

Bestimmung optischer Aberrationen in Instrumenten für räumlich hochaufgelöste Beobachtungen der Sonne

Bachelorarbeit
im Studiengang Mikrosystemtechnik und optische Technologien

eingereicht an der
Technischen Hochschule Brandenburg

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Vollmer
Zweitgutachter: apl. Prof. Dr. rer. nat. Carsten Denker

Robert Kamlah
Matrikel-Nr.: 20143003

23. Februar 2018



Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
An der Sternwarte 16
14482 Potsdam



Technische Hochschule Brandenburg
University of Applied Sciences
Magdeburger Straße 50
14770 Brandenburg an der Havel

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	1
1	Einleitung	3
1.1	Hintergrund	3
1.2	Motivation	3
1.3	Zielsetzung	4
2	Aberrationen	5
2.1	Seidelsche Aberrationen	5
2.2	Zernike Polynome	10
3	Das 1,5-Meter Sonnenteleskop GREGOR	13
3.1	Design	14
3.2	Steuereinheit	15
3.3	Adaptive Optik	15
3.4	GREGOR Fabry-Pérot Interferometer	20
3.5	High-resolution Fast Imager	21
4	Ergebnisse	23
4.1	Datenauswertung – Fokus	24
4.2	Datenauswertung – Aberrationen höherer Ordnung	28
4.3	Datenauswertung – Vergleich GFPI und HiFI	34
5	Ausblick	41
	Bibliography	42
	Appendix – Liste der Abkürzungen	45
	Danksagung	47

Zusammenfassung

Um ein besseres Verständnis über die Vorgänge auf der Sonne zu ermöglichen, sind hochauflösende Beobachtungen der Sonnenoberfläche unverzichtbar für die Sonnenphysik. Das auf Teneriffa befindliche Sonnenteloskop GREGOR ist ausgestattet mit Instrumenten, die Hochpräzisionsmessungen des Magnetfeldes und der Gasbewegungen in Photosphäre und Chromosphäre ermöglichen. Für zwei dieser Instrumente, das GREGOR Fabry-Pérot Interferometer und den High-resolution Fast Imager, wurden Datenreihen aufgenommen um die statischen Bildfehler des optischen Systems auszuwerten. Wie jedes räumlich hochauflösende Teleskop, das innerhalb der Erdatmosphäre betrieben wird, benötigt auch GREGOR zur Korrektur der Abbildung eine Adaptive Optik, um eine Auflösung nahe der Beugungsgrenze zu ermöglichen und mögliche Bildfehler zu beseitigen. Aufgrund struktureller Änderungen im System, infolge dessen der Wellenfrontsensor der Adaptiven Optik im Strahlengang weiter nach vorne versetzt wurde, werden die Bildfehler, die durch die Transferoptiken vom Fokus F3 bis zu den wissenschaftlichen Foki verursacht werden, nicht mehr von dem Wellenfrontsensor wahrgenommen. Um die daraus resultierenden Verschlechterungen der Bildqualität des GREGOR Teleskops zu kompensieren, wird eine Möglichkeit gesucht die resultierenden Aberrationen und deren Einfluss auf die Abbildung zu bestimmen. Weiterhin soll untersucht werden, ob die Kameras der beiden Instrumente automatisch fokussiert werden können. Die Fokussierung wird aktuell manuell vorgenommen, was dazu führt, dass die beste Fokusposition subjektiv ist und je nach Anwender variieren kann. Die auszuwertenden Aberrationen, bei denen es sich um die Bildfehlertheorie niedriger Ordnung handelt, werden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt und näher erläutert. Die Möglichkeit eine Wellenfront und deren Deformationen zu beschreiben, wird mittels der Zernike Polynome dargestellt. Zudem wird das GREGOR Teleskop, mit seiner 1,5 Meter großen Öffnung, vorgestellt, sowie die oben genannten Instrumente, die die Daten geliefert haben. Verschiedene Metriken zur Auswertung der Daten werden gezeigt und miteinander verglichen. Die vorgenommene Datenauswertung zeigt, dass eine automatische Fokussierung des Teleskops möglich ist und eine Verbesserung der Beobachtungsbedingungen mit sich bringt, da die Fokussierung mithilfe von Methoden der digitalen Datenverarbeitung unterstützt wird und so eine genauere Einstellung des Fokus erlaubt. Es wird gezeigt, dass es möglich ist, die im System auftretenden Aberrationen zu identifizieren und dass diese große Ähnlichkeiten in den verschiedenen optischen Strahlengängen zueinander aufweisen. Dadurch ergeben sich Werte, die als fixe Aberration auf den verformbaren Spiegel der Adaptiven Optik eingestellt werden können, um die Beobachtungsbedingungen am GREGOR Sonnenteloskop zu verbessern, sowie die Fokussierung und Aufnahme der Kalibrierungsdaten zu vereinfachen und somit zu beschleunigen.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Fähigkeit zu sehen hat sich über Millionen von Jahren entwickelt und eine Vielzahl von Möglichkeiten geschaffen: über Facettenaugen, bis hin zum Augapfel, der ein optisches System mit Bikonvexlinse darstellt, oder auch das Sonar, als Beispiel für das nicht optische Sehen. Die Pupille, die dadurch eine Apertur darstellt, ermöglicht die Anpassung an verschiedene Helligkeitsstufen. Bei geringem Lichteinfall vergrößert sie sich und verkleinert sich bei starkem Lichteinfall. Zudem kann die Anpassung an Fern- bzw. Nahsehen durch die sogenannte Akkomodation vorgenommen werden, dabei wird die Augenlinse für Nahsicht gestaucht und für Fernsicht gestreckt, wodurch sich Ihre Brennweite ändert. Diese Fähigkeit kann aus unterschiedlichen Gründen beeinträchtigt sein und so ist eine Vielzahl von Menschen auf das Tragen einer Sehhilfe angewiesen, um Fehlsichtigkeiten auszugleichen. Damit wird im Falle einer Kurzsichtigkeit (Myopie), bei welcher der Fokus vor den Sehzellen liegt, oder Weitsichtigkeit (Hyperopie), hier befindet sich der Fokus hinter den Sehzellen, korrigiert. Mithilfe einer entsprechend geformten Linse wird eine Verschiebung der Fokalebene im Auge erreicht. Dabei weisen Brillengläser immer bestimmte Aberrationen (Abbildungsfehler) in kleinem Maßstab auf. Dafür verantwortlich sind inhärente Eigenschaften sphärischer Linsen und optischer Materialien. Selbst bei idealer Fertigung der Linse treten diese Fehler auf und beeinflussen die Abbildung negativ, unabhängig davon, ob das einfallende Licht zentral oder peripher, gerade oder schräg auf die Linse trifft. Die entstehende Abbildung ist nie punktgenau, weist also immer eine gewisse Unschärfe auf, ist immer leicht verzerrt und nie ganz farblichrichtig. Ein Fehler der häufig in Verbindung mit Kurz- oder Weitsichtigkeit auftritt, ist der sogenannte Astigmatismus. Hierbei handelt es sich um eine unregelmäßige Krümmung der Hornhaut, welche zu einer Verzerrung der Abbildung führt. Der Astigmatismus kann mit torischen Gläsern oder Kontaktlinsen, die der Hornhaut angepasst sind, ausgeglichen werden. Er wird zu den monochromatischen Abbildungsfehlern gezählt, zu denen auch die sphärischen Aberrationen, die eine Brennweitenverschiebung abhängig vom Abstand (und der Wellenlänge) zur optischen Achse verursachen, und die Koma gehören. Die moderne Augenoptik ist in der Lage sphärischen Aberrationen durch asphärische Linsen zu minimieren, dafür wird die Krümmung der Linse zum Rand abgeflacht.

1.2 Motivation

Aberrationen treten generell bei allen Linsen oder Spiegeln in abbildenden Systemen auf, so auch bei Teleskopen, wobei diese Effekte in fehlerhaften Optiken gravierendere Ausmaße annehmen und bis zur Unkenntlichkeit des abgebildeten Objekts führen können. Durch die Kombination mehrerer Linsen bzw. Spiegel können die Einflüsse von Aberrationen aber minimiert werden. Zudem ist bei Teleskopen, die innerhalb der Erdatmosphäre betrieben werden, die Verwendung einer Adaptiven Optik unumgänglich, um störende Einflüsse zu korrigieren. Dafür wird die eintreffende Phasenfront des Lichts, die man theoretisch durch die Zernike Polynome beschreiben kann, von einem Wellenfrontsensor detektiert. Das GREGOR-Sonnenteleskop (Schmidt *et al.* 2012), Teil des Observatorio del Teide auf Teneriffa, benutzt hierfür einen sogenannten Shack-Hartmann-Sensor und ermöglicht damit räumlich hoch aufgelöste Messungen des Magnetfeldes und der Gasbewegungen in der Photosphäre und der Chromosphäre der Sonne, wobei eine

Auflösung von 70 km auf der Sonnenoberfläche erreicht wird. Formel 1.1 zeigt eine Abschätzung des Auflösungsvermögens, nach dem Rayleigh Kriterium, des GREGOR Teleskops, bei der Annahme, dass $m = 1$, $\lambda = 450.6 \text{ nm}$ (blaues Kontinuum) und $D = 1.5 \text{ m}$ ist. R , der Abstand von der Erde zur Sonne ist eine astronomische Einheit ($1 \text{ AU} \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$)

$$\varphi \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \times \frac{450.6 \text{ nm}}{1.5 \text{ m}} = 3.66 \times 10^{-7} \text{ rad} \quad (1.1)$$

$$3.66 \times 10^{-7} \text{ rad} \times \frac{3600 \times 180}{\pi} = 0.075''$$

Damit ergibt sich theoretisch auf der Sonnenoberfläche eine räumliche Auflösung von:

$$d = \varphi \times R = 3.66 \times 10^{-7} \text{ rad} \times 1.5 \times 10^{11} \text{ m} = 54.97 \text{ km}. \quad (1.2)$$

1.3 Zielsetzung

Die Arbeit zeigt, dass mit Hilfe angewandter Methoden der digitalen Bildverarbeitung folgende Zielsetzungen erreicht werden können: Die Überprüfung der optischen Eigenschaften der Transferoptiken vom Fokus F3 zu den wissenschaftlichen Foki sind unter Nutzung verschiedener Targets möglich. Diese befinden sich in einem Filterrad in der Fokalebene F3 des GREGOR Teleskops. Zur Kompensation der Aberrationen der Transferoptiken werden statische Aberration auf den deformierbaren Spiegel der AO gegeben und somit die schärfste Abbildung der Targets auf den CCD und sCMOS Kameras der wissenschaftlichen Instrumente erzeugt. Dabei werden Bildschärfe und Kontrast mit verschiedenen Methoden der digitalen Bildverarbeitung bestimmt. Ziel ist es einen schnellen, aber auch robusten Algorithmus zu implementieren, der im ersten Schritt die Kameras optimal fokussiert. Im zweiten Schritt sollen die statischen Aberrationen höherer Ordnung so bestimmt werden, dass sie als tabellierte Werte fest für den deformierbaren Spiegel eingestellt werden können. Mithilfe der Programmiersprache Interactive Data Language (IDL) soll die Implementierung vorgenommen, anschließend die Effizienz und Genauigkeit des verwendeten Algorithmus getestet und gegebenenfalls optimiert werden.

Kapitel 2

Aberrationen

Die Ausführungen des folgenden Kapitels orientieren sich an dem Lehrbuch zur Optik von [Hecht \(1994\)](#). Als Aberrationen bezeichnet man Abweichungen zur Abbildung unter idealisierten Bedingungen der Gaußschen Dioptrik, also der Lehre der idealen optischen Abbildung innerhalb des paraxialen Gebietes. Es gibt zwei Haupteinordnungen: die chromatischen Aberrationen, die daraus entstehen, dass der Brechungsindex eine Funktion der Wellenlänge oder Frequenz der einfallenden Strahlung ist und die monochromatischen Aberrationen. Diese bilden zwei Untergruppen und treten sogar auf wenn das Licht stark monochromatisch ist. Die Abbildung kann verschlechtert werden, indem sie durch den Einfluss von monochromatischen Aberrationen verschwimmt; verursacht z.B. durch sphärische Aberrationen, Koma und Astigmatismus. Zudem kann das Bild deformiert werden, z.B. durch die Petzval-Bildfeldkrümmung und die Verzerrung ([Hecht 1994](#)).

Es ist bekannt, dass sphärische Flächen nur im Gaußschen Gebiet ideal abgebildet werden und somit ist Kenntnis über Art und Umfang der Abweichung wichtig für moderne optische Systeme, die immer eine endlich große Öffnung aufweisen. So können auftretende Aberrationen durch die Kombination und Variation verschiedener physikalischer Parameter (Glassorten, Formen, Dicken, Positionierung von Linsen und Blenden) des optischen Systems vermindert werden. Am Ende des Strahlengangs schafft man es auf diese Weise, Deformationen der Wellenfront zu beseitigen oder zumindest stark zu korrigieren ([Hecht 1994](#)).

Fixe Aberrationen werden bestimmt durch die jeweilige Blendenzahl des Systems, die Brennweite der Optik, den Linsendurchmesser, das aufgenommene Bildfeld und die verwendete Vergrößerung. Abhängig von diesen Werten können statische Aberrationen auf den deformierbaren Spiegel der AO gegeben werden um Bildfehler zu minimieren.

2.1 Seidelsche Aberrationen

Die Näherung kleiner Winkel $\sin \varphi = \varphi$ wird ungültig, wenn man den paraxialen Bereich verlässt und Strahlen vom Rand der Linse mit in die Erzeugung des Bildes einbezieht. Für eine bessere Näherung wird die sogenannte Fehlertheorie dritter Ordnung betrachtet, in der eine Beschreibung und Klassifizierung der Fälle möglich wird, indem der $\sin \varphi$ des Brechungsgesetzes als Polynom entwickelt wird. Dafür werden auch die ersten zwei Glieder der Reihenentwicklung einbezogen ([Hecht 1994](#)).

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots \quad (2.1)$$

Im Rahmen dieser Reihenentwicklung kann man fünf Abbildungsfehler dritter Ordnung definieren. Die sphärische Aberrationen, Koma, Astigmatismus, Bildfeldkrümmung und Verzerrung. Diese bezeichnet man als Seidelsche Aberration, die die Abweichungen zu den Abbildungsfehlern erster Ordnung enthalten ([Hecht 1994](#)).

