings berechnen.

4.3 Signaldauer

Die Signaldauer beschreibt die Zeit, die der Stern braucht, um das Sichtfeld zu durchqueren. Ist die exakte Dauer bekannt, kann der Öffnungswinkel des Parabolspiegels berechnet werden. Die erste Aufgabe ist es, die Signaldauer möglichst genau zu bestimmen. Die Länge des Sternsignals entspricht der Zeitspanne zwischen Signalstart und Signalende. Dazu werden die Level-1A-Daten in den vier Untergrundkanälen über die Zeit dargestellt und die Diagramme analysiert. Ohne Sternsignal ist ein Untergrundrauschen zu erkennen. Sobald der Stern im Sichtfeld erscheint, steigt die Intensität. Aufgrund der Belichtungszeit von 15 s kann der Eintritt des Signals mit einer Unsicherheit von $\pm 7,5$ s berechnet werden. Das Signalende wird über dieselbe Methode bestimmt.

Die Start- und Endzeitpunkte sind in den Diagrammen von Abbildung 4.6 mit der roten bzw. blauen Linie markiert. Für die ersten drei Kanäle tritt der Stern zum gleichen Zeitpunkt auf. Bei Kanal 4 weichen die Zeitpunkte von den anderen Kanälen ab. In den Kanälen 1, 2 und 3 beträgt die Signaldauer ca. 4 min. In Kanal 4 sind es 5 Minuten. Daraus lässt sich ableiten, dass bei guter Signalstärke die Sichtbarkeit des Sterns nicht unter 4 min liegt. Die Verrechnung von Kanal 4 mit der Unsicherheit von $\pm 7,5$ s, ergibt die maximale Signallänge von 5 min und 15 s. Diese beiden Zeiten bilden die Berechnungsgrundlage für den Öffnungswinkel.

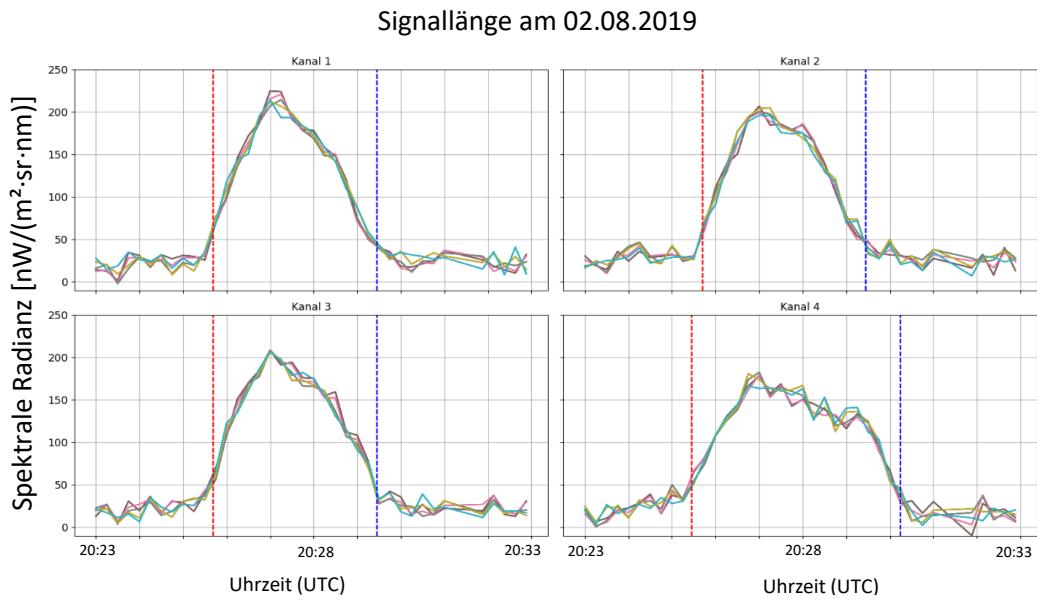


Abbildung 4.6 Berechnung der Signallänge von Antares. Die vier Diagramme repräsentieren die Kanäle. Die fünf Linien, die in jedem Diagramm zu sehen sind, entsprechen den Wellenlängen, aus denen der jeweilige Kanal besteht. Die rot gestrichelte Linie markiert den Startzeitpunkt und die Blaue den Endzeitpunkt. Des Weiteren wird deutlich, dass die Signaldauer in Kanal 4 länger ist.

Die Erde dreht sich innerhalb von 23 h und 56 min um ihre eigene Achse, das entspricht 1.436 min pro 360° (s.o.). 1° entspricht somit 0,251 min. Ist der Stern für 4 min zu sehen, hat der Parabolspiegel einen Öffnungswinkel von knapp einem Grad. Für Kanal 4 und der maximalen Zeit von 5 min und 15 s, entspricht das einen Öffnungswinkel von $1,3^\circ$.

Die Ergebnisse können mit denen von Schmidt (2016) verglichen werden. In der Arbeit wurde der Öffnungswinkel von GRIPS 16 im Labor vermessen. Da es sich um den gleichen Parabolspiegel wie bei GRIPS 15 handelt, können die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Das von Schmidt (2016) angewandte Messverfahren überprüft den Akzeptanzbereich, in dem einfallendes Licht noch effektiv auf den Detektor fällt (siehe Abbildung 4.7). Der Öffnungswinkel wird über den Bereich bestimmt, an dem die relative Empfindlichkeit noch mindestens bei 50 % liegt. Bei Schmidt (2016) liegt diese bei etwa $0,75^\circ$. Dieser Wert muss verdoppelt werden, da der Öffnungswinkel die gesamte Breite des Akzeptanzbereichs umfasst, also den Bereich $-0,75^\circ$ bis $+0,75^\circ$. Daraus ergibt sich die Größe des effektiven Öffnungswinkels von ca. $1,5^\circ$.

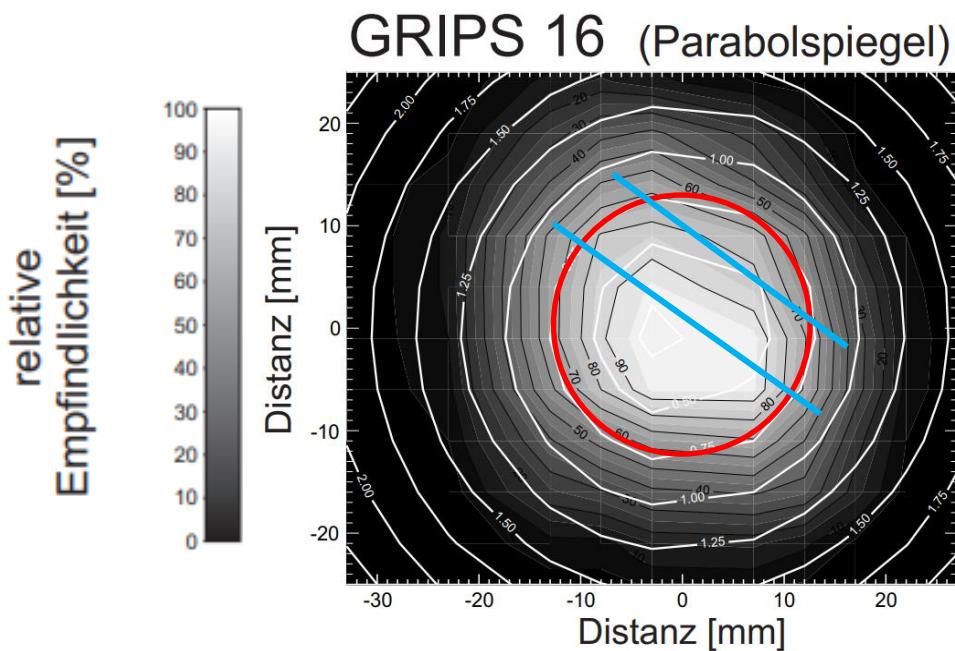


Abbildung 4.7 Vermessung des Akzeptanzbereichs mit Parabolspiegel. Die veränderte Grafik nach Schmidt (2016) kann aufgrund gleicher Bauweise auf GRIPS 15 übertragen werden. Je dunkler der Hintergrund, desto kleiner wird die relative Empfindlichkeit. Schmidt (2016) hat einen effektiven Öffnungswinkel von $1,5^\circ$ bei 50 % relativer Empfindlichkeit bestimmt. In x- und y-Richtung kreuzt die $0,75^\circ$ Linie (rot) diese Grenze. Die zwei blauen Linien stellen eine unterschiedliche Passage durch das Sichtfeld dar.

Die Berechnung des Öffnungswinkels durch die Signaldauer des Sterns fällt mit ca. $1,3^\circ$ (5 min und 15 s) geringfügig kleiner aus. Der Unterschied kommt daher, dass der Stern nicht zwangsläufig den Mittelpunkt des Sichtfelds durchkreuzt, sondern wie eine Sekante das Sichtfeld passieren kann (siehe blaue Linien in Abbildung 4.7). Dadurch ist die Strecke

durch das Sichtfeld und die Signaldauer von Antares kürzer. Da es nicht möglich ist, die Passage des Sterns durch das Sichtfeld nachzuweisen, kann an dieser Stelle die Zusatzforschungsfrage (siehe Kapitel 2.3) über die Bestimmung des Öffnungswinkels beantwortet werden: eine Mindestgröße kann berechnet werden, allerdings verhindert dieser Faktor eine präzise Messung des Öffnungswinkels.

4.4 Intensität

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse für die Intensität von Antares vorgestellt und interpretiert. Antares wurde in den Monaten April, Juni und August über die Jahre untersucht. Die Monate wurden gezielt gewählt, um den Stern während verschiedenen Zeiträumen im Jahr zu analysieren. In Kapitel 3.3 wurde erläutert, wie die Intensität des stellaren Signals berechnet wird.

Für die Intensitätsberechnung wurden nur die Tage mit guter Signalsichtbarkeit verwendet. Dazu wurde für jeden Tag ein Diagramm nach dem gleichen Schema, wie in Abbildung 3.3, erstellt (siehe Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9). Aus diesen Diagrammen ist ablesbar, ob und mit welcher Intensität das Signal in einer Messperiode zu sehen war. Die Analyse des Signals mehrerer Nächte ergibt, eine spektrale Radianz von ca. $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ($\pm 20 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$) bei guter Sichtbarkeit.

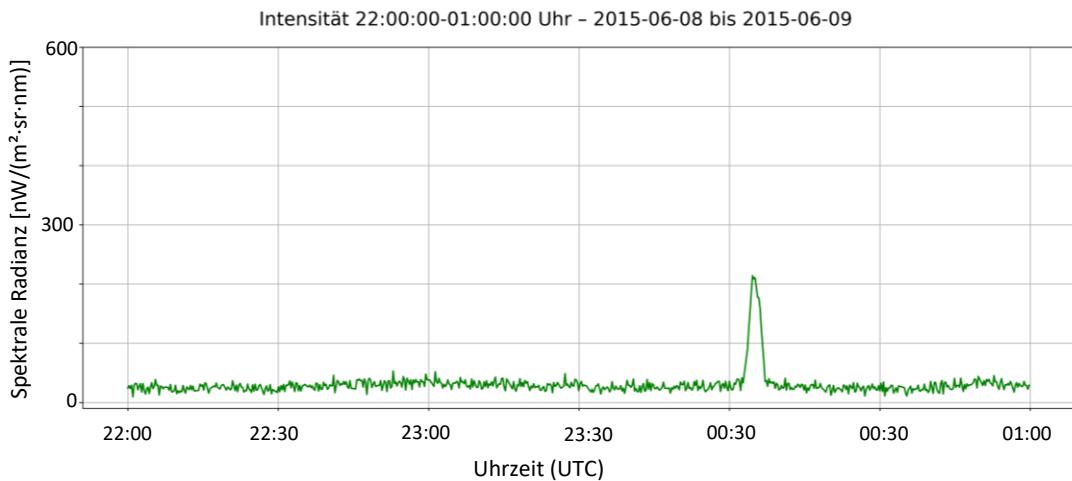


Abbildung 4.8 Signalstärke von Antares in der Nacht vom 08.06. auf den 09.06.2015. Antares ist um 00:30 Uhr zu sehen. Die spektrale Radianz steigt auf über $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Der Untergrund stellt ein konstantes Rauschen dar und kann vom Signal abgezogen werden. Aufgrund guter Messbedingungen eignen sich solche Tage optimal für die Intensitätsberechnung.

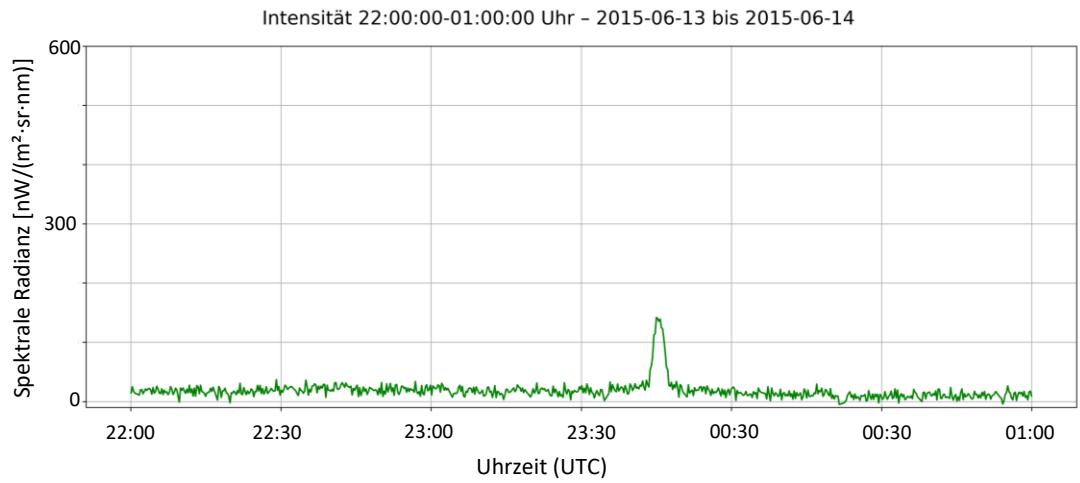


Abbildung 4.9 Signalstärke von Antares in der Nacht vom 13.06. auf den 14.06.2015. Das Signal von Antares ist deutlich zu sehen aber im Vergleich zum Signal aus Abbildung 4.8 schwächer. Die maximale spektrale Radianz dieser Messperiode erreicht ca. $150 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Solche Werte treten häufig auf, wobei eine Drift der Instrumentenempfindlichkeit ausgeschlossen werden kann. Diese Werte werden daher nicht in die Intensitätsberechnung aufgenommen.

Störfaktoren, die das Signal verschlechtern, sind Mondlicht und Bewölkung. Sie können das Sternsignal nächtelang überlagern oder verdecken. Für die Tage, an denen das Signal gut aufgenommen wurde, wird ein Mittelwert pro Kanal berechnet, der aus allen guten Tagen eines Monats besteht. In Tabelle 1 ist zu sehen wie viele Nächte pro Monat und Jahr für die Berechnung verwendet wurden.

Tabelle 1 Anzahl der verwendeten Tage pro Jahr

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
April	0	7	5	2	8	4	5	3	2	2	0
Juni	0	6	8	8	4	6	6	4	3	1	0
August	0	9	3	5	5	8	9	7	5	0	0

Wie oft das Signal in einem Jahr im jeweiligen Monat zu sehen ist, variiert stark. Die Angaben in der Tabelle beziehen sich auf die Tage an denen die spektralen Radianz Werte von $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ mit 10-prozentiger Schwankung aufweist. Im Juni 2016 ist das Signal beispielsweise an 20 Tagen zu sehen, für die Intensitätsanalyse eignen sich nur acht Tage. Im April 2023 kann es an sechs Tagen identifiziert werden, von denen sich zwei Tage für die Analyse eignen.

Die folgenden Diagramme repräsentieren die Intensität des Sterns an einen Monat über mehrere Jahre. Aus ihnen lassen sich drei Punkte vergleichen. Erstens der Unterschied der

Intensitäten zwischen den Kanälen, zweitens der Intensitätsverlauf von Jahr zu Jahr und drittens die Unterschiede zwischen den drei Monaten April, Juni und August. Falls die Daten über die Jahre einen negativen oder positiven Trend verfolgen, könnte das die Folge einer Drift der Empfindlichkeit des Instruments sein. Leichte Schwankungen sind schwieriger zu begründen. Mögliche Ursachen können beispielsweise Helligkeitsveränderungen von Antares, kleine Veränderungen des Untergrundsignals oder atmosphärische Gründe, wie Bewölkung sein.

Die Diagramme beinhalten zwei Arten von Fehlerbalken. Die bunten Fehlerbalken beschreiben die Schwankung des Untergrunds u_1 und u_2 . Je kleiner dieser Fehlerbalken, desto genauer wurde der Untergrund u berechnet und desto genau ist die Berechnung der Signalstärke von Antares. Der schwarze Fehlerbalken entspricht der 10-prozentigen Schwankung der Signalstärke. Dieser Fehlerbalken umschließt die Kanäle 1 - 3.