2.1.1 Sphärische Aberrationen

Verlässt man das paraxiale Gebiet einer Linse, stellt man fest, dass ein größerer Abstand zur optischen Achse dazu führt, dass die eintreffenden Strahlen näher zum Scheitelpunkt gebündelt werden. Damit

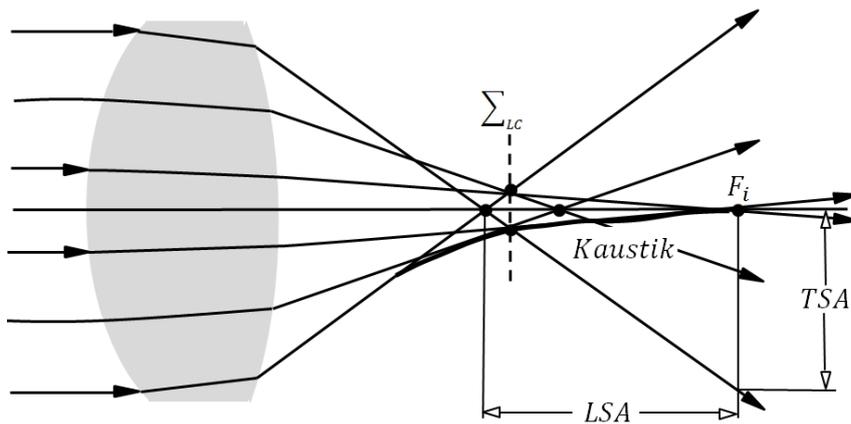


Abbildung 2.1 Sphärische Aberration einer Linse. Die Einhüllende der gebrochenen Strahlen wird als Kauistik bezeichnet. Σ_{LC} wird durch die Schnittpunkte der Randstrahlen mit der Kauistik festgelegt und bietet im allgemeinen die Beste Stelle zur Beobachtung des Bildes (Abb. 6.13 (a) nach Hecht 1994).

gleich die sphärische Aberration (SA), die auch als Öffnungsfehler bezeichnet wird, für nicht paraxiale Strahlen einer Abhängigkeit der Brennweite von der Blendenöffnung. Bei Sammellinsen werden die Randstrahlen stärker abgelenkt und bilden so einen Fokuspunkt vor dem der paraxialen Strahlen, wie in Abb. 2.1 gezeigt. Den Abstand dieser beiden Schnitte mit der optischen Achse bezeichnet man als sphärische Längsaberration (LSA, engl. lateral spherical aberration). Die SA von Sammellinsen ist deshalb positiv, während die Strahlen einer Zerstreulinse hinter dem paraxialen Brennpunkt liegen und die SA deshalb als negativ bezeichnet wird.

Ein Stern dessen Abbildung auf dem paraxialen Brennpunkt auf einem Schirm entsteht, würde als heller Fleck auf der optischen Achse erscheinen. Zusätzlich wäre er von einem symmetrischen Halo umgeben, der durch den Randstrahlkegel aufgespannt wird. Infolge dessen wird der Kontrast verringert und die Bildeinzelheiten einer flächenhaften Abbildung verschwimmen. Als Queraberration (TSA, engl. transverse spherical aberration) bezeichnet man den Schnittpunkt eines Randstrahls mit dem Schirm in der Entfernung des paraxialen Brennpunkts. Abblenden der Blendenöffnung kann die SA verringern, bewirkt aber zusätzlich eine Verringerung der einfallenden Lichtmenge und führt somit zu einem geringeren Messwert. Zudem wird die räumliche Auflösung durch eine kleine Pupillenöffnung schlechter. Die beste Position zur Beobachtung des Bildes ist der sogenannte Kreis minimaler Unschärfe (engl. circle of least confusion), dieser befindet sich an der Position Σ_{LC} und bildet dort den kleinsten Kreis des unscharfen Bildscheibchens. Bei erheblichen SA ist eine Neufokussierung des Systems nach dem Abblenden nötig, da die Verkleinerung der Blendenöffnung eine Verschiebung des Punktes Σ_{LC} in Richtung des paraxialen Brennpunktes bewirkt. Bei konstanter Blendenöffnung und Brennweite kann der Einfluss der SA mit der Objektweite und der Linsenform variieren (Hecht 1994).

2.1.2 Koma

Hat ein Objektpunkt einen kleinen Abstand zur Achse, kann eine sogenannte Koma, auch Asymmetriefehler genannt, entstehen, was genau wie sphärische Aberration von der Linsenform abhängig ist. Die Koma hat ihren Namen, weil dieser Bildfehler dritter Ordnung an einem abgebildeten Bildpunkt ein kometenschweifähnliches Gebilde entstehen lässt, verursacht dadurch, dass die Hauptebenen nur im achsnahen Bereich als Ebenen betrachtet werden können, reell aber gekrümmt sind. Ein paraxiales Strahlenbündel wird, ohne SA, im paraxialen Brennpunkt F_i fokussiert und für die Abbildung von Objekten, die sich auf der optischen Achse befinden, entstehen faktisch keine Konsequenzen. Fallen allerdings Strahlen durch außeraxiale Bereiche einer Linse ein, ändert dies die Äquivalentbrennweiten und so die Transversalvergrößerungen. Bei Abbildung von schräg einfallenden Strahlenbündeln und Bildpunkten außerhalb der Achse entsteht also folglich eine Koma (Hecht 1994).

Ob eine Koma als negativ oder positiv gewertet wird, ist davon abhängig, ob die Randstrahlen näher an der Achse gebündelt werden als die Strahlen, die durch den Hauptpunkt laufen (negativ) oder ob die Randstrahlen weiter von der Achse entfernt gebündelt werden (positiv).

Abbildung 2.2, zeigt die von einem Punkt aus entstehende geometrische Abbildung mit Asymmetriefehlern. Es ist zu erkennen, dass die von einem außeraxialen Objektpunkt S ausgehenden windschiefen Randstrahlen weiter von der Achse entfernt gebündelt werden, die Koma also positiv ist. Wird ein Schirm an die Position Σ_i gebracht, können die sogenannten Komafiguren (Zerstreungsfiguren der Koma), die

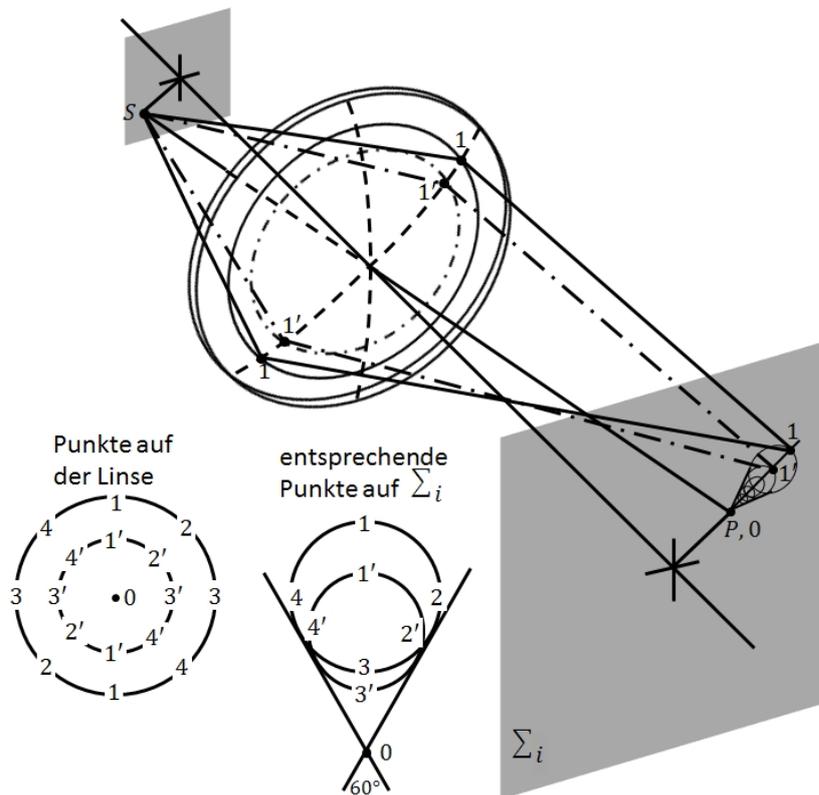


Abbildung 2.2 Die von einem Punkt ausgehende geometrische Abbildung mit Asymmetriefehler. Punkt förmiges Bild im Scheitel des Kegels durch zentralen Bereich der Linse erzeugt. (Abb. 6.19 nach Hecht 1994)

jeder kreisförmige Strahlenkegel, dessen Endpunkte (1-2-3-4-1-2-3-4) einen Ring auf einer Linse bilden, abgebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass der Abstand des Komakreises zur Achse größer wird, je größer ein Ring auf der Linse ist. Als sagittale Koma (Rinnenfehler) wird der Abstand von 0 nach 3 an der Position Σ_i bezeichnet. In dem annähernd dreieckigen Bereich zwischen 0 und 3 erscheint im Bild etwas mehr als die Hälfte der Energie. Die meridionale Koma befindet sich in dem Bild von 0 nach 1, wenn der äußere Ring die Schnittstelle der Randstrahlen ist.

2.1.3 Astigmatismus

Astigmatismus wird verursacht, wenn Objektpunkte Abstand zur optischen Achse haben und dadurch die einfallenden Strahlen die Linse asymmetrisch treffen, wie in Abb. 2.3 dargestellt. Die Orientierung der einfallenden Strahlen wird in die Sagittalebene und Meridionalebene eingeteilt, weshalb der Astigmatismus auch als Zweischalenfehler bezeichnet wird. Die Meridionalebene ist beim Durchlauf durch ein optisches System ungebrochen, im Gegensatz zur Sagittalebene, die für gewöhnlich ihre Neigung ändert, wenn der Hauptstrahl an den Linsen abgelenkt wird. So wird in jedem Bereich des optischen Systems eine andere Sagittalebene gebildet. Das heißt, dass die Meridionalebene sowohl den Hauptstrahl, also den Strahl der durch den Mittelpunkt der Aperturblende läuft, als auch die optische Achse enthält, wohingegen die Sagittalebene den Hauptstrahl enthält, der senkrecht zur Meridionalebene steht. Sagittalstrahlen bezeichnen vom Objektpunkt ausgehende schiefe Strahlen in der Sagittalebene (Hecht 1994).

Die Unterscheidung zwischen den beiden Ebenen entfällt, wenn der Objektpunkt auf der optischen Achse ist und somit der Strahlenkegel symmetrisch bezüglich der Kugelflächen einer Linse. In allen Ebenen, welche die optische Achse enthalten, sind die Strahlanordnungen gleich und somit kommen alle Strahlen, beim Fehlen von sphärischen Aberrationen, in einem einzigen Brennpunkt an. Bei Einfall eines schrägen, parallelen Strahlenbündels ergeben sich für Meridional- und Sagittalebene unterschiedliche Brennweiten und somit eine unterschiedliche Anordnung. Die Meridionalstrahlen weisen eine kürzere Brennweite als die Sagittalstrahlen auf. Die Brechkraft der Linse und die Neigung der Strahlen sind für den Brennweitenunterschied verantwortlich. Dieses Verhalten bezeichnet man als astigmatische Differenz. Diese ist auf der Achse gleich Null, nimmt aber schnell zu, wenn der Objektpunkt sich von der Achse entfernt und die Strahlen so eine größere Neigung aufweisen (Hecht 1994).

Das Vorhandensein unterschiedlicher Brennweiten führt zu einer stark veränderten Form nach der

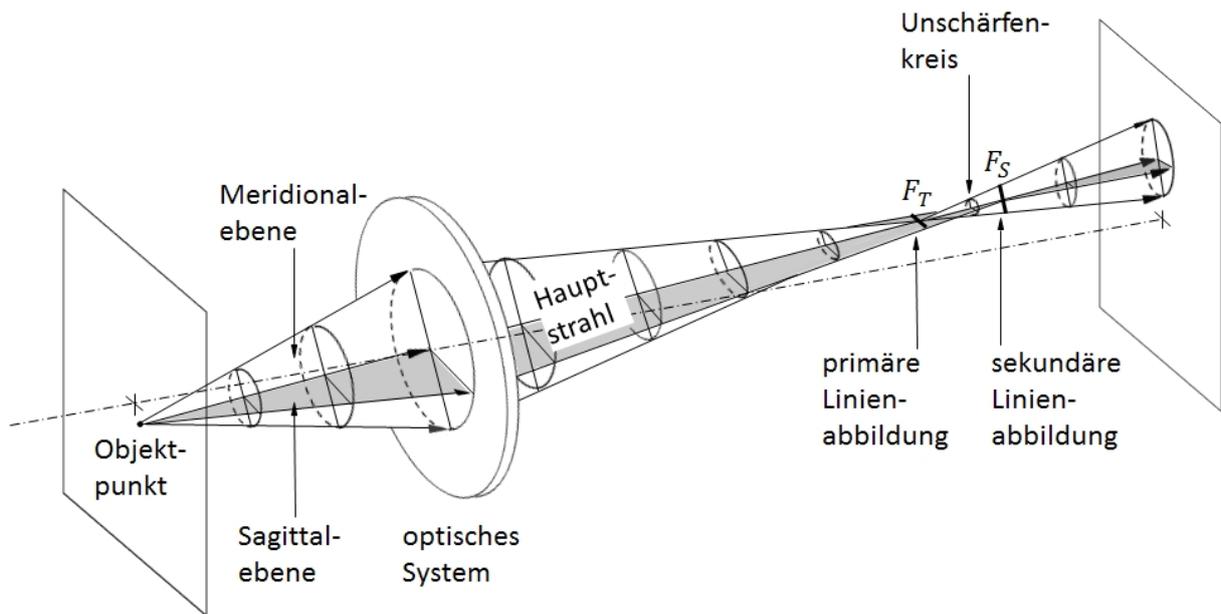


Abbildung 2.3 Der von einem Objektpunkt ausgehende Strahlverlauf, mit Aufteilung in Sagittal- und Meridionalebene, sowie Position der primären und sekundären Linienabbildungen und des Unschärfenkreises (Abb. 6.23 nach Hecht 1994)

Brechung. Ein Strahlenbündelquerschnitt, der bei Verlassen der Linse noch kreisförmig ist, wird beim Entfernen von der Linse zunehmend elliptisch. In der Sagittalebene befindet sich die große Ellipsenachse. Im Tangentialschnitt (Meridionalschnitt) F_T entartet die Ellipse, in der Fehlertheorie dritter Ordnung, zu einer Linie, die als primäre Linienabbildung bezeichnet wird. Alle vom Objektpunkt ausgehenden Strahlen durchlaufen diese Linie und verbreitern ihren Querschnitt danach schnell wieder, bis ein unscharfer kreisförmiger Fleck entsteht, der als Unschärfenkreis bezeichnet wird. Hinter dem Unschärfenkreis findet eine neue Verformung des Strahlenbündels zu einer Linie statt, wodurch die sekundäre Linienabbildung in der Meridionalebene im Sagittalschnitt F_S entsteht. Die bis hierhin beschriebenen Effekte setzen das Fehlen von SA und Koma voraus (Hecht 1994).

Entfernt ein Objekt sich weiter von der Achse, nimmt der Durchmesser des Kreises weiter zu und die astigmatische Differenz wächst an, damit ist eine Verschlechterung des Bildes verbunden und es verliert seine Randschärfe. Eine Veränderung der Objektlage führt zur Änderung der Orientierung der sekundären Linienabbildung, bleibt dabei aber immer zur optischen Achse gerichtet, also radial angeordnet. Eine vergleichbare Veränderung in der Orientierung ist auch bei der primären Linienabbildung festzustellen, die jedoch senkrecht zum Ausgangsbild bleibt (Hecht 1994).

Da bei Spiegeln die gleichen monochromatischen Aberrationen auftreten, die einzige Ausnahme bildet der ebene Spiegel, ist im Allgemeinen die außeraxiale Abbildung mit Parabolspiegeln schlecht, da Astigmatismus und Koma einen starken Effekt auf die Abbildung haben. Wohingegen bei Abbildung eines unendlich weit entfernten, axial gelegenen Objektpunktes keine Verschlechterung durch SA festzustellen ist (Hecht 1994).

2.1.4 Bildfeldkrümmung

Eng mit dem Astigmatismus verwandt ist die Bildfeldkrümmung, auch Petzval-Bildfeldkrümmung genannt. Dieser Fehler dritter Ordnung entsteht bei Abbildung mit endlich großen Blendenöffnungen, durch die sich eine gewölbte Bildfläche ergibt (Hecht 1994).

Durch die Auswirkungen des Astigmatismus entstehen zwei parabolische Bildflächen, die als tangentielle Σ_T und sagittale Σ_S bezeichnet werden (Abb. 2.4). Beim Durchlauf eines Objektpunktes über die Objektebene beschreiben diese Flächen alle geometrischen Orte der primären, bzw. sekundären Linienabbildung. Bei Betrachtung eines Punktes in einer bestimmten Höhe y_i ist die Entfernung von Σ_T zu der parabolischen Petzval-Fläche Σ_P immer dreimal so groß, wie der dazugehörige Punkt auf Σ_S . Beide Punkte befinden sich dabei auf der selben Seite der Petzval-Fläche, sind näher an der Optik zu finden und

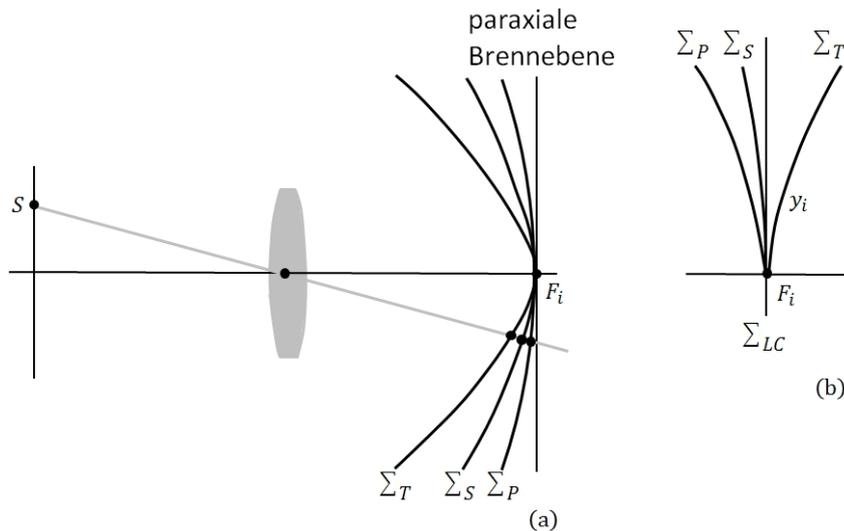


Abbildung 2.4 (a) Die Orientierung der tangentialen Σ_T , sagittalen Σ_S und Petzval-Bildflächen Σ_P im Raum bei Nutzung einer Konvexlinse, (b) Darstellung eines künstlich geebneten Bildfeldes (Abb. 6.27 nach Hecht 1994).

vereinigen sich ohne den Einfluss von Astigmatismus auf Σ_P . Durch den Einfluss einer Positivlinse weist die Petzval-Fläche eine Wölbung nach innen gegen die Objektebene auf und Negativlinsen verursachen eine Wölbung nach außen, also von jener Ebene weg. Durchbiegung oder Verlagerung der Linse und die Anpassung von Blenden kann die Form von Σ_S und Σ_T so beeinflussen, dass ein künstlich geebnetes Bildfeld entsteht, wie in Abb. 2.4 (b) dargestellt. Das Bild mit der geringsten Unschärfe befindet sich auf der ebenen Fläche Σ_{LC} , wo die Schärfe infolge des Astigmatismus zu den Rändern hin abnimmt; mit zunehmenden Abstand von der Bildmitte wachsen also die Kreise minimaler Unschärfe (Hecht 1994).

2.1.5 Verzerrung

Bei Fehlen aller anderen Aberrationen zeigt sich die Verzerrung als Bildfehler dritter Ordnung indem das Bild als Ganzes deformiert, aber weiterhin jeder Punkt scharf abgebildet wird. In der paraxialen Näherung wird die Transversalvergrößerung M_T als konstant betrachtet, kann aber tatsächlich eine Funktion des außeraxialen Abstandes y_i des Bildes sein. Eine quadratische Anordnung, wie in Abb. 2.5(a) gezeigt, verformt sich durch Verarbeitung eines optischen Systems, das eine positive oder auch kissenförmige Verzeichnung zulässt, wie in Abb. 2.5(b) dargestellt. Wie zu erkennen ist, findet dabei eine Verschiebung aller Bildpunkte radial nach außen vom Mittelpunkt statt. M_T wächst dabei mit y_i , die entferntesten Punkte verschieben sich also um den größten Betrag. Verschiebt sich hingegen jeder Punkt radial nach innen gegen den Mittelpunkt, d.h. M_T nimmt mit steigenden y_i ab, erhält man eine negative oder tonnenförmige Verzeichnung, wie in Abb. 2.5(c) gezeigt (Hecht 1994).

Verzerrungen sind leicht durch Abbildung eines Standards festzustellen. Positive oder negative Verzeichnungen treten typischerweise bei gewöhnlichen dicken, positiven oder negativen Linsen auf, wohingegen dünne Linsen kaum Verzerrungen verursachen. Dies kann sich ändern beim Einbringen von Blenden in das optische System, was unweigerlich zu einer Verzerrung führt, ausgenommen die Aperturblende befindet sich an der Linse, wodurch der Hauptstrahl durch die Hauptpunkte verläuft und so der Hauptpunktstrahl ist. Das Bild ist dann orthoskopisch (unverzerrt). Ein System bezeichnet man als orthoskopisch, d.h. frei von Verzeichnungen, wenn die herein- und herausgehenden Abschnitte des Hauptstrahls parallel sind (Hecht 1994). Die tonnenförmige Verzeichnung wird verursacht, wenn eine Blende vor einer Positivlinse positioniert wird. M_T wird so für einen außeraxialen Punkt mit vorderer Blende kleiner als ohne. Der dabei auftretende Unterschied ist ein Maß für die auftretende Aberration, die auch durch eine Änderung der Größe der Aperturblende nicht ausgelöscht werden kann. Eine kissenförmige Verzeichnung wird in das optische System gebracht, positioniert man eine hintere Blende längs des Hauptstrahls und vergrößert so M_T . Wechselt man zwischen Objekt und Bild, wechselt sich dadurch das Vorzeichen der Verzerrung für eine bestimmte Linsen-Blenden-Kombination. Bei Nutzung einer negativen Linse erzeugen die erwähnten Kombinationen den gegenteiligen Effekt (Hecht 1994).

Die ideale Position einer Blende befindet sich in der Mitte von zwei identischen Linsen, die spiegelverkehrt orientiert sind, wodurch der Betrag der Verzerrung der zweiten Linse die Verzerrung der ersten

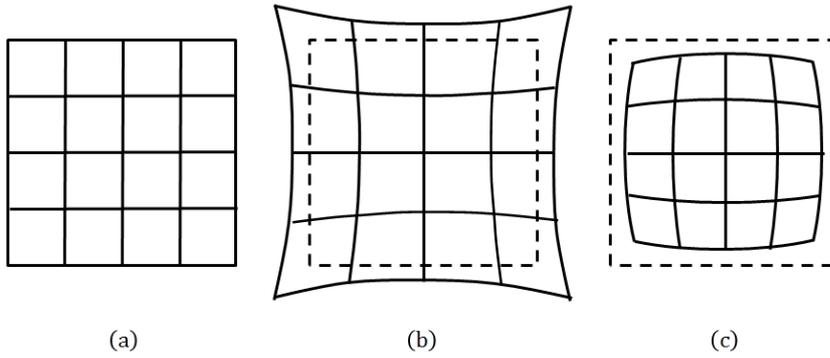


Abbildung 2.5 (a) ohne Verzerrung, (b) kissenförmige Verzeichnung (positiv), (c) tonnenförmige Verzeichnung (negativ) (Abb. 6.29 nach Hecht 1994).

Linse komplett aufhebt. Diese Konfiguration beseitigt auch die Koma und Farbabweichungen (Hecht 1994).

2.2 Zernike Polynome

Eine praktische Methode zur theoretischen Beschreibung der Aberrationen von Wellenfronten sind die sogenannten Zernike Polynome, durch deren Reihenentwicklung eine auf eine Optik auftreffende Wellenfront modelliert werden kann. Bei den Zernike Polynomen handelt es sich um einen, auf einem Einheitskreis definierten Satz von Polynomen, mit deren Hilfe die Aberrationen eines optischen Systems visualisiert werden können. Durch die Nutzung von Polarkoordinaten ergeben sich die Polynome aus dem Produkt von Winkelfunktionen und Radialpolynomen. Die Winkelfunktionen bilden die Basisfunktion der Kreisgruppe und die Radialpolynomen werden aus den sogenannten Jacobi Polynomen gebildet. Die im folgenden verwendeten Polynome weichen, durch Nutzung einer anderen Normierung, leicht von der üblich verwendeten Form ab und sind so zweckmäßiger für statistische Analysen. Dadurch ergibt sich ein abgewandelter Satz von Zernike Polynomen, der im Folgenden einfach als Zernike Polynome bezeichnet wird. Die folgenden Darstellungen orientieren sich an Noll (1976). Die Zernike Polynome sind definiert durch

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{gerade } j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos m\theta \\ Z_{\text{ungerade } j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin m\theta \end{aligned} \right\} m \neq 0 \quad (2.2)$$

$$Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(r), \quad m = 0$$

mit

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} r^{n-2s} . \quad (2.3)$$

Die Werte von n und m sind dabei immer ganzzahlig und erfüllen $m \leq n$, $n - |m| = \text{gerade}$. Der Index j ist eine Modenordnungszahl und ergibt sich als Funktion von n und m . Eine logische Anordnung der Moden ergibt sich über die Definition aus Glg. 2.2. Diese erlaubt es die modale Orthogonalitätsbeziehung als

$$\int d^2r W(r) Z_j Z_{j'} = \delta_{jj'} \quad (2.4)$$

zu schreiben, mit

$$\begin{aligned} W(r) &= 1/\pi & r \leq 1 \\ &= 0 & r > 1 . \end{aligned}$$

Mit Hilfe der Zernike Polynome kann die Ausdehnung einer willkürlich auftreffenden Wellenfront auf einer Kreisblende mit beliebigem Radius R beschrieben werden, sodass für eine willkürliche Funktion $\Phi(r, \Theta)$ die Polynomausdehnung über eine Kreisfläche mit dem Radius R gegeben ist durch

$$\Phi(R\rho, \Theta) = \sum_j a_j Z_j(\rho, \Theta) , \quad (2.5)$$

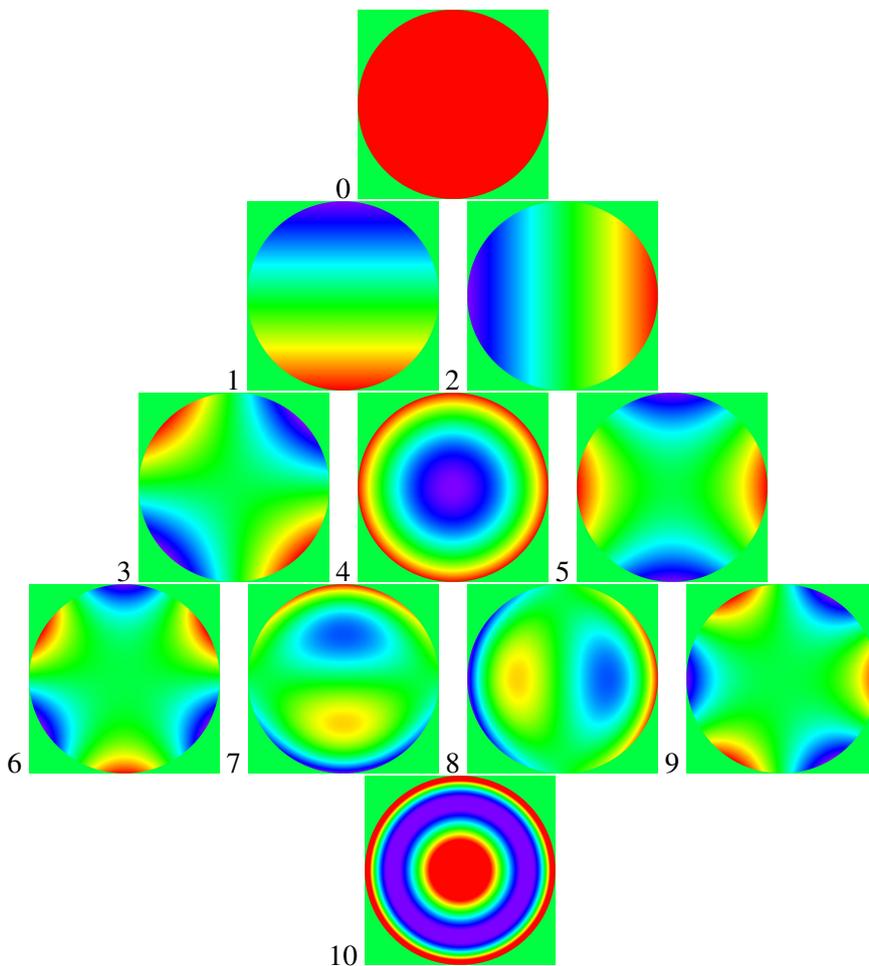


Abbildung 2.6 Mit IDL erstellter Satz von Zernike Polynomen. Der untere Index ist die Noll-Ordnung, errechnet aus der Noll-Sequenz. Dabei ist 0 = Piston (ungestörte Wellenfront), 1 = Tip, 2 = Tilt, 3 = Astigmatismus 1, 4 = Defokus, 5 = Astigmatismus 2, 6 = Trefoil 1, 7 = Koma 1, 8 = Koma 2, 9 = Trefoil 2 und 10 = sphärische Aberration. 1,2 stellen eine einfach geneigt WF dar, Trefoil (dt., Kleeblatt) ist eine höhere Ordnung des Astigmatismus.

dabei ist $\rho = r/R$ und die Koeffizienten a_j sind gegeben durch

$$a_j = \int d^2\rho W(\rho) \Phi(R\rho, \Theta) Z_j(\rho, \Theta) , \quad (2.6)$$

oder

$$a_j = (1/R^2) \int d^2r W(r/R) \Phi(r, \Theta) Z_j(r/R, \Theta) . \quad (2.7)$$

Der Parameter a_j stellt die Koeffizienten zur Korrektur der Aberrationen dar und entspricht den im weiteren Verlauf der Arbeit gesuchten Offsets.

Kapitel 3

Das 1,5-Meter Sonnenteleskop GREGOR

Am Observatorium del Teide (OT), Teneriffa, befindet sich das 1,5-Meter Sonnenteleskop GREGOR, das seinen Betrieb 2012 aufgenommen hat ([Schmidt *et al.* 2012](#)). Mit dem benachbarten 0,7-Meter Vakuum Turm Teleskop (VTT) und dem 0,9-Meter THEMIS bildet es den leistungsstärksten Zusammenschluss von Sonnenteleskopen an einem Ort. GREGOR ist ein großes Sonnenteleskop mit einer Öffnung von 1,5 m und wurde von einem deutschen Konsortium, unter der Leitung des Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (KIS) in Freiburg, zusammen mit dem Institut für Astrophysik Göttingen (IAG), dem Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), und dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Göttingen gebaut. Weitere internationale Partner sind das Instituto de Astrofísica de Canarias und das Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic.

GREGOR ist mit einem Adaptiven Optik (AO) System, sowie mechano-optischen Elementen zur polarimetrischen Kalibrierung ausgestattet. Das Teleskop ermöglicht Hochpräzisionsmessungen des Magnetfeldes und der Gasbewegungen in der Photosphäre und Chromosphäre der Sonne, bei einer Auflösung von 70 km auf der Sonnenoberfläche. Die übliche Bauweise evakuierter Teleskope wurde bei GREGOR nicht fortgesetzt, sondern es wurde eine offene Bauweise umgesetzt und das Teleskop wird durch eine Zeltkuppel geschützt ([Hammerschlag *et al.* 2012](#)). Der Hauptspiegel besteht aus Zerodur und wird von der Rückseite gekühlt ([Schmidt *et al.* 2012](#); [Soltau *et al.* 2012](#)).