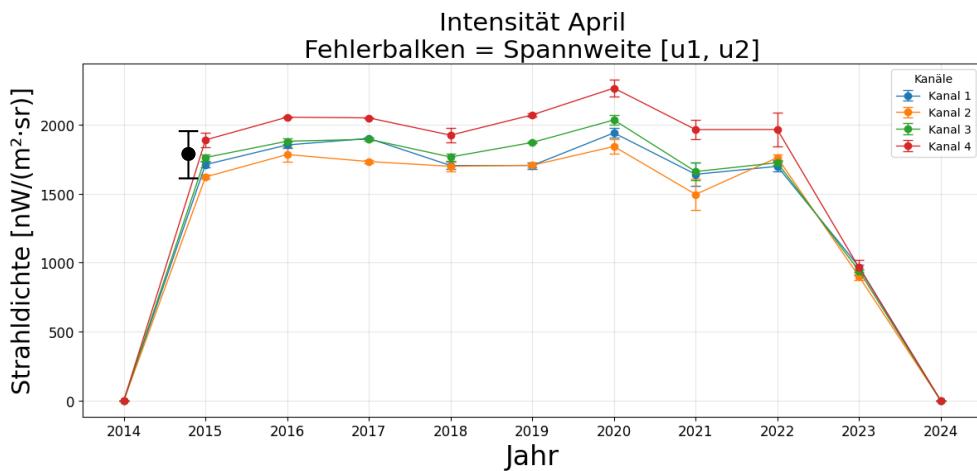


Abbildung 4.10 Intensitätsentwicklung für April über die Jahre 2014 bis 2024 (Kanal 1-4). Die Jahresmittel liegen mit Ausnahme von 2014, 2023 und 2024 überwiegend im Bereich von 1500 bis 2250 $nW\ m^{-2}\ sr^{-1}$. 2023 ist ein Rückgang auf etwa die Hälfte der sonst typischen Werte zu verzeichnen. Die Kurven der Kanäle 1 und 3 liegen nahe beieinander. Sie überschneiden sich in manchen Jahren, wie z.B. Kanal 1 und 2 in den Jahren 2018, 2019 und 2022 oder Kanal 1 und 3 in den Jahren 2015, 2016 und 2021. Die Spannweite, der verwendeten Tage reicht von $n = 2$ Tage im Jahr 2022 und 2023 bis auf $n = 8$ Tage, im Jahr 2018. Kanal 4 zeigt deutlichere Abweichungen und liegt von 2015 bis 2022 immer oberhalb der anderen Kanäle.

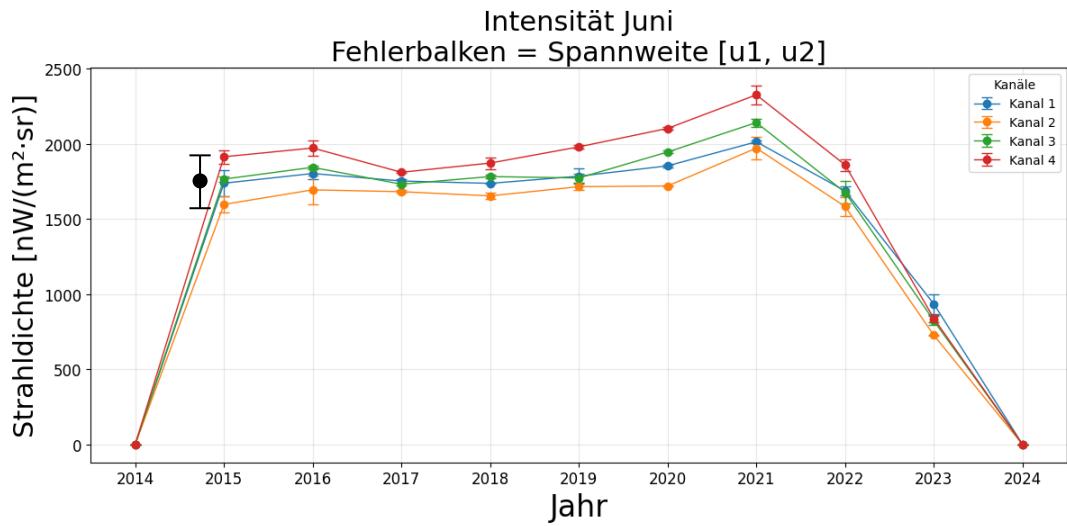


Abbildung 4.11 Intensitätsentwicklung für Juni über die Jahre 2014 bis 2024 (Kanal 1 - 4). Die vier Kanäle verhalten sich ähnlich zu den Messungen im April. Die meisten Werte befinden sich zwischen 1500 und 2000 $nW\ m^{-2}\ sr^{-1}$ und ein Rückgang ist 2023 zu verzeichnen. Für die Jahre 2014 und 2024 ist kein Signal von Antares aufgenommen worden.

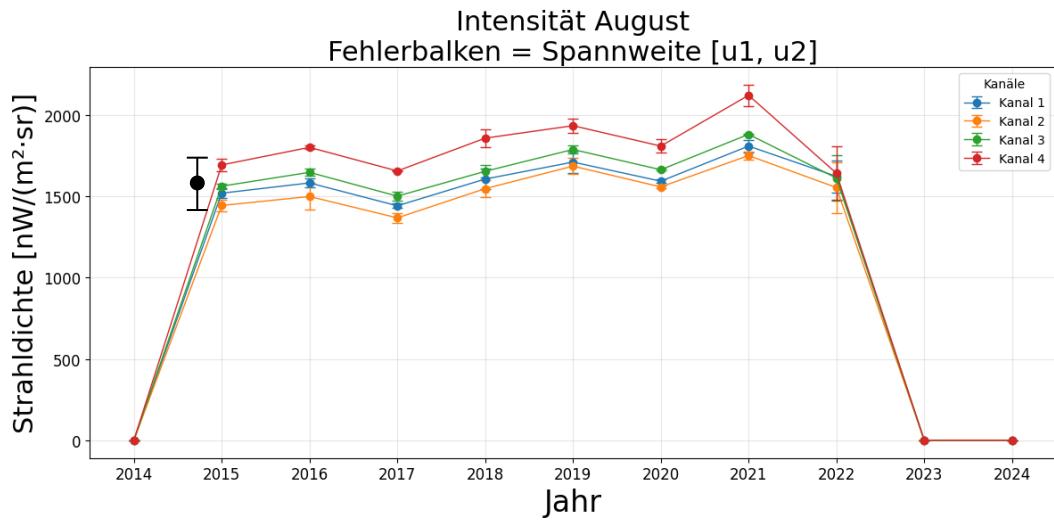


Abbildung 4.12 Intensitätsentwicklung für August über die Jahre 2014 bis 2024 (Kanal 1 - 4). Die Intensitäten variieren und zeigen kein deutliches Muster auf. Auffällig ist die Abwesenheit des Signals im Jahr 2023.

Allgemein kann festgehalten werden, dass sich die Intensität von Antares zwischen 2015 und 2022 gut berechnen lassen. Durchschnittlich liegt die Strahldichte zwischen 1500 und 2000 $nW\ m^{-2}\ sr^{-1}$. Auffälligkeiten sind kleine Schwankungen in den Jahren 2015 bis 2022, eine konstant höhere Intensität in Kanal 4 und die Abwesenheit in den Jahren 2014 und 2024.

4.5 Intensität von Antares zwischen 2015 und 2022

Antares konnte in den Daten von GRIPS 15 über sieben Jahre lang gut nachgewiesen werden. Die Ergebnisse liefern Werte, die relativ konstant sind. Dennoch sind kleine Schwankungen zu verzeichnen, deren Ursache unklar ist. Außerdem ist die Signallänge in Kanal 4 höher als in den drei anderen Kanälen, wodurch die, über die Zeit integrierte Intensität, in Kanal 4 größer ist. Dieses Muster passt nicht zu einer Drift der Empfindlichkeit von GRIPS 15, da es keinen Trend in eine bestimmte Richtung verfolgt. Stattdessen schwankt die Intensität auf Zeitskalen von Monaten und Jahren. Der Grund für die Schwankungen muss demnach in der Quelle des Signals, also an Antares selbst oder in der Interaktion zwischen Signal und Atmosphäre, liegen.

Zunächst wird die Quelle betrachtet. Antares ist ein roter Überriese (Red Supergiant, RSG), der sich im Endstadium seines Lebenszyklus befindet (Ohnaka et al., 2013, s. 1). RSG entwickeln sich aus Sternen mit einer Masse von mehr als neun Sonnenmassen (Ohnaka et al., 2013). Nachdem der Brennstoffvorrat im Inneren des Sterns aufgebraucht ist, beginnt der Stern zu expandieren, seine Oberfläche ab und färbt sich rot. Durch diesen Prozess zählen sie zu den hellsten und größten Sternen im Universum (Ohnaka et al., n.d., s. 1). RSG sind außerdem sogenannte halbregelmäßig veränderliche Sterne, weil sie von Helligkeitsveränderungen betroffen sind (Stothers, 2010, s. 1171). In der Arbeit von Stothers (2010) werden zwei Perioden von Antares erwähnt, in denen die Helligkeit schwankt. Die kürzere Periode beträgt in etwa 300 Tage und entsteht durch Pulsationsprozesse in den äußeren Schichten. Die zweite Periode beträgt ca. 1700 Tage und wird durch Konvektionsprozesse im Inneren des Sterns verursacht. Nachdem die Intensitätsschwankungen bereits zwischen April und Juni sowie Juni und August auftreten, können die genannten Perioden aus der Arbeit von Stothers (2010) nicht der Grund für die gemessenen Intensitätsschwankungen sein. Demnach muss die Ursache der Schwankungen in einer anderen Einflussgröße liegen.

In Bezug auf Tabelle 1 wurde gezeigt, dass nur bestimmte Tage für die Berechnung ausgewählt wurden. Der Grund dafür ist unter anderem, dass eine zu starke Bewölkung die Messung des Signals beeinflusst. An der Neumayer-Station III werden alle drei Stunden Wetterdaten erhoben - unter anderem ein Parameter namens *total cloud amount*, der angibt, wie stark die Bewölkung zu einer bestimmten Uhrzeit ist. Bei klarem Himmel beträgt der Wert 0, bei vollständiger Bewölkung 8. Die Analyse der Wolkenbedeckung zeigt, dass die verwendeten Tage zum Zeitpunkt des Signals Werte von 0 oder 1 aufweisen. Dies bestätigt einerseits, dass die Intensitätsberechnungen an überwiegend klaren Tagen durchgeführt wurden, andererseits aber auch, dass Tage mit leichter Bewölkung in die Auswertung einbezogen wurden. In Kapitel 4.4 wurde zudem erwähnt, dass bei den verwendeten Tagen

Differenzen von etwa $20 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ auftreten. Diese 10 % Schwankung kann nun unter Verwendung der Wetterdaten von Schmithüsen (2020) auf Unterschiede in der Bewölkung, beziehungsweise auf Variationen der Wolkenbedeckung, zurückgeführt werden.