Die Arbeit mit GREGOR soll Wissen darüber bereitstellen, wie das Magnetfeld auf der Sonne erzeugt wird, wie sich Plasma und Magnetfelder gegenseitig beeinflussen und wie sich Magnetfelder zu immer größeren Gebilden, wie Poren, Sonnenflecken und aktiven Gebieten, zusammenschließen.



Abbildung 3.1 Aufnahme des GREGOR Sonnenteleskops mit geöffneter Kuppel (AIP).

Tabelle 3.1 Eigenschaften des GREGOR Teleskops und seiner Instrumente (Tabelle 1 in [Schmidt et al. 2012](#))

Teleskop:	
Optisches Design	doppeltes Gregory
freie Apertur des Primärspiegels	144 cm
Brennweite des Primärspiegels	2.5 m
effektive Brennweite des Teleskops	57.3 m
Durchmesser des Gesichtsfelds	150''
Bildmaßstab bei Fokus F3	3.6'' mm ⁻¹
Adaptive Optik:	
Subaperturgröße in der Eintrittsöffnung	10 cm (quadratisch)
ausgeleuchtete Subaperturen	156
Anzahl Aktuatoren des deformierbaren Spiegels	256
Bandbreite bei geschlossener Schleife	120 Hz
GFPI:	
Wellenlängenbereich	530 – 860 nm
Detektorgröße	1376 × 1024 Pixel
Bildfeld	50'' × 38''
Bildskala	0.036'' Pixel ⁻¹
Ladungsträger pro Pixel	18 000 e ⁻
HiFI:	
Wellenlängenbereich	370 nm – 530 nm
Detektorgröße	2560 × 2160 Pixel
Bildfeld	64.8'' × 54.6''
Pixelgröße	6.5 μm × 6.5 μm
Ladungsträger pro Pixel	30 000 e ⁻
Abbildungsmaßstab	0.025'' Pixel ⁻¹

3.1 Design

GREGOR hat eine einfahrbare Zeltkuppel und nutzt natürlich vorkommende Windströmungen um Turbulenzen in der Nähe des Teleskops zu beseitigen. Das offene Design von GREGOR war unumgänglich, da das Eintrittsfenster eines evakuierten Teleskoptubus bei einer Öffnung mit einem Durchmesser von mehr als einem Meter zu dick wird, sodass die Transmission leidet und Doppelbrechung die polarimetrischen Eigenschaften des Teleskops negativ beeinflusst.

GREGOR ist ein doppeltes Gregory System, bestehend aus drei bildgebenden Spiegeln. Es hat zwei Zwischenbrennpunkte f_1 und f_2 . Der parabolische Hauptspiegel M1 hat einen Durchmesser von $d_1 = 1500$ mm und eine Brennweite von $f_1 = 2500$ mm. In der primären Brennebene wird die Sonne mit einem Durchmesser von 25 mm abgebildet, dabei wird eine Leistung von etwa 2000 W empfangen und eine Flussdichte von 6 MW/m² erzeugt. Durch die elliptischen Sekundärspiegel M2, mit dem Durchmesser $d_2 = 400$ mm und der primären Brennweiten $f_2 = 520$ mm, wird f_1 auf dem zweiten Brennpunkt f_2 abgebildet. M3, mit dem Durchmesser $d_3 = 300$ mm und der primären Brennweite $f_2 = 1400$ mm, fängt f_2 auf und erzeugt den $f/40$ -Science-Beam. Durch M2 und M3 entstehen innerhalb des Teleskops zwei Fokalebene. In der ersten Fokalebene F1 befindet sich die wassergekühlte Bildfeldblende, die ein Lichtbündel mit einem Durchmesser von 150'' durchläßt. Der Rest des Sonnenlichtes wird aus dem Tele-

skop herausgesiegelt. In der zweiten Fokalebene F2 befindet sich die polarimetrische Kalibrierungseinheit (GPU), sowie der Umlenkspiegel in die Höhenachse des Teleskops (Hofmann *et al.* 2012; Berkefeld *et al.* 2012).

Der Spiegel M3 erzeugt das endgültige Bild, welches durch den Faltspiegel M4 entlang der Höhenachse in Richtung des Faltspiegel M5 reflektiert und über weitere Faltspiegel in den, ein Stockwerk tiefer gelegenen Beobachtungsraum gelenkt wird, wie in der Abbildung 3.2 dargestellt (Schmidt *et al.* 2012).

3.2 Steuereinheit

Die Steuereinheit des Sonnenteleskops GREGOR ist modular aufgebaut (Halbgewachs *et al.* 2012). Die Ausrichtung nach der Sonne geschieht automatisiert, basierend auf Ephemeridenberechnungen und experimentell abgeleiteten Positionsmarkierungen und benötigt daher keinen Autoguider (Granzer *et al.* 2012). Die Ausrichtung des Teleskops wird aber mit einem kleinen Hilfsteleskop überwacht. Die Eingabe sowohl (kartesischer) Koordinaten auf der Sonnenscheibe, als auch heliografischer Koordinaten ist für eine Detail-Beobachtung von Objekten auf der Sonnenoberfläche möglich (Schmidt *et al.* 2012). Für weitere astronomische Beobachtungen in der Nacht ist eine Eingabe der korrekten Rektaszension und Deklination erforderlich. Zudem wird die Beobachtung dadurch vereinfacht, dass Objektkoordinaten in Tracking-Listen gespeichert und auch wieder hergestellt werden können (Schmidt *et al.* 2012).

3.3 Adaptive Optik

Ein unverzichtbarer Bestandteil von Sonnenteleskopen für hohe räumliche Auflösung, die am Boden innerhalb der Erdatmosphäre betrieben werden, ist ein AO System (Berkefeld *et al.* 2012). Dies ermöglicht eine räumliche Auflösung nahe der Beugungsgrenze. Durch das atmosphärisches Seeing, also die Bildunschärfe durch Luftunruhe, ist die Winkelauflösung während Beobachtungen am Tage auf etwa 1'' begrenzt und liegt damit weit über der Beugungsgrenze eines Teleskops mit einer Öffnung von 1.5 m. Das optische Design von GREGOR beinhaltet ein Standard-AO-System, sowie die Möglichkeit zur Nutzung einer Multi-Konjugierten Adaptiven Optik (MKAO), bei der mehrere verformbare Spiegel Anwendung finden. Da keiner der Spiegel des Teleskops oder des Coudé-Strahlengangs (der durch den zweiten Fokus von M3 verlängerte Strahlengang wird durch Planspiegel durch die Drehachse des Teleskops in das Optiklabor geleitet) für die AO geeignet ist, wurden der deformierbare Spiegel (DM) und der Tip-Tilt-Spiegel (TT) im Hauptbeobachtungsraum auf einer stationären optischen Bank montiert. Auf dieser sind auch die zusätzlich benötigten deformierbaren Spiegel des MKAO-Systems angebracht (Schmidt *et al.* 2012).

Das GREGOR Adaptive Optik System (GAOS 256) nutzt einen deformierbaren Spiegel, angetrieben von 256 Aktuatoren, die sich auf der Rückseite eines Membranspiegels befinden und

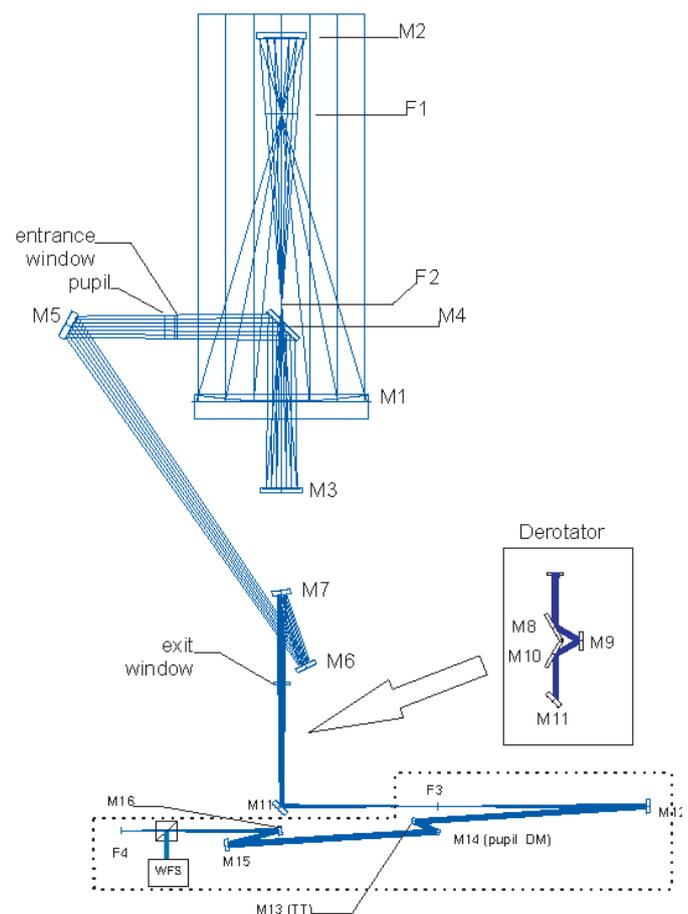


Abbildung 3.2 Optisches Design GREGOR. F1 bis F3 bezeichnen die Brennebenen des Teleskops. Durch adaptive Optik korrigiertes Bild F3 bis F4 (Abb. 3 in Soltau *et al.* 2012).

Tabelle 3.2 Eigenschaften des GREGOR AO Systems (Tabelle 1 in [Berkefeld et al. 2012](#))

Seeing (beugungsbegrenzt, 40% Strehl)	$< 1.2''$
Seeing (stabiler Betrieb)	$< 1.6''$
Abstand zum Sonnenrand (Fackelpunkte)	$> 7''$
Max. Zahl korrigierter Moden	140
Frequenz des Regelkreis	2500 Hz
Bandbreite bei geschlossener Schleife	120 Hz

Tabelle 3.3 Eigenschaften des DM (Tabelle 4 in [Berkefeld et al. 2012](#))

Modell	CILAS SAM256
DM-Art	Stacked Piezo
beleuchteter Durchmesser	48 mm
Abstand der Aktuatoren	3.2 mm
Auslenkung der Piezo Elemente	8.6μ
Spannungsbereich	± 400 V
Für Ebnung erforderliche Spannung	$< \pm 5 \%$
statischer WF-Fehler	< 10 nm RMS
charakteristische Kapazität	3.4 nF
Hysterese	$< 10 \%$
erste mechanische Resonanzfrequenz	> 2 kHz

ihre Steuerinformation von einem Shack-Hartmann Wellenfrontsensor (SH-WFS) erhalten. Die wichtigsten Parameter von GAOS, sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst und die Eigenschaften des DM sind in Tabelle 3.3 aufgeführt ([Berkefeld et al. 2012](#)).

Die allgegenwärtige Granulation auf der Sonnenoberfläche ermöglicht die Bestimmung der Wellenfront beinahe überall auf der Sonnenoberfläche und ermöglicht so das Verfolgen von Sonnenstrukturen, solange die Aufnahmen ausreichend kontrastreich sind. Der Granulationskontrast nimmt zum Rand der Sonnenscheibe hin ab und der WFS benötigt in diesen Bereichen beispielsweise einen Fackelpunkt mit sehr großem Helligkeitskontrast.

Alle häufig genutzten opto-mechanischen Elemente (Filterräder und Blenden) sind motorisiert und können über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI, engl. graphical user interface) bedient werden ([Berkefeld et al. 2012](#); [Halbgewachs et al. 2012](#)).

Die Bandbreite der geschlossenen Schleife des Systems beträgt 120 Hz und es gibt maximal 170 korrigierte Moden. Durch die konventionelle AO wird lediglich eine radiale Korrektur in einem Bereich von etwa $5''$ erreicht. Um eine Vergrößerung des korrigierten Bereichs zu erwirken, hat das KIS in 2006 die Entwicklung der MKAO begonnen ([Schmidt et al. 2010](#)).

Die im System verbliebenen Aberrationen können mithilfe der Auswertung von aufgenommenen Targetbildern bestimmt werden und durch eine entsprechende Anpassung des Systems minimiert werden, um so die Aufnahmequalität zu erhöhen. Dafür werden über Methoden der digitalen Datenverarbeitung ermittelte Werte als Offsets auf den DM der AO eingestellt. Im Rahmen dieses Projekts sollen solche Targetbilder, des USAF1951-Auflösungstargets, ausgewertet und eine optimale Metrik gefunden werden, um einen automatisierten Prozess zur Fokussierung der Kameras und zur Optimierung der Moden-Offsets zu entwickeln.

Tabelle 3.4 WFS-Eigenschaften beim Start in 2013 (Tabelle 2 in [Berkefeld et al. 2012](#)).

WFS Attribut	korrelierender SH
Anzahl der Subaperturen	156
Subaperturgröße (Pupillenebene)	10 cm (quer 15 cm)
Pixelzahl pro Subapertur	24 × 24
FOV	12'' × 12''
Pixelgröße	0.5'' Pixel ⁻¹
Kamerabild des WFS	400 × 400 Pixel
Bildrate	2500 Hz
Beobachtungswellenlänge	500 nm, 10 nm Band

3.3.1 Optisches Design

Nachdem der $f/40$ -Science-Beam vom Brennpunkt f_2 durch den nächsten Spiegel in das Optiklabor geleitet wird, wird das Licht durch den Flachspiegel M11 auf die AO-Bank reflektiert. Ähnlich zu f_2 , kann auch in das motorisierte Filterrad bei f_3 verschiedene Blenden, Pinholes, Targets, etc. installiert werden. Durch den Kollimator M12 wird die Eingangsöffnung auf den DM-Spiegel M14 abgebildet, der Durchmesser der Eingangsöffnung auf dem DM beträgt dabei 48 mm. Der davor gelegene Tip-Tilt-Spiegel M13 eliminiert den Bildversatz, wodurch M14 nur noch die Bildunschärfe kompensieren muss. Durch Abbildung der Öffnungsebene ins Unendliche wird der $f/40$ -Science-Beam (Abbildungsgröße 3.6'' mm⁻¹) durch den Kamera-Spiegel M15 wiederhergestellt ([Berkefeld et al. 2012](#)).

Von den zwei verwendeten WFS wird einer für den Broad-Band Imager (BBI, [von der Lühe et al. 2012](#)) genutzt und der zweite wird sowohl für das GFPI ([Puschmann et al. \(2012a\)](#), siehe Kap. 3.4) als auch für den GREGOR Infrarot-Spektrographen (GRIS, [Collados et al. 2012](#)) verwendet. Um Fehler durch Instrumenten-Seeing, Gebäudevibrationen, fixe Aberrationen und ähnliches zu vermeiden, wurde der WFS vor den jeweiligen wissenschaftlichen Instrumenten platziert ([Berkefeld et al. 2012](#); [Schmidt et al. 2012](#)).

Bei dem WFS handelt es sich um einen korrelierenden Shack-Hartmann (SH) WFS. [Abb. 3.3](#) zeigt schematisch den optischen Aufbau des WFS. Vor dem WFS-Brennpunkt f_4 befindet sich ein motorisiertes Filterrad. In diesem enthalten sind 10 unterschiedliche Graufilter, welche die Intensität bis zu einem Faktor von 10 abschwächen können. In der motorisierten Fokuseinheit enthalten sind ein Dark-Stop, ein Pinhole, das als interne Referenz genutzt wird, eine quadratische 12'' Feldblende, die während der Beobachtung genutzt wird und eine freie (nicht blockierte) Position. Der DM hat 256 Aktuatoren und die Linsenmatrix (engl. Lenslet) 156 beleuchtete Subaperturen innerhalb der Öffnung. Die Halterungen von M2 und F2 erscheinen in der Pupillenöffnung ausreichend dünn und verschlechtern die Aufnahmequalität der Subaperturen nur leicht, weshalb die Bildrotation vernachlässigt werden kann. Die korrekte Abbildungsgröße auf dem WFS wird durch die Linsen L3 und L4 erzeugt. Um die anfängliche Ausrichtung zu vereinfachen, kann L3 so verfahren werden, dass direkt auf die Öffnung geschaut werden kann. Die Eigenschaften des WFS sind in [Tabelle 3.4](#) aufgelistet.