Tabelle 2 Bewölkungsgrad an der Neumayer-Station III an ausgewählten Tagen

Datum	Uhrzeit (UTC)	Total cloud amount
08.06.2015	21:00	1
09.06.2015	00:00	1
13.06.2015	21:00	6
14.06.2015	00:00	3
07.06.2016	21:00	3
08.06.2016	00:00	1
09.06.2016	21:00	1
10.06.2016	00:00	1

Quelle: verändert nach (Schmithüsen, 2020), Download am 24.10.2024

Tabelle 2 zeigt den Wolkenbedeckungsgrad in der rechten Spalte an vier unterschiedlichen Nächten. Die ersten beiden Tage sind die gleichen Tage wie in Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9. Die Signalstärke war am 09.06.2015 gut, weil der Bewölkungsgrad um Mitternacht bei 1 lag. Am 13.06.2015 kurz vor 00:00 Uhr ist das Signal schwächer zusehen, weil der Bewölkungsgrad zu diesem Zeitpunkt höher war. Um 21 Uhr lag er bei 6 und drei Stunden später bei 3. Der Stern war zusehen, das Signal wurde wahrscheinlich durch die Bewölkung abgeschwächt.

An den beiden anderen Tagen wurde um Mitternacht jeweils ein Bewölkungsgrad von 1 erfasst. Das bedeutet das bis zu 1/8 (12,5 %) bis 2/8 (25 %) des Himmels bewölkt waren. Aus Abbildung 4.13 geht hervor, dass sich die Werte trotzdem unterscheiden. Das verstärkt die Vermutung, dass die Bewölkung einen starken Einfluss auf die Sichtbarkeit und Intensität des Signals hat. Bei der Verwendung des Signals zur Erkennung einer Drift der Empfindlichkeit müssen die Wetterdaten daher beachtet werden, damit es zu keinen Verfälschungen in der Intensitätsberechnung kommen kann.

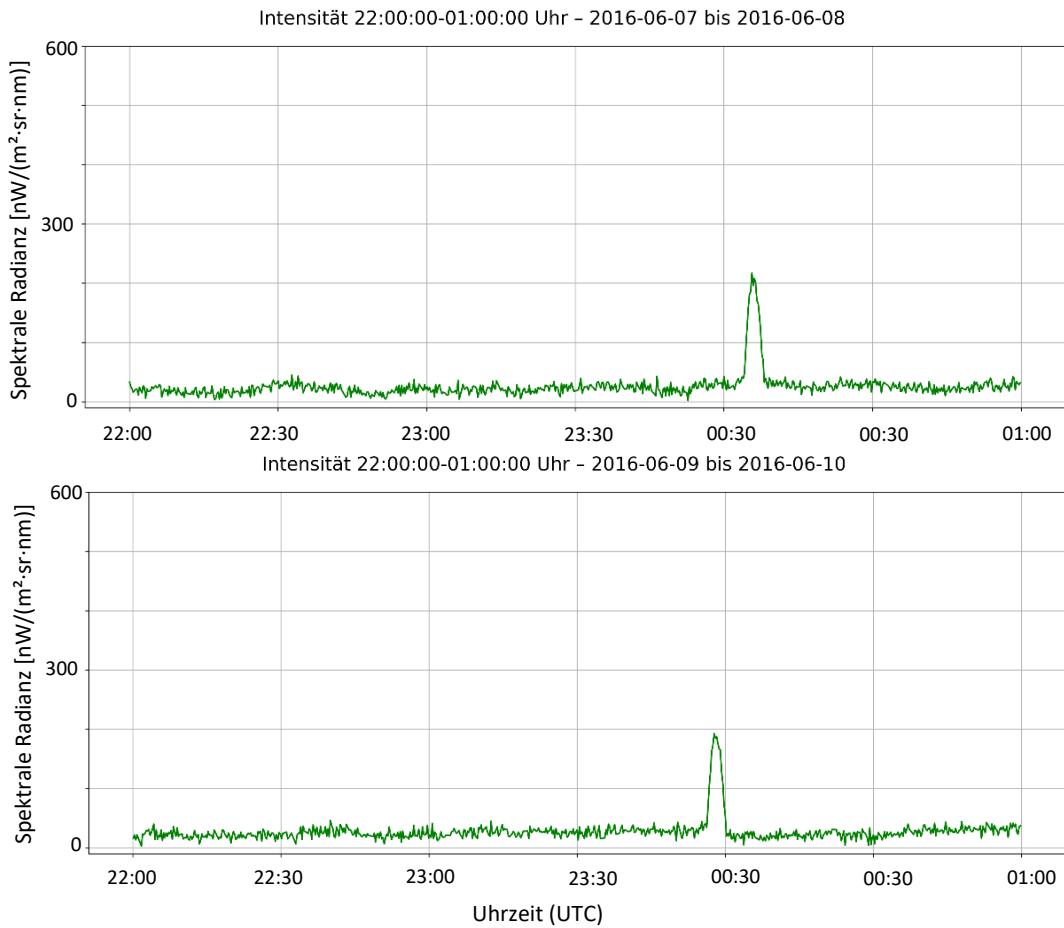


Abbildung 4.13 Signalstärke am 08.06. und 10.06.2016. An beiden Tagen ist die Signalstärke gut, unterscheidet sich aber leicht voneinander. Am 08.06. ist das Maximum leicht über $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ und am 10.06. knapp unterhalb.

Die Beobachtung aus Abbildung 4.13 erklärt die leichten Schwankungen der Intensität zwischen den Jahren 2015 und 2022 und schließt zu dem eine Driften der Empfindlichkeit des Instrumentes aus. Kanal 4 weist im Vergleich zu den anderen drei Kanälen durchgehend höhere Intensitäten und eine längere Signaldauer auf, was sich mit der spektralen Transmission der Atmosphäre erklären lässt. Im Wellenlängenbereich zwischen 1,5 und 1,6 μm befindet sich ein atmosphärisches Fenster was schmale Absorptionslinien von Wasser (H_2O) enthält (Schmidt, 2016, s. 49). In der Region von 1,5 μm liegen einzelne H_2O -Linien, deren Stärke von der zeitlichen H_2O - Konzentration während der Beobachtung abhängig ist. Da die Kanäle 1 bis 3 über solchen H_2O - Linien liegen, während Kanal 4 (1593 - 1594 nm) in einer „klaren“ Region des Fensters liegt, erklärt dies, warum Kanal 4 größere Intensitäten liefert.

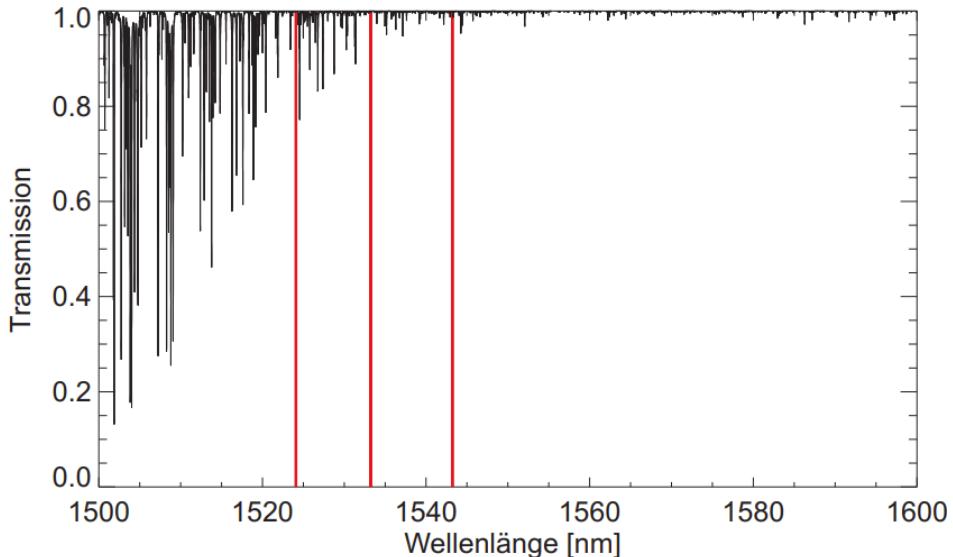


Abbildung 4.14 Transmission von Wasserdampf im Wellenlängenbereich von 1500 bis 1600 nm verändert nach Schmidt (2016). Die roten Linien zeigen die Wellenlängen, an denen die Temperatur des OH-Airglows berechnet wird, welche nicht berücksichtigt werden. Der Fokus liegt auf der atmosphärischen Transmissivität unter Berücksichtigung niedriger, arktischer Wasserdampfkonzentration. Die schwarzen Absorptionslinien zeigen einen deutlichen Einfluss in der Region von 1500 nm bis 1520 nm.