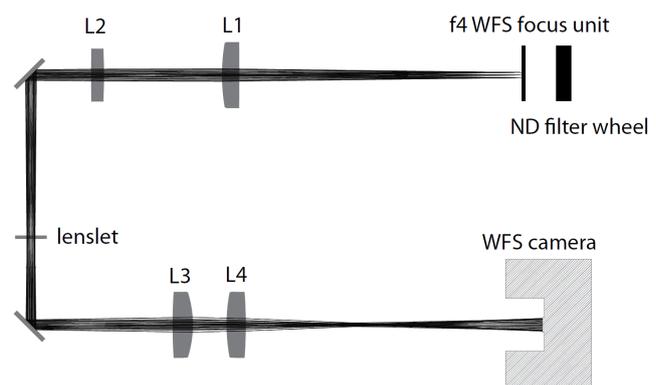


Abbildung 3.3 optischer Aufbau des WFS ([Abb. 3 in Berkefeld et al. 2012](#)).

Die Eigenschaften der für die Adaptive Optik verwendete Kamera (Mikrotron Eosens 1362 CL) sind in [Tabelle 3.5](#) aufgelistet. Wie bei allen schnellen Kamerasystemen ist auch hier die geringe ma-

Tabelle 3.5 Eigenschaften der WFS-Kamera (Tabelle 3 in [Berkefeld et al. 2012](#)).

Kameramodel	Mikrotron Eosens 1362 CL
Detektortyp	CMOS
Digitalisierung	8 Bit
Pixelzahl	1280 × 1024 Pixel
Schnittstelle	Full Camera Link
maximale Pixelfüllmenge (engl. full well capacity)	30000 e^-
Pixelgröße	14 μm
Ausleserauschen	40 e^-
Quanteneffizienz (500 nm)	ca. 25 %

ximale Pixelfüllmenge ein kritischer Aspekt, da das Schrotrauschen über das Bildrauschen und das Digitalisierungsrauschen zu dominieren beginnt ([Berkefeld et al. 2012](#)).

3.3.2 Rekonstruktion der WF

Um die Phasenverschiebung zueinander und somit die Neigung der Wellenfront in der Subapertur zu berechnen wird für solare Beobachtungen mit AO immer ein SH-Sensor und eine Kreuzkorrelation der Abbildungen der Subaperturen mit einer Referenz verwendet. Die Reihenfolge, in der die Datenreduktion mit Dunkel- und Weißbild für jedes der 24×24 Pixel beim AO-System von GREGOR vorgenommen wird, wird im Folgenden aufgeführt ([Berkefeld et al. 2012](#)):

- Korrektur
- Abzug der mittleren Intensität
- Entfernung des Intensitätsgradienten über das Bildfeld
- Anwendung eines Hamming Fensters mit einer FWHM von fünf Pixeln
- Addition der vorherigen durchschnittlichen Intensität
- Normierung der Intensität

Zur Anwendung der Fensterfunktion, durch die Aliasingeffekte der Fast Fourier Transform (FFT) bei der Berechnung der Kreuzkorrelation eliminiert werden, empfiehlt es sich, die durchschnittliche Intensität zu addieren oder subtrahieren. Um die korrekte Position des Maximums der Korrelationsfunktion zu erhalten, ist es erforderlich den Gradienten und die Normierung der Intensität zu entfernen ([Berkefeld et al. 2012](#)).

Das Teilbild wird dann mit der Referenz, die die selbe Datenreduzierung erfahren hat, kreuz-korreliert. Dafür wird eine FFT-basierte Kreuzkorrelation angewendet, da diese, wenn viele Pixel in dem zu korrelierenden Feld liegen, schneller ist als die direkte Kreuzkorrelation. Die Korrelationsfunktion C der Subapertur S und der Referenz R kann als

$$C = FFT^{-1} [FFT[S] \times (FFT[R])^*] \quad ,$$

geschrieben werden, dabei kennzeichnet der Asterisk die komplex konjugierte Form. Die Position des korrelierten Maximums C_{\max} wird durch Anwendung eines parabolischen 2D-Abgleichs über 3×3 Pixel um das hellste Pixel berechnet. Das Fehlersignal des WFS ist durch den xy -Versatz S_{shift} gegeben ([Berkefeld et al. 2012](#)):

$$S_{\text{shift}} = R_{\text{ref}} - S_{\text{ref}} + R_{\text{shift}} + C_{\max} - 24/2$$

Die idealen Punkte des Referenzbildes der Kreuzkorrelation R und der Subapertur S sind gegeben durch R_{ref} bzw. S_{ref} . Diese erhält man, wenn die Aperturblende in den Eingangsbrennpunkt des WFS verschoben wird und dann die Bildlage der Aperturblende auf der WFS-Kamera gemessen wird.

Durch Auswahl des kontrastreichsten Bilds innerhalb der letzten Minute wird das Referenzbild für eine fixe Subapertur in der Nähe der Pupillenmitte einmal pro Minute aktualisiert, da dieser Zeitraum kürzer ist als die Veränderung der Struktur der Sonne, die von der Subapertur in diesem Zeitraum aufgelöst werden können. Dabei ermöglicht eine Aktualisierungsrate von 5 Hz eine große Auswahl an möglichen Referenzbildern. Der xy -Versatz R_{shift} des kreuzkorrelierten Referenzbildes pflanzt sich dabei vergleichbar der normalen Kreuzkorrelation fort (Berkefeld *et al.* 2012):

$$R_{\text{shift,neu}} = R_{\text{shift,alt}} + C_{\text{max}} - 24/2$$

Zur modalen Darstellung der gemessenen WF werden die Karhunen-Loeve (KL)-Funktionen genutzt. Diese bilden einen Satz orthonormaler Basisfunktionen, deren Koeffizienten für das Seeing statistisch unabhängig sind und mit der Kolmogorov-Turbulenz korrespondieren, somit bilden sie eine diagonale Kovarianzmatrix. Verglichen mit den Zernike Polynomen ermöglichen sie eine genauere Messung am Rand der Pupille. Die statistische Unabhängigkeit der KL-Moden verringert die Anzahl der benötigten Moden, die zur Beseitigung des selben Betrags an WF-Fehler benötigt werden und erhöhen damit die Stabilität und Genauigkeit des Regelkreises. Der Modenvektor m wird durch die modalen Koeffizienten gebildet und durch Multiplikation mit der Matrix MA als Aktuatorenwerte in den Vektor a übertragen. Durch Übertragung der KL-Funktion auf die individuellen Einflussfunktionen der Aktuatoren wird MA vorberechnet (Berkefeld *et al.* 2012).

Der xy -Versatz der Subaperturabbildung findet sich im Verschiebungsvektor s wieder, dieser kann durch die Matrix SM in den Modenvektor umgewandelt werden, dabei ist SM gegeben durch (Berkefeld *et al.* 2012):

$$SM = (AS \times MA')^{-1} \quad (3.1)$$

AS stellt die gemessene Indikationsmatrix zwischen dem DM und WFS dar. Sie konvertiert den Aktuatorvektor in den Verschiebungsvektor und wird während der Kalibrierung der AO gemessen. MA' ist eine gefilterte Version von MA, sie enthält nur nutzbare Moden und verringert dadurch Rauschen, das durch schlecht abgetastete Moden, oder Moden die schwer zu korrigieren sind, verursacht wird (Berkefeld *et al.* 2012).

Durch den Aliasineffekt können Moden höherer Ordnung, die nicht durch den WFS erfasst werden können, fehlinterpretiert werden und so ein WFS-Signal erzeugen, das als eine Kombination von Moden niedriger Ordnung registriert wird (Berkefeld *et al.* 2012).

Die Rekonstruktion der Wellenfront ist aufgeteilt in verschiedene parallel ablaufende Schritte (Berkefeld *et al.* 2012):

- Berechnung des Verschiebungsvektors s des WFS,
- Konvertierung in den Modenraum $m = SM \times s$,
- modaler Verstärkungsfilter $m' = \text{filter}(m)$,
- modaler PID-Regler $m'' = \text{pid}(m')$,
- Konvertierung in den Aktuatorenraum $a = MA \times m''$, und
- Aktuator-Begrenzung $a = \text{clip}(a)$.

Die Konvertierungen vom Verschiebungs- in den Modenraum, beziehungsweise vom Moden- in den Aktuatorenraum werden durch die Matrizen SM und MA beschrieben und anschließend wird der Aktuatorenbefehl Vektor a' an die HV-Elektronik übergeben (Berkefeld *et al.* 2012).

Zur Regelung des TT-Spiegels wird ein Standard-PID-Regler (engl. proportional–integral–derivative controller) genutzt und für den DM ein PI-Regler. Der auftretende WF-Fehler kann prinzipiell, bei geschlossener Schleife, durch eigenständige Sätze von Parametern für die PI(D)-Regler optimiert werden. Aufgrund der schnellen Wechsel des Seeings, die während des Tages auftreten können, wurden feste Sätze von Parametern für den TT und den DM festgelegt, die je nach gegebenen Seeing-Bedingungen automatisch ein- oder ausgeschaltet werden (Berkefeld *et al.* 2012).

Langsam variierende Fehler in der Ausrichtung des Teleskopes werden durch die Aktive Optik ausgeglichen, die einen wesentlichen Bestandteil der AO darstellt. Die Aktive Optik übernimmt die Steuerung des Sekundärspiegels M2 und sorgt so für die Einhaltung der engen Toleranzen in der optischen Ausrichtung zwischen M1 und M2, zudem regelt sie die axiale Positionierung von M3. Hinsichtlich der Zernike Koeffizienten ist somit die Möglichkeit gegeben, durch kombinierte axiale Bewegung von M2 und M3, den Fokus und sphärische Aberrationen zu korrigieren. Durch die Kombination von Neigung und seitlicher Bewegung von M2 kann die Koma korrigiert werden. Praktisch werden die zeitlich gemittelten KL-Koeffizienten genutzt und nicht die Zernike Koeffizienten. Gegenwärtig wird entsprechend Beobachtungen beim Verfahren von M2 der Fokus manuell korrigiert und die verbleibenden festen Aberrationen werden durch die regulären Wirkungsweisen der AO korrigiert (Berkefeld *et al.* 2012).

Zudem ist eine stabile Pupillenausrichtung für eine gut funktionierende AO erforderlich. Die Positionierung der Pupille auf dem TT und dem DM wird am stärksten durch die Neigung des Flachspiegels M11 beeinflusst, der sich Nahe an f_3 befindet. Er wird also von der AO so angesteuert, dass die am Rand gelegenen Subaperturen die selbe Intensität des Gesamtbildes auffangen wie die Gegenüberliegenden (Berkefeld *et al.* 2012).

3.4 GREGOR Fabry-Pérot Interferometer

Um die Vorgänge der dynamischen Sonne nachvollziehen zu können, sind Instrumente mit guter zeitlicher und hoher räumlicher Auflösung nötig. GREGOR wurde deshalb mit dem GREGOR Fabry-Pérot Interferometer (GFPI) ausgerüstet, dessen Forschung sich auf Spektralpolarimetrie im sichtbaren Spektralbereich konzentriert. Dafür sind zwei Schmalbandetalons mit einem Durchmesser von 70 mm und großformatige CCD-Detektoren integriert, begleitet von speziell entwickelter Hard- und Software, die automatisierte Beobachtung und Kalibrierung ermöglicht (Puschmann *et al.* 2012b). Zusätzlich sind Messung zur Bestimmung der Stokes-Parameter möglich und damit zur Bestimmung des Magnetfeldes (Puschmann *et al.* 2012a).

Das GFPI erhält Licht durch ein dichroitischen Strahlteiler, welches sich hinter der Adaptiven Optik befindet, direkt vor dem Brennpunkt F4. Während der Strahlteiler den IR Spektralbereich zum GRIS passieren lässt, wird der Bereich bis zu 850 nm in Richtung des GFPI reflektiert und ermöglicht so Beobachtungen der $H\alpha$ und der Ca II IR-Linien (Puschmann *et al.* 2012a).

Das gewählte Design des GFPI basiert auf Berechnungen, denen die geometrische Optik zu Grunde liegt. Dabei bilden der Schmalbandkanal (NBC), der Breitbandkanal (BBC) und der High-Resolution-Fast-Imager (HiFI) die Hauptbestandteile. Der Durchmesser des Lichtstrahls an den verschiedenen Brennpunkten und Öffnungen, sowie auf allen relevanten optischen Oberflächen wird zusammen mit einer Abbildung des Hilfsstrahls angezeigt, siehe Abb. 3.4 (Puschmann *et al.* 2012a).

Das GFPI nutzt CCD Kameras, die im Vollbild eine Bildrate von 10 Hz haben. Die verwendeten

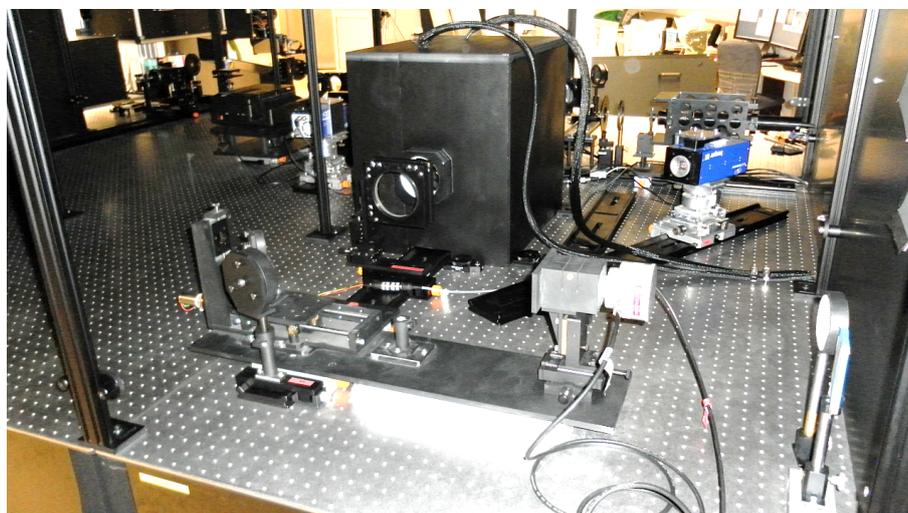


Abbildung 3.4 Aufbau des GFPI auf optischer Bank (AIP).

Tabelle 3.6 Eigenschaften des GFPI und HiFI Bildaufnahmesystems (Tabelle 2 in [Puschmann et al. 2012a](#))

	NBC und BBC	HiFI
Kamera	2 × Imager QE	2 × pco.edge 5.5
Detektorart	CCD	sCMOS
Pixel	1376 × 1040	2560 × 2160
Pixelgröße [μm^2]	6.45 × 6.45	6.5 × 6.5
Ausleserauschen	4.5 e ⁻	1.1 med / 1.5 rms e ⁻ 33 fps, slow scan 2.2 med / 2.5 rms e ⁻ 50 fps, fast scan
Full-Well-Kapazität [e ⁻]	18000	30000
Spektralbereich [nm]	320 – 900	370 – 530
Quanteneffizienz	60 % @ 550 nm 45 % @ 530 nm	> 60 % @ Peak
Digitalisierung [Bits]	12	16
Bildfeld	50'' × 38''	64.8'' × 54.6''
Bildskala	0.0361'' Pixel ⁻¹	0.025'' Pixel ⁻¹
Bildrate	10	≈ 50

Tabelle 3.7 Etalons und spektrale Eigenschaften des GFPI (Tabelle 3 in [Puschmann et al. 2012a](#))

	Etalon 1	Etalon 2
Hersteller	ICOS	ICOS
Durchmesser [mm]	70	70
Finesse	46	46
Reflektivität [%]	95	95
Etalonabstand [mm]	1.1	1.4
FWHM [pm] @ 617 nm	3.43	2.73
FWHM kombiniert [pm] @ 617 nm	1,95	
Spektrale Auflösung	250 000	
Streulicht [%]	≈ 1.0	
Kontrollgerät	CS-100 (ICOS)	
Beschichtung (HR)	530 – 860 nm	

sCMOS-Kameras in HiFI haben bei voller Auflösung eine maximale Bildrate von etwa 50 Hz ohne Binning. Binning bezeichnet das Zusammenfassen von Pixeln zu Superpixeln, wodurch die Sensitivität gesteigert wird und das Signal- zu Rauschverhältnis (SNR) sich verbessert. Die räumliche Auflösung verschlechtert sich aber aufgrund von Undersampling. Die Eigenschaften des Bildaufnahmesystems sind in Tabelle 3.6 aufgeführt ([Puschmann et al. 2012a](#)).

Die Kommunikation der internen Geräte (Kamera, Etalons, Polarimeter und Filter- und Spiegelschieber) und der Peripheriegeräte (Teleskop, AO-System, AO-Filterrad, GPU, etc.) wird mithilfe des Softwarepakets DaVis von LaVision (Göttingen) geregelt ([Puschmann et al. 2012a](#)).

3.5 High-resolution Fast Imager

Das HiFI-System ersetzt die Kameras aus dem BIC des GFPI, da diese eine zu geringe Datenerfassungsrate hatten, wodurch die Bildrekonstruktion negativ beeinflusst wurde. Es stellt Kontextbilder mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für GRIS und das GFPI im blauen Spektralbereich bereit. Dabei erlaubt der dichroitische Strahlteiler im blauen Kanal des GFPI Beobachtungen unterhalb von 530 nm ([Denker](#)

Tabelle 3.8 Eigenschaften der Interferenzfilter des HiFI-Systems: primäre Wellenlänge λ_0 , Maximaltransmission τ_{\max} , Beugungsgrenze α (Denker *et al.* 2018a)

Filter	λ_0	FWHM	τ_{\max}	α
IF450	450.55 nm	1.15 nm	64.5 %	0.065''
IF430	430.70 nm	1.20 nm	54.4 %	0.062''
IF396	396.80 nm	1.08 nm	63.8 %	0.057''
IF*396	396.84 nm	0.12 nm	17.1 %	0.057''

et al. 2018a). Die beiden synchronisierten, großformatigen sCMOS-Detektoren ermöglichen durch die programmierbare Synchronisationseinheit (PTU) eine Genauigkeit des Taktsignals in der Größenordnung von Mikrosekunden. Zudem zeichnen sich diese Detektoren durch eine hohe Quanteneffizienz aus, mit einem Maximum von 57 % bei einer Wellenlänge von 600 nm, einem geringen Ausleserauschen, das bei $286 \text{ MHz} < 3 e^-$ ist und einer schnellen Datenerfassung. Sie ermöglichen einen Abbildungsmaßstab von $0.025'' \text{ Pixel}^{-1}$ oder 18 km auf der Sonnenoberfläche (Denker *et al.* 2018b). Die Eigenschaften der vier verfügbaren Interferenzfilter sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Abhängig vom Sonnenstand und der Transparenz des Himmels werden Belichtungszeiten von $t_{\text{exp}} = 1.2$ oder 1.5 ms benötigt. Durch Interferenzfilter werden die Spektralbereiche des Fraunhofer G-Bands $\lambda = 430.7$ nm, des blauen Kontinuums $\lambda = 450.6$ nm und die starke Absorptionslinie des Ca II H bei $\lambda = 396.8$ nm abgedeckt. Dabei weisen diese Filter eine Halbwertsbreite (HWB) von ungefähr 1.1 nm auf. Die Strahlengänge beider Detektoren sind identisch und weisen damit die selben Aberrationen auf, lediglich der Strahlteiler am Ende des Strahlengangs unterscheidet sie von einander, verursacht aber Aberrationsunterschiede die vernachlässigbar sind, siehe Abb. 3.5.

Die von der LaVision GmbH Göttingen gefertigten sCMOS-Kameras haben 2560×2160 Pixel, mit einer Pixelgröße von $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$. Beim Betreiben beider Kameras kann eine Datenerfassungsrate von 49 Hz erreicht werden. Zudem ist es möglich für spezielle Anwendungen eine Bildregion (ROI, engl. region of interest) festzulegen und die Zahl der auszulesenden Pixel zu begrenzen und so die Datenerfassungsrate stark zu erhöhen (Denker *et al.* 2018b).

Die große Anzahl von Daten, die durch das GFPI und HiFI geliefert werden, stehen den Sonnenphysikern weltweit mittels der Datenpipeline sTools zur Verfügung (Kuckein *et al.* 2017).



Abbildung 3.5 Aufbau des HiFI-Systems auf optischer Bank. In der Mitte steht der 40/60 % Strahlteiler, der das einfallende Licht aufteilt (AIP).

Kapitel 4

Ergebnisse

Die die von den Transferoptiken und anderen optischen Elementen, vom Fokus F3 zu den Science-Foki verursachten Aberrationen, können verringert werden, indem man einen entsprechenden Offset bei der AO einstellt. Dieser beeinflusst die Ansteuerung der Aktuatoren des DM und führt zu einer besseren Aufnahmequalität.

Die im Folgenden behandelten Daten wurden für GFPI und HiFI aufgenommen, die jeweils mit zwei Kameras ausgestattet sind. Insbesondere die HiFI-Kameras sollten die gleichen Aberrationen sehen, da es sich um ein synchronisiertes Zwei-Kamerasysteme handelt, bei dem sich die Strahlengänge nur durch den Strahlteiler am Ende des Strahlenganges unterscheiden. Dadurch werden die Aberrationen auf beiden Detektoren korrigierbar. Zu diesem Zweck wurden Messdaten aufgenommen und mithilfe moderner Methoden der digitalen Datenverarbeitung ausgewertet. Um eine korrekte Auswertung der Messdaten zu gewährleisten, wurde zu Beginn eine Korrektur mit dem Dunkelbild, sowie eine Weißbildkorrektur vorgenommen. Für das Dunkelbild (engl. dark frames) wird im Filterrad vor der AO die geschlossene Position gewählt und so während der Aufnahme der Strahlengang zu allen Instrumenten unterbrochen. Auf diese Weise erhält man schwache Signale, die durch thermische und elektrische Einflüsse am Detektor, auch ohne Lichteinfall, entstehen. Diese werden gemittelt und von den auszuwertenden Daten abgezogen ([Denker et al. 2018a](#)). Die Weißbildkorrektur (engl. flat-field frames) wird genutzt, um unterschiedliche Pixelempfindlichkeiten und daraus resultierende Schwankungen bei der Detektion zu korrigieren.

Anschließend wurde der Fokus manuell eingestellt. Dafür wird das Filterrad F3 auf das Target gedreht und mit einer Mikrometerschraube die Kamera so verfahren, dass das Livebild scharf erscheint. Darauf folgend können die Daten zu den verschiedenen Aberrationen aufgenommen werden. Dafür wird ein festgelegter Messbereich in einer bestimmten Schrittgröße untersucht. Der auf der x -Achse aufgetragene Messbereich betrug bei den folgenden Aufnahmen ± 1 rad (Datenreihe aufgenommen am 28. März 2017) und wurde in einer Schrittweite von 0.2 rad abgetastet. Dadurch entstanden je 11 Aufnahmen pro Kamera, die in [Abb. 4.1](#) gezeigt sind. Um die Bildqualität der so entstanden elf Aufnahmen zu messen, wurden verschiedene Metriken auf diese angewendet. Die Auswahl der Metriken zur Auswertung wurde im Rahmen dieses Projekts auf Sobel, Roberts, Prewitt, Helmi-Scherer-Mittelwert (HSM) und Median Filter-Gradient Similarity (MFGS, [Deng et al. 2015](#)) begrenzt und soll zeigen, welche die am effektivsten arbeitende Metrik ist. In den folgenden Abbildungen ist die daraus resultierende Bildqualitätsmatrix als schwarze Kurve geplottet. Ein Parabelfit 2. Ordnung wurde angewendet und als rote Kurve über den Plot gelegt. Dabei entspricht das Maximum der roten Kurve dem optimalen Moden-Offset zur Korrektur der Aberration. Entgegen den Erwartungen, dass dieser nahe Null zu finden ist, sind tatsächlich größere Abweichungen festzustellen.

Tabelle 4.1 2D-Kernel die von den jeweiligen Metriken zur Berechnung dse Gradienten genutzt werden.

Filter	Sobel	Roberts	Prewitt	Scharr
x-Kernel	$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{vmatrix}$
y-Kernel	$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{vmatrix}$

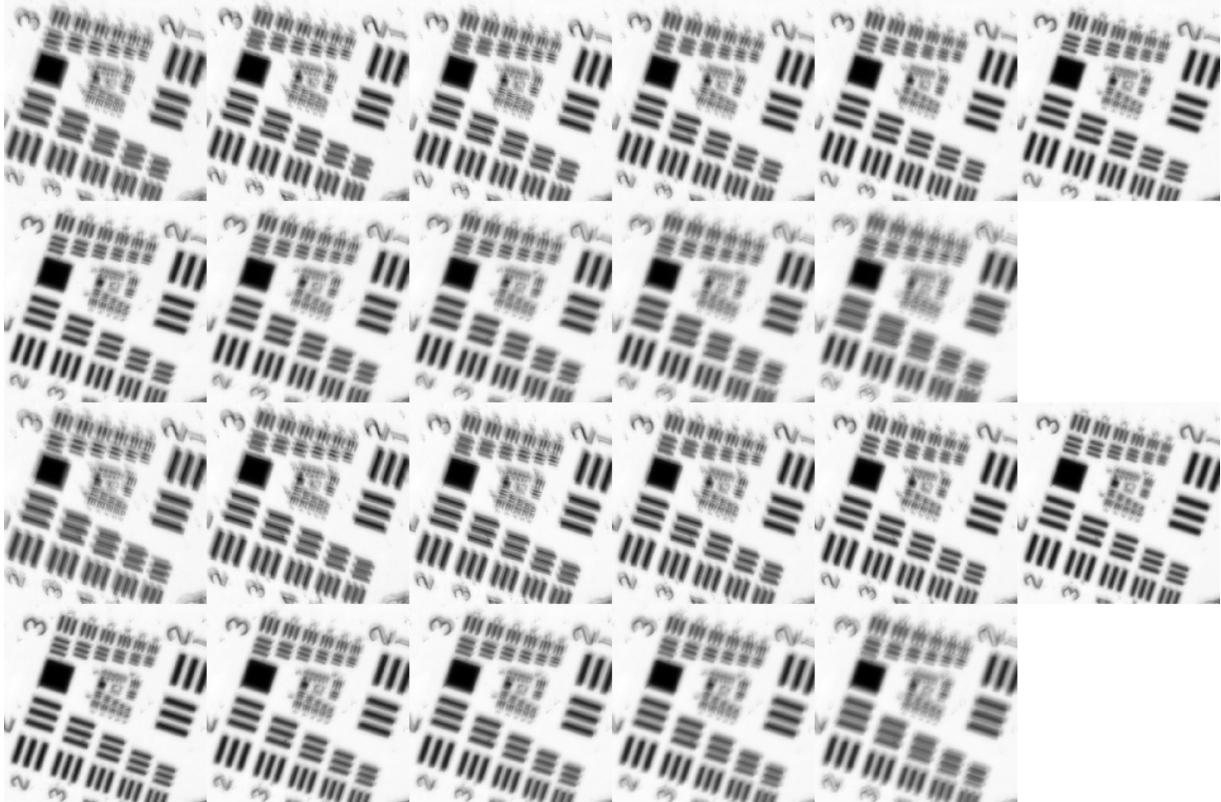


Abbildung 4.1 Aufnahmeserie des Auflösungs-targets für die Untersuchung des Fokus. Die oberen elf Aufnahmen wurden mit Kamera 1 (Ca II H) gemacht, die unteren 11 mit Kamera 2 (G-Band). Die Fokussierung ist von links nach rechts in einem Bereich von ± 1 rad in 0.2 rad Schritten verstellt worden. Die beste Fokusposition ist für Kamera 1 $x_1 = -0.4$, Kamera 2 $x_2 = -0.2$ (Werte aus der Auswertung mit Roberts).

4.1 Datenauswertung – Fokus

Sobel, Roberts und Prewitt sind Filter, die den Betrag des Gradienten für Bilder zurück geben, wobei Größe und Typ erhalten bleiben. Die Anwendung des jeweiligen Filters entspricht einer Faltung mit verschiedenen Kernels, die in Tabelle 4.1 aufgeführt sind. Der Helmi-Scherer-Mittelwert basiert auf einem Median-Filter. Dafür wird über eine vorher definierte Breite eine Glättung vollzogen und das Verhältnis von geglättetem Bild und Original gebildet. Werte, die kleiner Eins sind, werden mit dem Kehrwert ersetzt. Abschließend wird der Mittelwert gebildet.