Die längere Signaldauer in Kanal 4 kann nicht durch atmosphärische Transmissionseffekte erklärt werden. Eine veränderte Transmission durch H_2O würde die Intensität bei einem gegebenen Zeitpunkt beeinflussen, nicht aber zwangsläufig die Zeitspanne, in der das Signal sichtbar ist. Die in den Daten beobachtete Signaldauer in Kanal 4 deutet daher auf zusätzliche Ursachen hin, die gegebenenfalls durch instrumentelle Effekte entstehen können, die sich im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend klären ließen. Die spektrale Emissionskurve von Antares wurde anhand seiner Temperatur berechnet. Ihr Maximum liegt bei deutlich kürzeren Wellenlängen. Demnach kann sie die längere Präsenz in Kanal 4 nicht erklären.

4.6 Neumayer-Station III

2014 und 2024 konnte das Signal in keinem Monat nachgewiesen werden. Es wurde festgestellt, dass der Grund dafür nicht in einer Drift der Empfindlichkeit von GRIPS 15 liegt, sondern in der langsamen Drift der gesamten Neumayer-Station III. Die Station befindet sich am Rand des Ekström-Schelfeises und bewegt sich infolge des stetigen Eisflusses kontinuierlich Richtung Norden (“Neumayer-Station III - AWI,” n.d.). Das jährliche Gefrieren und Schmelzen von Eis bewirkt eine langsame aber messbare Positionsveränderung der gesamten Station (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Koordinaten der Neumayer-Station III

Datum	Breitengrad	Längengrad
14.12.2023	S70.67402°	W8.28333°
08.10.2024	S70.67272°	W8.28410°
19.01.2025	S70.672296°	W8.284521°

Quelle: persönliche Kommunikation mit Lukas Weis, Juli 2025

Die Verschiebung entspricht ca. 30 bis 50 cm pro Tag, was einer jährlichen Veränderung der Position um rund 150 Meter pro Jahr entspricht. Diese Bewegung führt dazu, dass sich auch die Ausrichtung der Instrumente auf dem Stationsgelände über die Jahre leicht verändert. Auf die Sichtbarkeit von Antares bezogen, bedeutet das, dass sich der Stern in den Jahren 2015 bis 2023 im Sichtfeld von GRIPS 15 befand, während er 2014 noch außerhalb und ab 2024 wieder außerhalb des Sichtfelds lag. Die Analyse der Intensitätsdaten bestätigt dieses Verhalten. Ab 2023 ist eine deutliche Abnahme der Signalintensität erkennbar (siehe Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11). Dies deutet auf eine langsame Veränderung der Blickrichtung des Spektrometers hin, wodurch Antares das Sichtfeld zunehmend am Rand durchquert. Mit der fortschreitenden Drift der Station verlagerte sich der Beobachtungsbereich so weit, dass Antares ab August 2023 vollständig außerhalb des Sichtfelds lag und nicht mehr nachweisbar war (siehe Abbildung 4.15).

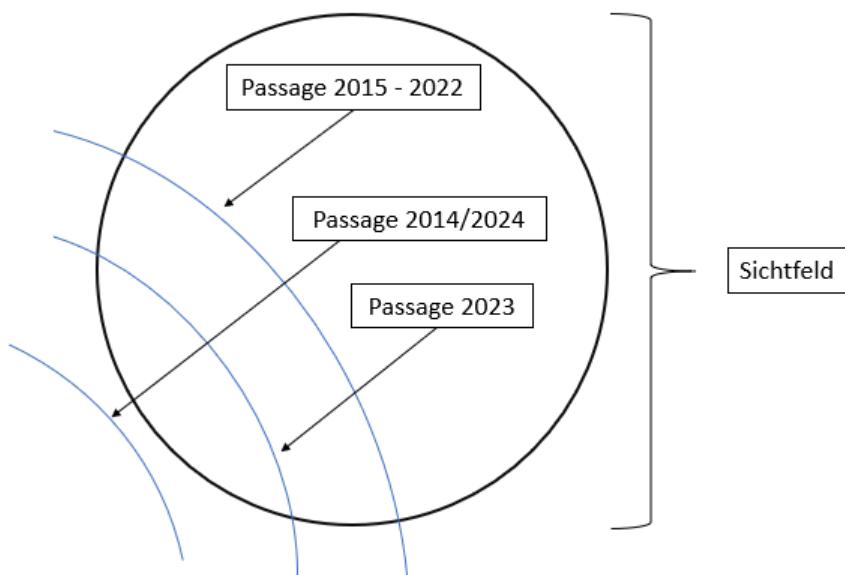


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung der Passage von Antares durch das Sichtfeld von GRIPS 15. Der exakte Pfad, den der Stern durch das Sichtfeld zurücklegt, lässt sich nicht nachverfolgen.

Hinzukommt, dass durch die Drift der Station nicht nur die Intensität, sondern auch die Signaldauer abnimmt (siehe Abbildung 4.16). Um den Grund dafür zu verstehen, wird Abbildung 4.15 nochmal herangezogen. Die Strecke, die Antares in den Jahren zwischen 2015 bis 2022 im Sichtfeld zurückgelegt hat, ist 2023 kürzer. Dadurch nimmt die Zeit, die Antares braucht um das Sichtfeld zu durchqueren, ab und die Intensität ist dementsprechend niedriger als zuvor.

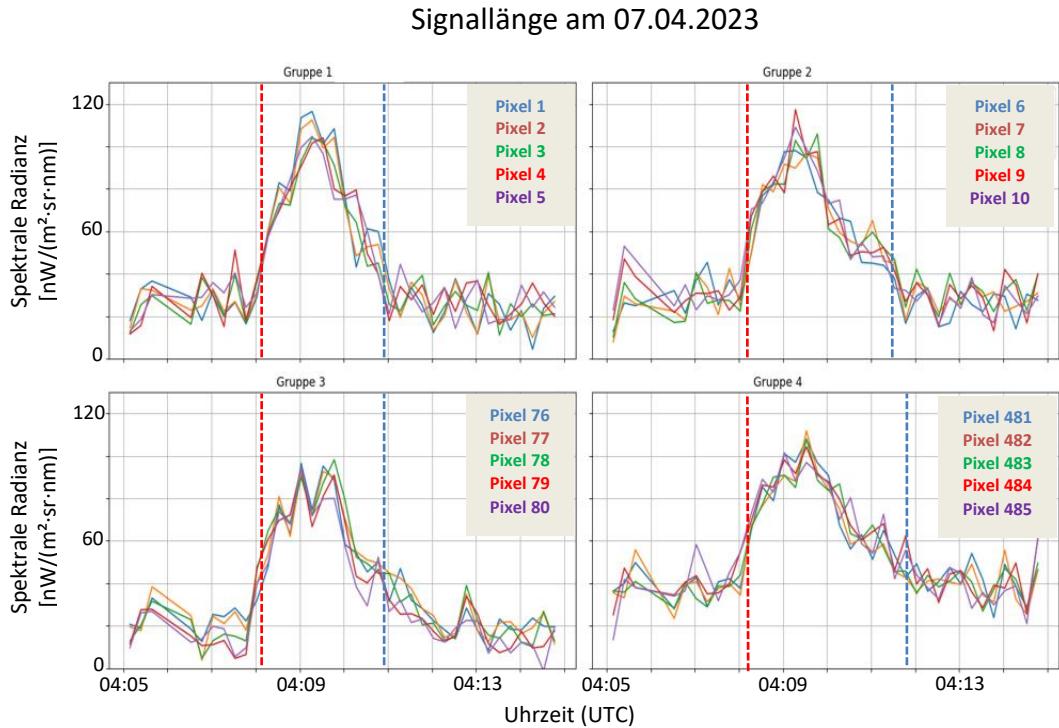


Abbildung 4.16: Die Signallänge ist 2023 im Vergleich zu den Jahren zuvor kleiner. Am Abstand zwischen roter und blauer Linie ist zu erkennen, dass Antares nur noch 3 bis 4 min zu sehen ist. In Abbildung 4.6 ist diese Länge bei ca. 4 - 5 min und die Intensitätsmaxima sind im Vergleich um ca. $100 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ größer.

Daraus lässt sich schließen, dass die Sichtbarkeit des stellaren Signals maßgeblich durch die Drift der Neumayer-Station III bestimmt wird. Der Zeitraum von 2015 bis 2022 stellt somit ein zufälliges Zeitfenster dar, in dem die Konstellation von Station, Instrument und Stern optimal war, um das Signal von Antares aufzuzeichnen. Dadurch konnten in diesem Zeitraum die Eigenschaften von Antares gut charakterisiert werden. Aufgrund der Drift der Station eignet sich das Sternsignal nicht, um eine langfristige Veränderung der Instrumentenempfindlichkeit von GRIPS 15 zu untersuchen.