Die Daten aus Abb. 4.2 und 4.3 sind Auswertungen der Aufnahmen für das HiFi-System, dabei sind die Daten für Abb. 4.2 mit der Kamera zur Detektion des Ca II H-Bereichs aufgenommen worden und die Daten für Abb. 4.3 wurden mit der zweiten Kamera, die zur Beobachtungen des G-Bands dient, aufgenommen. In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass Sobel, Roberts und Prewitt fast identische Bildqualitätsmetriken erzeugen und lediglich einen klar erkennbaren Unterschied in dem, auf der y-Achse aufgetragenen, Signal aufweisen. Auch HSM erzeugt einen vergleichbaren Kurvenverlauf, was zur Folge

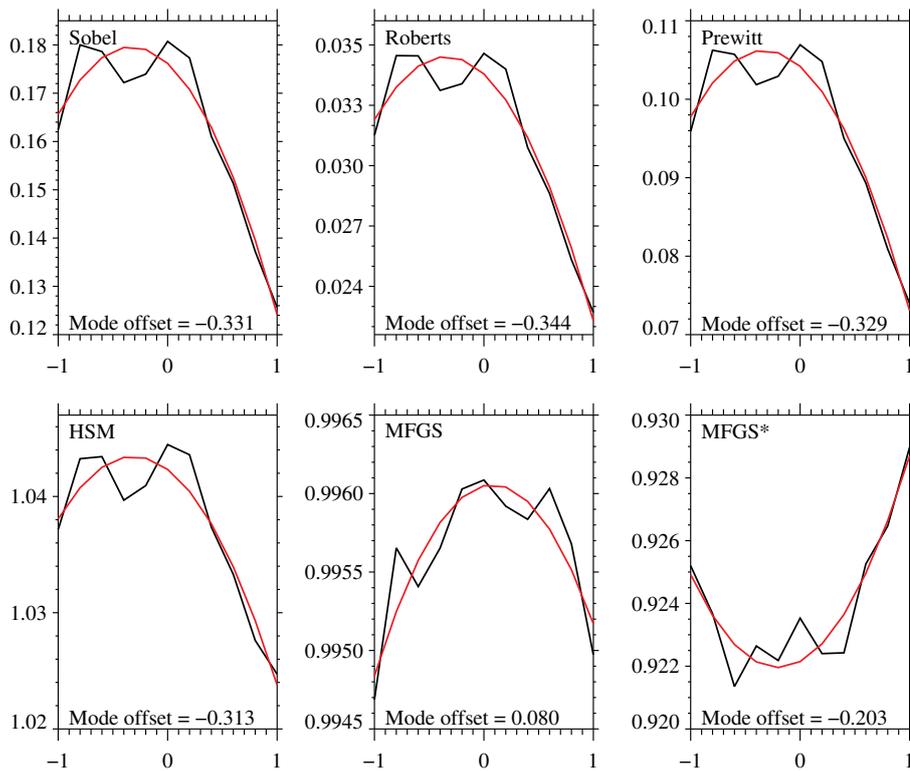


Abbildung 4.2 Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Ca II H-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung für die verschiedenen Metriken dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

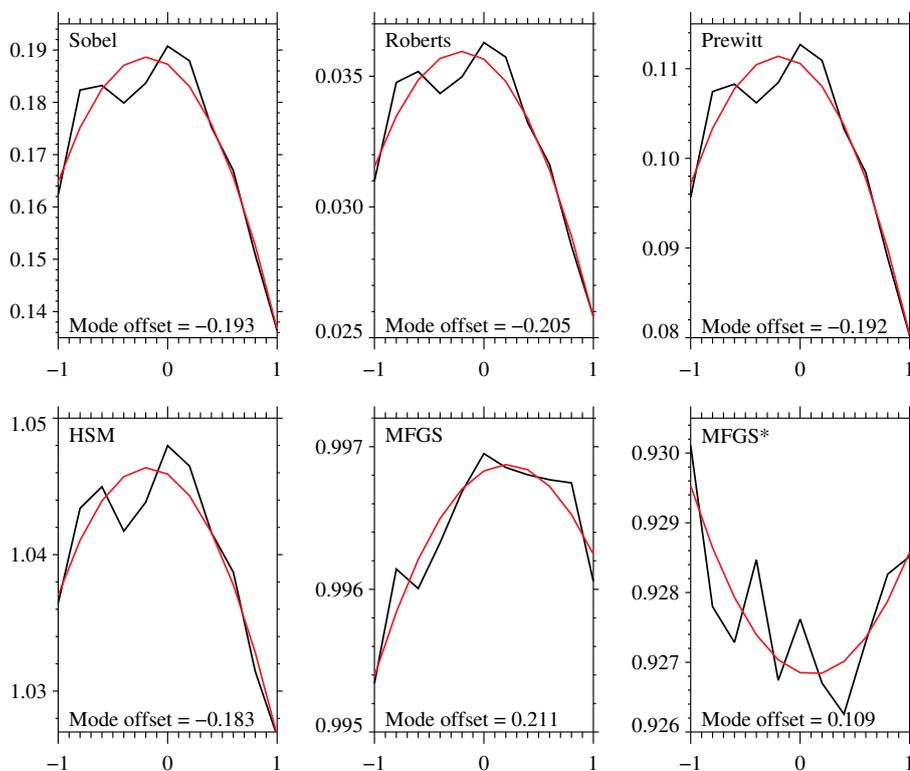


Abbildung 4.3 Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen G-Band-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung für die verschiedenen Metriken dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

hat, dass die resultierenden x -Werte identisch sind und die damit verbundenen Offsets sehr nah beieinander liegen.

Abweichungen dazu entstehen unter Nutzung der MFGS, die basierend auf zwei unterschiedlichen statistischen Ansätzen angewendet wurde. Zur Auswertung räumlich hoch aufgelöster Bilder wurde die MFGS als neue Möglichkeit durch [Deng et al. \(2015\)](#) in die Sonnenphysik eingeführt. In einem ersten Schritt wird bei Anwendung des MFGS ein 2D Median Filter, mit einer Größe von 3×3 Pixeln auf ein Rohbild A angewendet. Dadurch wird ein Bild $B = F(A)$ erzeugt, in dem das Rauschen reduziert ist. In einem zweiten Schritt werden die Gradienten $G_A = G(A)$ und $G_B = G(B)$ sowohl für das Rohbild, als auch das gefilterte Bild berechnet. Die originale Implementierung nutzt lediglich den Gradienten in x -Richtung $G = G_x$. Dadurch wird der Prozess beschleunigt. Unter Nutzung der Scharr Operatoren (siehe Tabelle 4.1) ist es möglich, den Gradienten passender als Faltung der Bilder A und B zu implementieren. Die Scharr Operatoren enthalten vorteilhaftere Glättungseigenschaften und entfernen die Bevorzugung einer Richtung, wie es bei Nutzung der einfachen Ableitung der Fall wäre. Der Scharr Gradientenoperator ähnelt den Sobel- oder Prewitt-Operatoren, enthält aber andere Matrixelemente. Die Normierungsfaktoren für G_x und G_y können weggelassen werden, da sie sich bei der Berechnung des MFGS aufheben ([Denker et al. 2018b](#)). Nach [Deng et al. \(2015\)](#) wird der MFGS global wie folgt berechnet

$$m, m' = \frac{2 (\sum G_A) (\sum G_B)}{(\sum G_A)^2 + (\sum G_B)^2} \quad (4.1)$$

Studien durch [Denker et al. \(2018b\)](#) erweitern die ursprüngliche Implementierung der MFGS durch eine signifikante Steigerung der Statistik, durch eine Erweiterung der Methoden auf AO-korrigierte Bilder, dem zum Verfügung stehen streng synchroner Aufnahmen im blauen Kontinuum und im Fraunhoferschen G-Band, der Erhöhung der Bildaufnahme um einen Faktor 10 und lokalen Implementierung der MFGS-Bildqualitätsmetrik. Dadurch ergibt sich eine leicht abgewandelte Form des MFGS-Algorithmus, bei dem eine lokale Bestimmung der MFGS für jedes einzelne Pixel vor der Summenbildung stattfindet. Auch hier wird der Gradienten basierend auf dem Scharr-Operator ermittelt ([Denker et al. 2018b](#))

$$m^* = \sum \left(\frac{2G_A G_B}{G_A^2 + G_B^2} \right) \quad (4.2)$$

Dabei verweist der Bruch in der Klammer auf die 2D-MFGS-Karte. Der Wert m^* ist nicht definiert für eine begrenzte Anzahl von Pixeln, wenn alle Werte innerhalb des 3×3 Pixel-Bereichs identisch sind. Diese Pixel müssen in der 2D-Karte entsprechend vor der Mittelung ersetzt werden ([Denker et al. 2018b](#)). Diese erweiterte Version wird im Folgenden als MFGS* gekennzeichnet. m, m', m^* liegen im Intervall $\in (0,1]$, wobei $m = 1$ nur bei $G_A = G_B$ möglich ist. Die Umsetzung der MFGS-Methoden beeinflusst die statistischen Eigenschaften ([Denker et al. 2018b](#)).

Die Ergebnisse beider MFGS-Methoden weichen stark von den Plots der anderen Metriken ab und weisen auch keine Gemeinsamkeiten zueinander auf. Zudem sind die Positionen auf denen die Maxima der Parabelfits zu finden sind, zu den vorherigen Plots und zueinander stark verschieden und, daraus resultierend, der Offset in einer anderen Größenordnung. Bei Nutzung des MFGS* scheint eine fehlerhafte Interpretation der Daten stattzufinden, was dazu führt, dass die am schlechtesten fokussierten Bilder die größte Auslenkung auf der y -Achse erfahren. Minima wurden bei $x = -0.2$ für Kamera 1 und $x = 0.2$ für Kamera 2 berechnet. Aufgrund der fehlerhaften Interpretation der Daten wurde die MFGS* in den folgenden Berechnungen nicht mit berücksichtigt und ist in Tabelle 4.2 und Tabelle 4.4 nicht mit aufgeführt. Zudem wurde die globale MFGS infolge der großen Abweichungen zu den übrigen Werten bei den Durchschnittsbildung nicht einbezogen. HSM weicht gerade bei den Aberrationen höherer Ordnung von den Werten, die durch die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren errechnet wurden, ab und wurde deshalb bei den folgenden Durchschnittsbildungen nicht mit einbezogen. Die in Tabelle 4.2 und 4.4 errechneten Durchschnitte ergeben sich ausschließlich aus den Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren. Der Parameter Δ zeigt die Differenz der Offsets des ersten und des zweiten Detektors zueinander an. Die resultierenden Abweichungen entsprechen den Aberrationsunterschieden in beiden Strahlengängen.

Die x -Koordinaten, bei denen die Parabelmaxima des G-Band-Detektors liegen, sind überwiegend identisch zu denen des Ca II H-Detektors. Einige der Parabelmaxima des G-band-Detektors sind um die Größe eines Scanschrittes dichter an der Null gelegen, wodurch sich der Offset der Null annähert.

Tabelle 4.2 Datenreihe aufgenommen am 28. März 2017: Offsets und RMS der einzelnen Filter für den Fokus. Der Parameter Δ bezeichnet die Differenz zwischen den beiden Offsets. Der Durchschnitt wurde für die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren berechnet.

Aberration		Filter					Durchschnitt
		Sobel	Roberts	Prewitt	HSM	MFGS	
Ca II H	Offset	-0.331	-0.344	-0.329	-0.313	0.080	-0.329
	RMS [%]	2.71	2.72	2.70	0.20	0.02	2.71
Fokus	G-Band	-0.193	-0.205	-0.192	-0.183	0.211	-0.193
	RMS [%]	2.32	2.30	2.31	0.19	0.02	2.31
Δ		0.138	0.139	0.137	0.130	0.131	0.136

Tabelle 4.3 Die Berechnungszeiten für die HiFi-Daten vom 28. März 2017 und der Durchschnittswert.

Lauf	Filter				
	Sobel	Roberts	Prewitt	HSM	MFGS
1	0.133	0.092	0.095	0.397	2.401
2	0.128	0.092	0.095	0.385	2.415
3	0.128	0.094	0.095	0.372	2.395
4	0.127	0.093	0.095	0.372	2.374
5	0.127	0.093	0.095	0.374	2.371
6	0.128	0.093	0.095	0.387	2.378
ϕ	0.128	0.093	0.095	0.381	2.389

Beim Vergleich der beiden Kameras weisen die Sobel, Roberts, Prewitt Operatoren und auch der HSM vergleichbare Kurven auf (siehe Abb. 4.2 und 4.3). Doch während die Metriken für eine Kamera auch hier wieder die selben x -Positionen berechnen und die Offsets zueinander nur leicht variieren, verschiebt sich, beim Vergleich der Kameras miteinander, die x -Position, an der das gefittete Parabelmaximum zu finden ist, um die Größe eines Scanschrittes. Die Offsets, die so für die Kamera 2 ermittelt werden, sind näher an der Null, als die der ersten Kamera. Die Güte des Fits (χ^2 -Statistik) wird wie folgt berechnet:

$$\chi^2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{Mess}_i} - y_{\text{Fit}_i})^2} \quad (4.3)$$

Dabei steht y_{Mess} für das auf der y -Achse aufgetragene Signal an der jeweiligen x -Position auf der die Aufnahme entstanden ist. y_{Fit} bezeichnet den dazugehörigen y -Wert des Parabelfits und n ist durch die Anzahl der Scans gegeben, in diesem Fall $n = 11$. Um die Auswertung unabhängig von den jeweiligen Signalen der Metriken und somit vergleichbar zu machen, wurde der χ^2 -Wert nach der folgenden Formel in das quadratische Mittel (RMS, engl. root mean square) angegeben in Prozent, umgewandelt. Dabei wird die vorher errechnete χ^2 -Statistik durch die Anzahl der Aufnahmen n geteilt, aus dem Ergebnis die Wurzel gezogen und durch den Mittelwert aller Signalwerte (y -Achse) geteilt und mal Hundert multipliziert.

$$\text{RMS} = 100 \sqrt{\frac{\chi^2}{n} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{Mess}_i}} \quad (4.4)$$

Die Auswertung der RMS-Werte (siehe Tabelle 4.2) zeigt, dass der Parabelfit bei Auswertung mit dem Prewitt Operator die geringsten Abweichungen zu den Daten aufweist. Die Werte aller angewandeter Metriken liegen sehr nah beieinander, wobei der Prewitt Operator geringfügig bessere Ergebnisse erzielt als die übrigen Metriken. Die Auswertung der benötigten Rechenzeiten, in Tabelle 4.3 aufgeführt, unterstützt die Wahl des Prewitt Operators zur Auswertung des Fokus mittels eines automatisierten Prozesses.

Die vom Prewitt Operator benötigte Zeit ist unwesentlich länger als die, bei Auswertung mithilfe des Roberts Operators, der die geringste Rechenzeit aufweist, aber schlechtere RMS-Werte ergibt und auch die Differenz der beiden Offsets ist leicht erhöht im Gegensatz zum Prewitt Operator. Die durch den Sobel Operator errechneten Werte gleichen annähernd denen des Prewitt Operators, aber die Rechenzeit ist um etwa ein Drittel länger als bei den Prewitt und Roberts Operatoren. Die Rechenzeiten, die in Tabelle 4.3 aufgeführt sind, entstanden durch 100 Anwendungen der jeweiligen Metrik auf die Aufnahme des Auflösungstarget. Der Durchschnitt wurde aus sechs Durchläufen mit je 100 Anwendungen gebildet.

Die Datenauswertung des Fokus hat gezeigt, dass die Offsets für die beiden Kameras in Folge der manuellen Fokussierung variieren. Zudem hat die Datenanalyse gezeigt, dass alle Filter annähernd identische Offsets ergeben, davon ausgenommen sind die beiden MFGS Metriken, bei denen teilweise große systematische Abweichungen zu den sonstigen Werten auftreten. Bei Verwendung des Prewitt-Operators ergeben sich die geringsten prozentualen Abweichungen zwischen den Daten und dem Parabelfit. Die Abweichung der Offsets zwischen den beiden Kameras resultiert aus der manuellen Einstellung des Fokus. Mithilfe eines automatisierten Prozesses ist es möglich, die Fokussierung zu erleichtern, indem durch die DaVis Software eine Rückmeldung erfolgt, wie dicht man sich am errechneten Parabelmaximum befindet. Ein möglicher Programmablaufplan für solch eine Automatisierung der Fokussierung ist in Abb. 4.4 gezeigt.

Vor der Aufnahme der eigentlichen Kalibrierungsdaten der Aberrationen muss die beste Fokusposition ermittelt werden. Dieses Prozedere wird aktuell von Hand gesteuert und soll durch einen automatisierten Prozess optimiert werden, indem die beste Fokussierung dem Anwender, durch Anwendung der ermittelten Metrik, angezeigt wird und diese dann über ein GUI bestätigt wird. Abb. 4.4 zeigt ein Flussdiagramm, in dem der Ablauf einer solchen Steuerung dargestellt ist. Dabei wird zuerst mithilfe des in LabView geschriebenen Programms Conductor das Teleskop nach der Sonnenmitte ausgerichtet. Anschließend der Spiegel M2 um 1.2 mm defokussiert, sodass keine Strukturen auf der Sonnenoberfläche mehr zu erkennen sind. Das Filtrerrad F3 wird auf Dark Stop gestellt, um die Kalibrierungsdaten für die Dunkelbilder aufzunehmen und es wird eine Schleife gestartet, in der 200 Bilder aufgenommen und in den Zwischenspeicher geschrieben werden. Nach erfolgter Textausgabe mit Bestätigung der Aufnahme der Dunkelbilder wird das Filtrerrad F3 auf Open Field gestellt, um die Aufnahmeserie für die Weißbilder zu starten. Dabei sind für eine gute Mittelung der Daten 1000 Aufnahmen nötig, die ebenfalls in den Zwischenspeicher geschrieben werden und anschließend wird mittels einer Textausgabe die Aufnahme der Weißbilder bestätigt. Das Filtrerrad F3 wird dann erneut gedreht und die AO auf das Auflösungstarget gelockt, um innerhalb einer Schleife eine Aufnahmeserie zu starten, in der der Fokuswert in einem festgelegten Messbereich und in einer definierten Schrittweite verändert wird, bis der Benutzer die aktuellen Einstellungen für eine gute Fokussierung über ein GUI sichert.