4.7 GRIPS 19

Aus der Analyse des stellaren Signals in GRIPS 15 geht hervor, dass sich das Signal eindeutig einem Stern zuordnen lässt. Die Drift der Neumayer-Station III verhindert eine dauerhafte Anwendung zur instrumentellen Kalibrierung bei GRIPS 15, dennoch können stellare Signaturen in GRIPS-Spektrometern grundsätzlich identifiziert werden. Vor diesem Hintergrund wurde geprüft, ob ähnliche Signale in anderen GRIPS-Instrumenten auftreten, deren Standorte - im Vergleich zur Neumayer-Station III - keine Positionsverlagerung erfahren. Dazu wurden Instrumente ausgesucht, für die die gleiche Prozessierungsversion, d.h. Level-1A-Daten, verfügbar sind. Die ausgewählten Geräte sind GRIPS 19 und GRIPS 8, die an der Europäischen Südsternwarte in Chile bzw. an der NDMC-Referenzstation UFS stehen.

Die Suche nach einem stellaren Signal erfolgt über das gleiche Prinzip, wie bei der GRIPS 15 Analyse. Dadurch konnte in den Messdaten von GRIPS 19 ein stellares Signal identifiziert werden, das sich regelmäßig verschiebt. Es stammt vom Stern Sigma Librae (σ Lib), einem Roten Riesen der Spektralklasse M (Wenger et al., 2000). Sigma Librae hat ähnliche physikalische Eigenschaften wie Antares. Das Signal konnte ebenfalls im nahen Infrarotbereich durch das GRIPS-Spektrometer erfasst werden.

In Abbildung 4.17 sind vier Messnächte zu sehen. Der Zeitraum der Aufnahmen erstreckt sich von April bis Juni. Das Signal von Sigma Librae liegt innerhalb der roten Kreise und verschiebt sich konstant um vier Minuten pro Tag. Bei GRIPS 19 lässt sich das stellare Signal nicht problemlos von Untergrund trennen. In den Diagrammen von April und Juni sind ungewöhnliche periodische Schwankungen zu sehen (siehe Abbildung 4.17). Die Schwankungen finden sich im Untergrundsignal und werden durch ein Bauteil von GRIPS 19 erzeugt. Das Spektrometer befindet sich in einem Container, der mit einer Klimaanlage ausgestattet ist. Ist die Temperatur im Container zu hoch, schaltet sich die Anlage automatisch ein und kühlt den Raum herunter. Die Klimaanlage schaltet sich wieder ab, wodurch sich der Raum erneut erwärmt und das Kühlssystem anschließend wieder anspringt. Die Temperaturschwankungen sind in den Level-1A-Daten deutlich zu sehen. Die Intensität ist ähnlich hoch, wie die des Sterns und die periodischen Schwankungen überlagern sich mit dem Sternsignal. Es gibt einzelne Tage, wie das Teildiagramm unten rechts in Abbildung 4.17, an denen das Kühlssystem nicht anspringt. Es muss beachtet werden, dass Juli ein kalter Monat auf der Südhälfte der Erde ist und die Temperaturen in dieser Nacht höchstwahrscheinlich sehr niedrig waren, weshalb das Kühlssystem nicht angesprungen ist. Solche Tage, an denen die Klimaanlage ausgeschaltet bleibt, kommen selten vor. Daher gibt es zu wenige Tage, an denen das Signal untersucht werden kann.

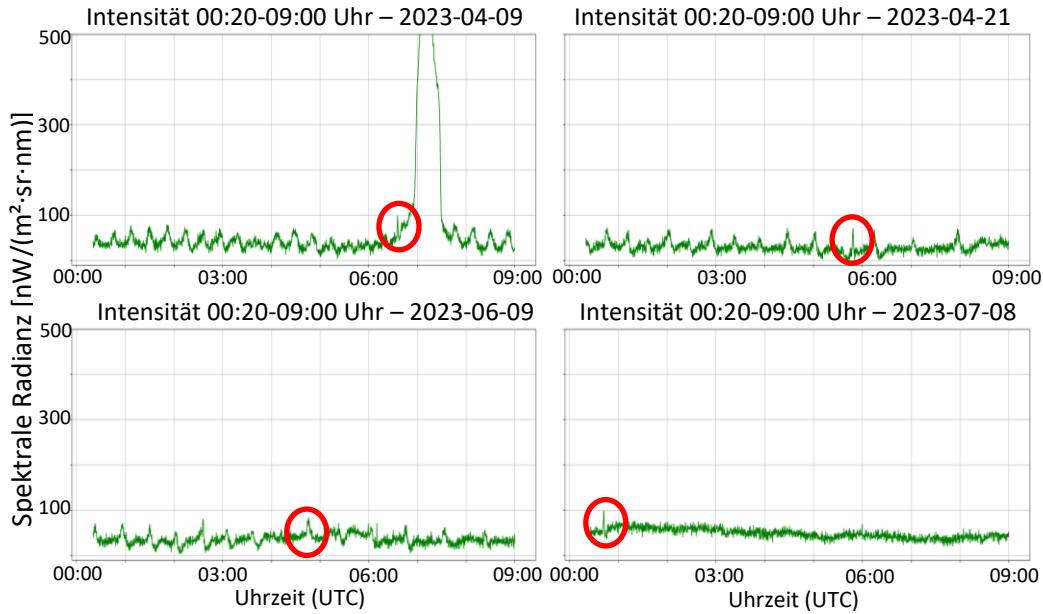


Abbildung 4.17 Die vier Teildiagramme zeigen Sigma Librae (roter Kreis), aufgenommen an vier verschiedenen Messnächten von GRIPS 19. Das Signal weist die gleiche Verschiebung wie Antares auf. Die periodischen Schwankungen entstehen durch das automatische Ein- und Ausschalten der Klimaanlage. Im ersten Bild erzeugt außerdem der Mond noch ein starkes Signal um 07:00 Uhr.

Technisch gesehen kann mit GRIPS 19 ein stellares Signal aufgenommen und über einen langen Zeitraum beobachtet werden. Das Spektrometer hat einen festen Standort und ist hoch empfindlich, den Sigma Librae (3,21 mag) ist etwa 2,3 Magnituden schwächer als der von GRIPS 15 beobachtete Antares (Wenger et al., 2000). Die spezifische Bauweise schränkt die Sternenanalyse trotz optimaler Beobachtungsbedingungen ein.

4.8 GRIPS 8

GRIPS 8 auf der UFS hat eine besondere Bedeutung, da UFS die Referenzstation des NDMC ist. Dadurch, dass GRIPS 8 ohne Parabolspiegel ausgestattet ist und einen Öffnungswinkel von 15 ° besitzt, wäre es vorteilhaft an dieser Station die Sternenkalibrierung durchzuführen. Beteigeuze, welcher ein RSG und mit einer scheinbaren Helligkeit von 0,42 mag, heller als Antares ist, kreuzt das Sichtfeld von GRIPS 8 (Wenger et al., 2000). Dies stellt gute Voraussetzungen dar, um sein Signal in den Daten zu sehen. Die Analyse jeder einzelnen Nacht, in der er das Sichtfeld passiert, ergab keine einzige Sichtung von Beteigeuze. Zu dem Zeitpunkt, an dem er erscheinen sollte, befindet sich kein kurzzeitiger Anstieg der Intensität und somit kein stellares Signal (siehe Abbildung 4.18).

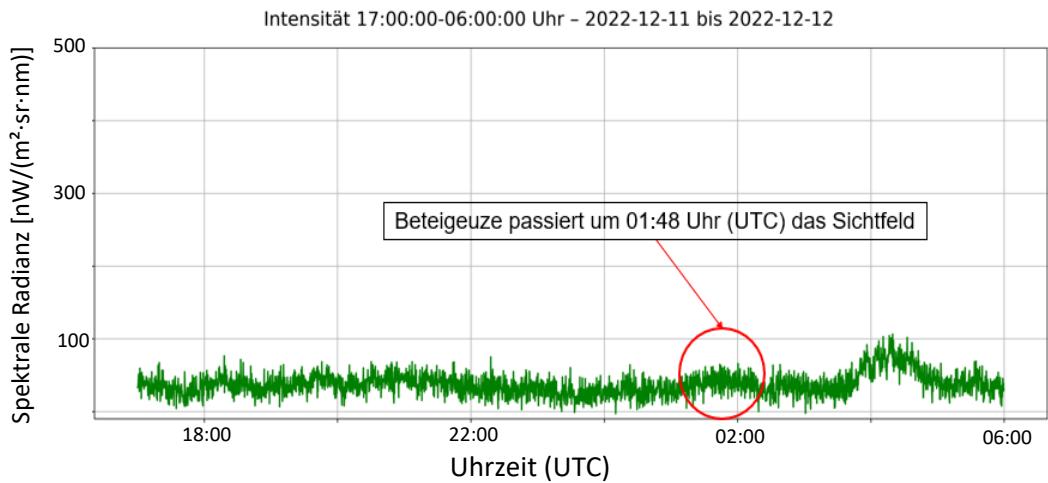


Abbildung 4.18 GRIPS 8 Untergrundsignal mit Beteigeuze im Sichtfeld. Beteigeuze ist im Winter zu sehen und passiert täglich das Sichtfeld von GRIPS 8. Mitte Dezember ist das zwischen 01:30 Uhr und 02:00 Uhr. In dem Untergrundsignal ist kein stellares Signal erkennbar.

Nachdem Sigma Librae und Antares in anderen Spektrometern sichtbar sind, müsste auch das Signal von Beteigeuze aufgezeichnet werden. Die einzige plausible Erklärung dafür ist der Aufbau von GRIPS 8 - genauer gesagt der fehlende Parabolspiegel. Bei genauerer Betrachtung des 15° - Öffnungswinkels im Vergleich zum 1° - Öffnungswinkel von GRIPS 15 zeigt sich Folgendes:

Bei GRIPS 8 stammt das Signal aus einer Fläche, die etwa 225 - mal so groß ist wie bei GRIPS 15. Daraus ergibt sich, dass die Empfindlichkeit innerhalb einer Fläche, die der Größe des Sichtfeldes von GRIPS 15 entspricht, nur $1/225$ beträgt (siehe Abbildung 4.19). Der Stern, der bei GRIPS 15 ein Signal von $200 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ erzeugt, hinterlässt in den Daten von GRIPS 8 daher lediglich ein Signal von etwa $1 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ und geht somit im Rauschen unter (siehe Abbildung 4.18.).

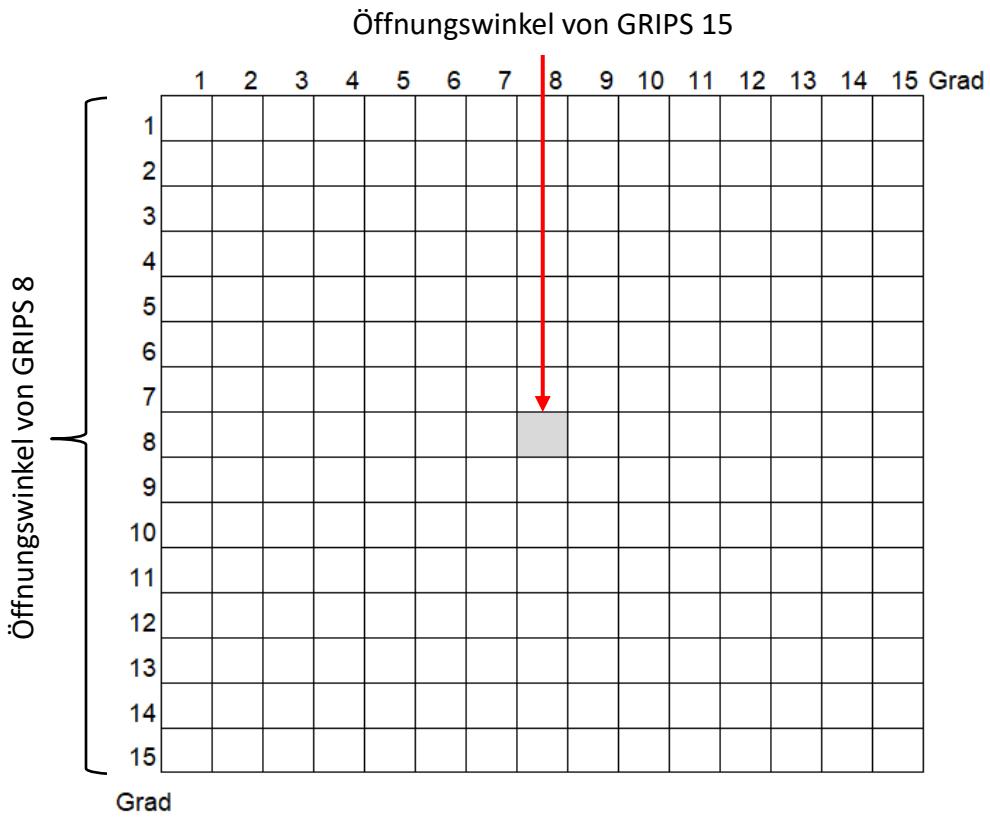


Abbildung 4.19 Größenverhältnis zwischen Sichtfeld von GRIPS 8 (ca. 15°) und GRIPS 15 (ca. $1,5^\circ$). Das graue Viereck in der Mitte ist das Sichtfeld von GRIPS 15. Das große Gitter repräsentiert die Größe des GRIPS 8 Sichtfelds und veranschaulicht das Verhältnis zwischen beiden Öffnungswinkeln. Hier wird zur leichteren Veranschaulichung mit einem Öffnungswinkel von 1° (GRIPS 15) gerechnet.

Nachdem kein Stern in den Daten von GRIPS 8 sichtbar ist, fällt die Anwendung des Kalibrierungsverfahrens auch an diesem Instrument vollständig weg. Die Analyse zeigt eindeutig, dass der große Öffnungswinkel des Spektrometers zu einer so starken Flächenmittelung führt, dass selbst helle Sterne wie Beteigeuze nicht mehr aus dem Untergrundsignal herausgelöst werden können. Damit bestätigt sich, dass die optische Komponente - insbesondere das Fehlen eines fokussierenden Parabolspiegels - eine entscheidende limitierende Größe für die Identifizierbarkeit stellarer Signale ist. Für GRIPS 8 kann das Verfahren daher nicht zur Kalibrierung eingesetzt werden.

5 Zusammenfassung & Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein in den GRIPS 15 Daten der Neumayer-Station III regelmäßig auftretendes Signal zwischen 2014 und 2024 untersucht. Es konnte deutlich als stellares Signal des roten Überriesen Antares identifiziert werden. Das wurde durch die Analyse der zeitlichen Verschiebung und jahreszeitlichen Sichtbarkeit eindeutig bewiesen. Über die Signaldauer lässt sich bei GRIPS 15 näherungsweise ein Öffnungswinkel von $1,3^{\circ}$ ableiten. Für eine präzise Anwendung ist diese Methode allerdings zu ungenau, weil sich lediglich eine Mindestgröße berechnen lässt aber nicht die maximale Größe, wie bei Labormessungen. Die spektrale Signatur ist breitbandig und weist keine individuellen Linien auf, zeigt jedoch eine stabile Form über den Zeitraum von 2015 bis 2022. Damit konnte belegt werden, dass das Sternsignal zuverlässig im Spektrum detektiert wird und prinzipiell als Referenz dienen kann.

Die Intensitätsanalyse ergab, dass die gemessene Strahlung deutlichen Schwankungen unterliegt. Die Variationen zwischen 2015 und 2022 lassen sich überwiegend durch atmosphärische Einflüsse wie Bewölkung und Wasserdampftransmission erklären und zeigen keinen Hinweis auf eine instrumentelle Drift der Empfindlichkeit. Die erhöhten Werte in Kanal 4 sind zum Teil atmosphärisch bedingt und lassen sich in Teilen durch spektrale Transmissionsunterschiede begründen. Für den besagten Zeitraum ergibt sich somit ein stabiles Verhalten der instrumentellen Empfindlichkeit im Rahmen der erzielten Messgenauigkeit. Dabei besitzen externe Faktoren (Bewölkung, Instrumentenaufbau u.ä.) einen starken Einfluss auf die gemessene Intensität.

Ein zentraler Einflussfaktor ist die fortschreitende Drift der Neumayer-Station III. Durch Verschiebung der gesamten Station verändert sich auch die Ausrichtung des GRIPS-Spektrometers. Dies führt dazu, dass Antares erst ab 2015 im Sichtfeld erscheint und es ab 2023 zu einer deutlich reduzierten Sichtbarkeit und letztlich zum Verschwinden des Sternsignals ab 2024 kommt. Damit wird deutlich, dass nicht das Instrument, sondern der Stationsstandort die langfristige Nutzung des Sternsignals bei GRIPS 15 limitiert. Antares eignet sich daher nicht als Quelle zur langfristigen Überwachung der Empfindlichkeit von GRIPS 15.

Die Übertragbarkeit der Methode wurde anhand der Instrumente GRIPS 19 und GRIPS 8 untersucht. Für GRIPS 19 konnte das stellare Signal des Roten Riesen Sigma Librae eindeutig nachgewiesen werden. Allerdings überlagern periodische Temperaturschwankungen durch die Klimaanlage in den Daten des GRIPS 19 das Sternsignals so stark, dass eine zuverlässige Intensitätsbestimmung nicht möglich ist. Die Einschränkung entsteht somit durch einen externen Störeffekt des Messaufbaus.

Bei GRIPS 8 konnte trotz Transit des Sterns Beteigeuze kein Sternsignal nachgewiesen werden. Die Ursache liegt im Öffnungswinkel des Instruments, der zu einer Flächenmittelung führt, bei der selbst relativ starke Untergrundsignale vollständig im Untergrundrauschen verschwinden. Der fehlende Parabolspiegel stellt somit die entscheidende instrumentelle Limitierung dar. GRIPS 8 ist aufgrund seines Aufbaus ungeeignet für die Methode der Beobachtung stellarer Objekte

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass stellare Signale in bestimmten GRIPS-Spektrometern zuverlässig identifiziert werden können. Für eine Anwendung als Langzeitreferenz sind ein enger Öffnungswinkel, ein stabiler Instrumentenstandort und ein störungsfreier Messaufbau zwingende Voraussetzungen. Unter geeigneten Bedingungen besitzt das Verfahren grundsätzlich das Potential, zukünftige GRIPS-Instrumente bei der Überwachung ihrer Empfindlichkeit zu unterstützen. Für die aktuell untersuchten drei Stationen sind die Rahmenbedingungen jedoch nur in begrenztem Maße gegeben.

Nachdem es sich bei Antares und Sigma Librae um Rote Riesen der Spektralklasse M handelt, sollte sich bei einer gezielten Suche nach weiteren Sternen auf diese Eigenschaft konzentriert werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass die praktische Anwendbarkeit stark vom instrumentellen Aufbau abhängt. Voraussetzung hierfür ist, dass das jeweilige GRIPS-Spektrometer auf die aktuelle Version der Datenprozessierung aktualisiert wurde. Weiterhin sollte das Gerät mit einem Parabolspiegel ausgestattet sein. Beispielsweise können GRIPS-Instrumente auf UFS mit Parabolspiegel versehen werden und auf den Transit von Beteigeuze ausgerichtet werden, damit die Intensitätsanalyse auch hier erprobt werden kann.

Besser noch als die Referenzierung auf einen Stern, welche gegebenenfalls eine vom Normalbetrieb abweichende Ausrichtung der Spektrometer erfordert, wäre die Möglichkeit die bodengebundenen Instrumente mit Messungen eines geeigneten polar-umkreisenden Satelliten zu vergleichen, wie er mit der SOVA-S Mission (Satellite Observation of waVes in the Atmosphere) gerade in der finalen Konsolidierungsphase für eine künftige Scout-Mission der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) ist.

Literaturverzeichnis

- Antares: Betelgeuse's Neglected Twin | aavso [WWW Document], n.d. URL https://www.aavso.org/vsots_alphaesco (accessed 10.27.25).
- Der kürzeste Tag des Jahres [WWW Document], 2024. URL <https://www.tuwien.at/alle-news/news/der-kuerzeste-tag-des-jahres> (accessed 10.27.25).
- Fiedler, B., 2024. An Astronomical Interpretation of the Nebra Sky Disc. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17307>
- Fraknoi, A., Morrison, D., Wolff, S.C., 2022. Astronomy 2e, [Second edition]. ed. OpenStax, Houston, Texas.
- GRIPS [WWW Document], n.d. URL <https://www.dlr.de/de/eoc/forschung-transfer/expertise/spektrometrie/grips> (accessed 11.28.25).
- Hecht, J.H., 2004. Instability layers and airglow imaging. *Reviews of Geophysics* 42, 2003RG000131. <https://doi.org/10.1029/2003RG000131>
- Höppner, K., 2008. Beobachtung des Hydroxyl (OH^{*})-Airglow: Untersuchung von Klimasignalen und atmosphärischen Wellen. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Kramer, R., 2015. Aktivitäts- und Energieanalyse von Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre zur Verbesserung der energetischen Einschätzung von Tiefdruckgebieten und deren Vorhersage. Augsburg, Oberpfaffenhofen.
- Moser, A., 2023. Analyse der Strahlungsenergieflussdichte des OH-Leuchtens an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.
- ndmc.dlr.de [WWW Document], n.d. URL <https://ndmc.dlr.de/> (accessed 10.27.25).
- Neumayer-Station III - AWI [WWW Document], n.d. URL <https://www.awi.de/flotte-stationen/stationen/neumayer-station-iii.html> (accessed 11.6.25).
- Ohnaka, K., Hofmann, K.-H., Schertl, D., Weigelt, G., Baffa, C., Chelli, A., Petrov, R., Robbe-Dubois, S., 2013. High spectral resolution imaging of the dynamical atmosphere of the red supergiant Antares in the CO first overtone lines with VLTI/AMBER. *A&A* 555, A24. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321063>
- Ohnaka, K., Weigelt, G., Hofmann, K.-H., n.d. Vigorous atmospheric motions in the red supergiant supernova progenitor Antares.
- Schmidt, C., 2016. Entwicklung eines bodengebundenen Infrarotspektrometers für die zeitlich hochauflöste Beobachtung des OH-Leuchtens aus der Mesopausenregion. Universität Augsburg, DLR, Oberpfaffenhofen.
- Schmidt, C., Höppner, K., Bittner, M., 2013. A ground-based spectrometer equipped with an InGaAs array for routine observations of OH(3-1) rotational temperatures in the mesopause region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 102, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.001>

- Schmithüsen, H., 2020. Meteorological synoptical observations from Neumayer Station (1981-01 et seq) [WWW Document]. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven.
<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.911242>
- Schönwiese, C.-D., 2024. Klimatologie. UTB.
- Stothers, R.B., 2010. GIANT CONVECTION CELL TURNOVER AS AN EXPLANATION OF THE LONG SECONDARY PERIODS IN SEMIREGULAR RED VARIABLE STARS. *ApJ* 725, 1170–1174.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/725/1/1170>
- Teiser, G., Von Savigny, C., 2017. Variability of OH(3-1) and OH(6-2) emission altitude and volume emission rate from 2003 to 2011. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 161, 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.04.010>
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Erget, D., Dubois, P., Bonnarel, F., Borde, S., Genova, F., Jasniewicz, G., Laloë, S., Lesteven, S., 2000. The SIMBAD astronomical database.
- Wüst, S., Bittner, M., Espy, P.J., French, W.J.R., Mulligan, F.J., 2023. Hydroxyl airglow observations for investigating atmospheric dynamics: results and challenges. *Atmos. Chem. Phys.* 23, 1599–1618. <https://doi.org/10.5194/acp-23-1599-2023>

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich während der Erstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer **Dr. Carsten Schmidt**. Sein unermüdliches Engagement hat mir den Einstieg in das Thema erheblich erleichtert und mir ermöglicht, umfangreiches neues Wissen über wissenschaftliches Arbeiten, Schreiben und Präsentieren zu erwerben. Die von ihm vermittelten Methoden werden mir mit Sicherheit auch in Zukunft von großem Nutzen sein.

Ein herzlicher Dank richtet sich auch an **PD ██████████**, die mich mit ihrer Teamleitung warmherzig im Team Dynamik aufgenommen hat. Ebenso danke ich dem **gesamten Team Dynamik**, in dem ich mich von Anfang an willkommen gefühlt habe. Durch die offene Zusammenarbeit habe ich mich bei allen Besprechungen und Diskussionen stets berücksichtigt und wohlgefühlt.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinem Erstprüfer und Abteilungsleiter **Prof. Dr. ██████████** bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Bachelorarbeit in der Abteilung Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu schreiben. Ebenso danke ich **Prof. Dr. ██████████** für die freundliche Übernahme der Zweitkorrektur.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Ich versichere, dass ich IT-gestützte oder auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Schreibwerkzeuge nur in Absprache mit der Betreuungsperson verwendet habe und dass ich die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte (bias), fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate trage. Ich versichere, dass ich die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken (dazu zählen auch Internetquellen und zugelassene KI-basierte Tools) entnommen sind, unter Angabe der Quelle und im Fall der KI-Tools unter der Angabe der verwendeten Prompts kenntlich gemacht habe.

Schreiber, Thomas

Freising, 08.12.2025

Tabellarische Hilfe zur transparenten Auflistung der verwendeten KI-Tools

Einsatzbereich	Eingesetzt?	Programme	Eigene Hinweise
Wo habe ich KI genutzt?	Ja/Nein	Nennung	Ergänzungen
Ich habe während der (allgemeinen) Recherche KI aktiv genutzt.	Ja	Elicit AI	
Ich habe während der Literaturrecherche (z.B.: Textzusammenfassungen) KI aktiv genutzt.	Nein		
Bei der Formulierung der Fragestellung habe ich KI genutzt.	Nein		
Zur Erstellung der Gliederung habe ich KI zu Hilfe genommen.	Nein		
Bei der Generierung von Textbausteinen kam KI zum Einsatz.	Nein		
Während der Überprüfung von Textbausteinen wurde KI genutzt.	Nein		
Zur Verbesserung von Textbausteinen ist KI genutzt worden.	Ja	Chat GPT	Grammatikunterstützung
Bei Erstellung einer Zusammenfassung kam KI zum Einsatz.	Nein		
Im Literaturverzeichnis wurde KI zur Hilfe genommen.	Nein		
KI wurde bei der Erstellung von Abbildung/Tabellen eingesetzt.	Nein		
Während der Bearbeitung der Datengrundlage/Datensätze wurde KI genutzt.	Ja	Academic Cloud, Chat AI	Programmierungshilfe
Zur Bearbeitung und Auswertung der Erhebung ist KI im Einsatz gewesen.	Nein		
Es waren Übersetzungen von Nöten, die mit Hilfe von KI ausgeführt wurden.	Nein		
Bei der Übersetzung von Textbausteinen wurde KI zur Hilfe genommen.	Nein		
Zur Unterstützung beim Programmieren kam KI zum Einsatz.	Ja	Academic Cloud Chat AI, Gemini	Programmierungshilfe
Bei der Überprüfung der Rechtschreibung & Grammatik kam KI zum Einsatz (Hinweis: Microsoft nutzt KI standardmäßig in seinen Office-Anwendungen).	Ja	Chat GPT	
KI kam beim Erstellen von Präsentationen zur Hilfe.	Nein		
Während der Datenübertragung oder dem Transkribieren wurde KI angewendet.	Nein		
<i>Ggf. ab hier eigene Bereiche, die Ihrer Meinung nach noch nicht aufgeführt sind selbstständig hinzufügen (die Tabelle kann bei Bedarf erweitert werden)</i>			