4.2 Datenauswertung – Aberrationen höherer Ordnung

Nachdem die Datenauswertung des Fokus die beste Metrik zur Fokussierung der Instrumente geliefert hat, werden in diesem Abschnitt die Metriken auf die Aufnahmen angewendet, die Aberrationen höherer Ordnung enthalten und miteinander verglichen. Abbildung 4.5 zeigt die Aufnahmen, die für den Astigmatismus 1 gemacht wurden. Dabei ging der Messbereich von ± 1 rad und wurde schon wie beim Fokus in 0.2 rad Schritten verstellt. Auch bei den Aberrationen höherer Ordnung sind die Detektionsunterschiede festzustellen, die schon bei der Auswertung des Fokus aufgetreten sind. Dabei ist die Mehrheit der x -Werte, bei denen das Parabelmaximum zu finden ist, identisch für beide Kameras. Lediglich einige Werte der G-Band-Kamera sind um 0.2 rad dichter an der Null zu finden, wie in Abb. 4.6 und 4.7 ersichtlich ist. Die Anwendung der MFGS führt auch bei den Aberrationen höherer Ordnung zu großen Abweichungen zu den anderen Filtern und zueinander. Die Auswertung der Aberrationen höherer Ordnung zeigt, in Abb. 4.6 und 4.7 am Beispiel des Astigmatismus 1 verdeutlicht, dass bei Anwendung der MFGS* eine Diagonale anstelle einer Parabel entsteht, weshalb die MFGS* bei den folgenden Auswertungen nicht mit berücksichtigt wurde. Wie schon bei der Auswertung des Fokus weisen die Sobel, Roberts, Prewitt Operatoren und HSM große Gemeinsamkeiten beim Kurvenverlauf auf. Damit verbunden ist, dass die Offsets der Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren sehr nah beieinander liegen. Bei dem HSM ist eine

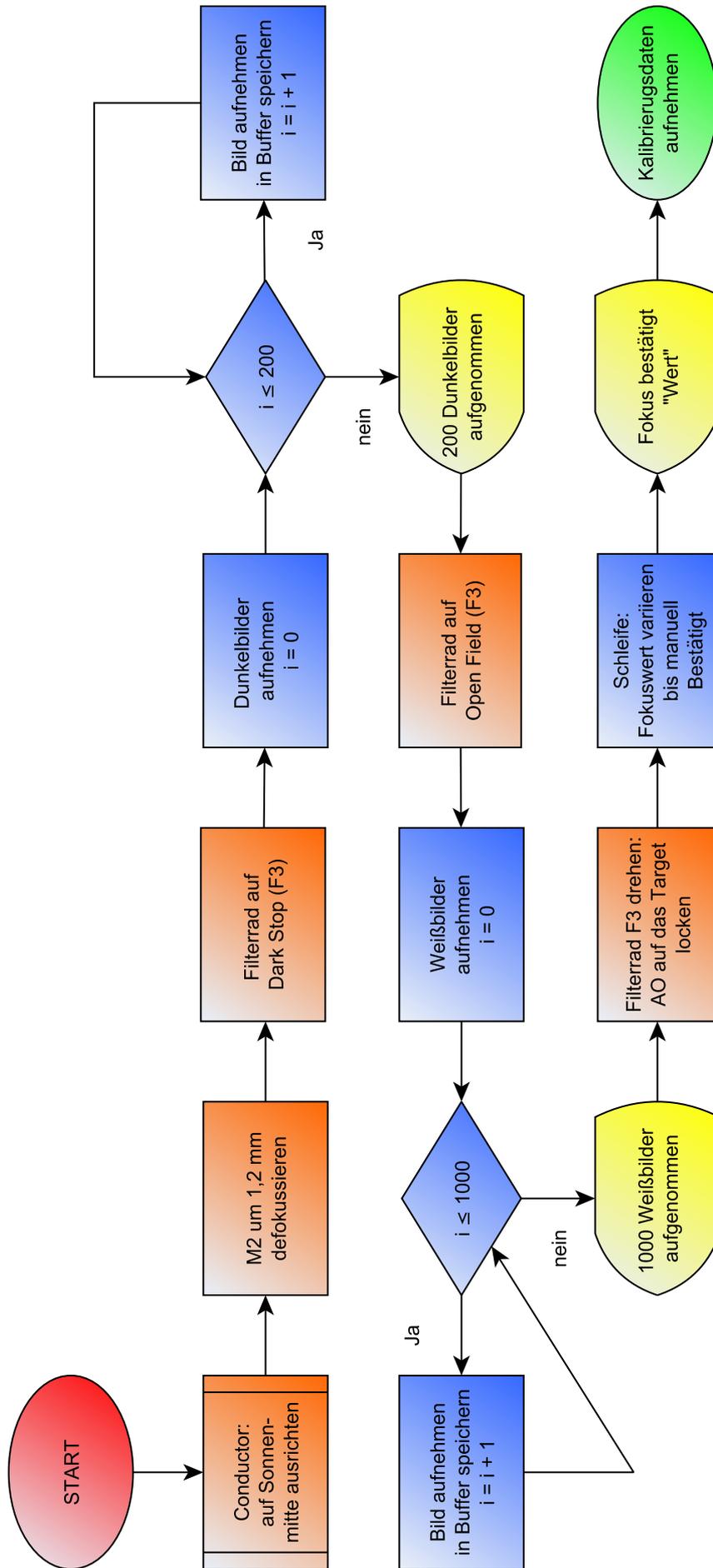


Abbildung 4.4 Programmablaufplan für automatisierte Einstellung der Fokussierung des GREGOR Sonnenteleskops. Grafik mit yed erstellt

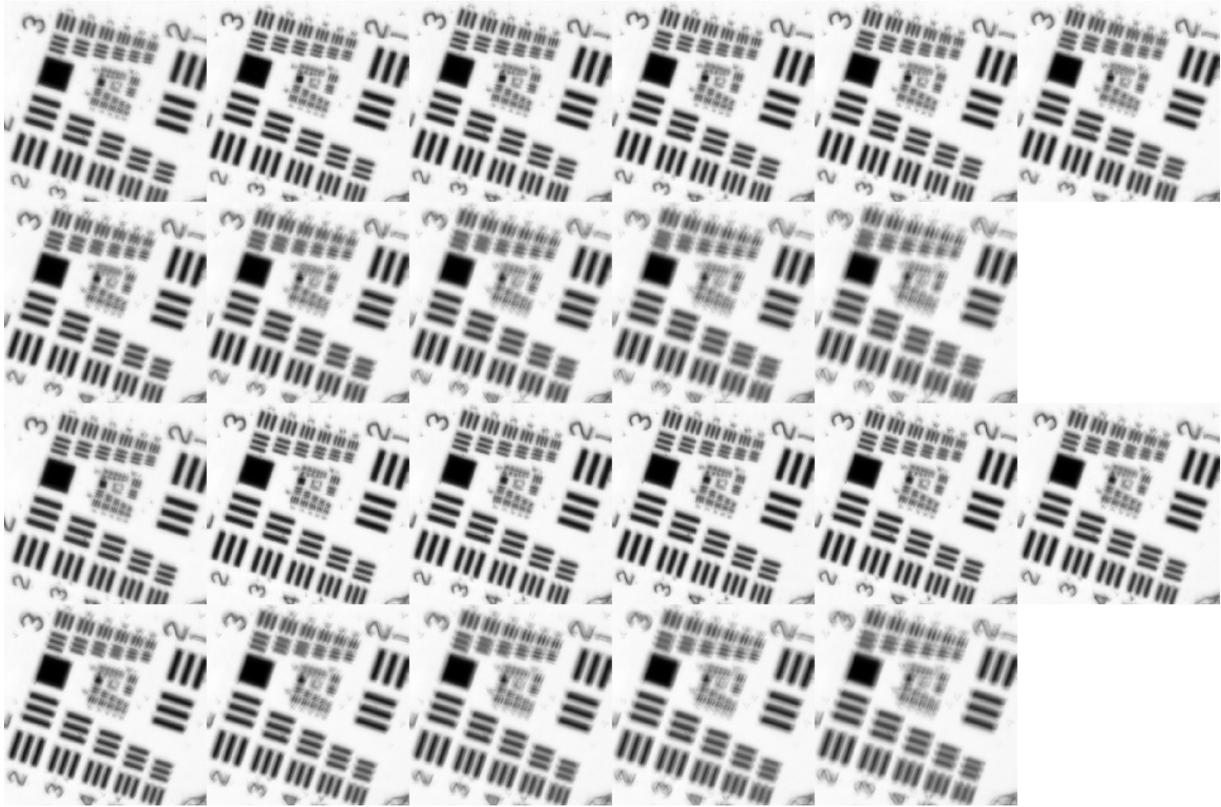


Abbildung 4.5 Aufnahmeserie des Auflösungsziels für Untersuchung des Astigmatismus 1. Die oberen elf Aufnahmen wurden mit Kamera 1 (Ca II H) gemacht, die unteren 11 mit Kamera 2 (G-Band). Die Fokussierung sind von links nach rechts in einem Bereich von ± 1 rad in 0.2 rad Schritten verstellt worden. Die beste Fokusposition ist für Kamera 1 $x_1 = -0.4$, Kamera 2 $x_2 = -0.4$ (Daten aus der Auswertung mit Prewitt).

größere Differenz zu den übrigen drei Metriken festzustellen. Infolge dieser Abweichungen wurden in die Durchschnittsbildung in Tabelle 4.4 nur die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren einbezogen. Die Auswertung des RMS begünstigt die Datenauswertung der Aberrationen höherer Ordnung mithilfe des Roberts-Filters. Er liefert die besten RMS-Werte und empfiehlt sich somit zur Auswertung innerhalb eines automatisierten Prozesses zur Aufnahme der Kalibrierungsdaten des GREGOR Teleskops. Dies wird durch die in Tabelle 4.3 aufgeführten Rechenzeiten bestätigt, wobei der Roberts-Filter die schnellste Auswertung ermöglicht. Alternativ könnte auch bei den Aberrationen höherer Ordnung der Prewitt-Filter angewendet werden, dessen Auswertung nur geringfügig schlechtere RMS-Ergebnisse und Rechenzeiten liefert, jedoch etwas bessere Ergebnisse bei den Differenzen für die Offsets der beiden Detektoren erzielt (siehe Tabelle 4.4).

Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen die Auswertung des Fokus sowie aller anderer ausgewerteter Aberrationen höherer Ordnung mittels des Prewitt-Filters. Die Datenanalyse hat gezeigt, dass alle Filter annähernd identische Offsets ergeben, davon ausgenommen sind die beiden MFGS Methoden, bei denen teilweise große Abweichungen zu den sonstigen Werten auftreten. Die prozentualen Abweichungen zwischen den Daten und dem Parabelfit sind bei Verwendung des Prewitt-Filters zu vernachlässigend größer als bei Anwendung des Roberts-Filters, genau wie die resultierenden Rechenzeiten. Zudem weist der Prewitt-Filter die geringsten Differenzen zwischen den Offsets auf, was aus dem Vergleich von Abb. 4.8 und 4.9 ersichtlich wird. Die Aberrationen können so durch eine Mittlung der beiden Offsets gut beseitigt werden.

Tabelle 4.4 Datenreihe aufgenommen am 28. März 2017: Offsets und RMS der einzelnen Filter für die Aberrationen höherer Ordnung. Der Parameter Δ bezeichnet die Differenz zwischen den beiden Offsets. Der Durchschnitt wurde für die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren berechnet.

Aberration			Filter					Durchschnitt
			Sobel	Roberts	Prewitt	HSM	MFGS	
Astigmatismus 1	Ca II H	Offset	-0.463	-0.504	-0.472	-0.645	-0.283	-0.480
		RMS [%]	2.92	3.03	3.00	0.27	0.02	2.98
	G-Band	Offset	-0.445	-0.483	-0.455	-0.617	-0.316	-0.461
		RMS [%]	2.82	2.96	2.90	0.28	0.01	2.89
Δ			0.018	0.021	0.017	0.028	0.033	0.019
Astigmatismus 2	Ca II H	Offset	0.880	0.934	0.896	3.225	-0.300	0.903
		RMS [%]	2.52	2.57	2.47	0.29	0.01	2.52
	G-Band	Offset	0.806	0.836	0.813	1.850	-0.128	0.819
		RMS [%]	2.62	2.70	2.56	0.32	0.01	2.63
Δ			0.074	0.097	0.083	1.374	0.172	0.085
Koma 1	Ca II H	Offset	0.037	0.043	0.039	0.050	0.136	0.040
		RMS [%]	2.76	2.61	2.77	0.24	0.03	2.71
	G-Band	Offset	0.029	0.034	0.031	0.034	0.102	0.031
		RMS [%]	3.25	3.15	3.25	0.29	0.01	3.22
Δ			0.008	0.009	0.008	0.016	0.034	0.008
Koma 2	Ca II H	Offset	-0.322	-0.320	-0.320	-0.306	-0.293	-0.321
		RMS [%]	8.10	7.87	8.16	0.84	0.03	8.04
	G-Band	Offset	-0.310	-0.308	-0.309	-0.289	-0.322	-0.309
		RMS [%]	8.09	7.90	8.16	0.92	0.03	8.05
Δ			0.011	0.012	0.011	0.017	0.029	0.011
Trefoil 1	Ca II H	Offset	-0.103	-0.103	-0.105	-0.179	-0.413	-0.104
		RMS [%]	3.76	3.66	3.76	0.24	0.03	3.73
	G-Band	Offset	-0.085	-0.089	-0.089	-0.145	-0.365	-0.087
		RMS [%]	3.85	3.77	3.84	0.27	0.03	3.82
Δ			0.018	0.014	0.017	0.034	0.048	0.017
Trefoil 2	Ca II H	Offset	-0.183	-0.187	-0.185	-0.019	-0.411	-0.185
		RMS [%]	1.99	2.01	2.03	0.18	0.04	2.01
	G-Band	Offset	-0.192	-0.200	-0.196	-0.022	-0.331	-0.196
		RMS [%]	1.96	1.97	2.00	0.16	0.04	1.98
Δ			0.009	0.013	0.011	0.003	0.080	0.011
sphärische Aberration	Ca II H	Offset	0.221	0.225	0.221	0.166	0.224	0.222
		RMS [%]	7.21	6.88	7.14	0.37	0.07	7.08
	G-Band	Offset	0.211	0.212	0.211	0.153	0.232	0.211
		RMS [%]	7.27	6.83	7.20	0.39	0.07	7.10
Δ			0.010	0.014	0.010	0.013	0.008	0.011
Durchschnitt	Ca II H	RMS $_{\phi}$	4.18	4.09	4.19	0.35	0.03	4.15
	G-Band	RMS $_{\phi}$	4.26	4.18	4.27	0.38	0.03	4.24

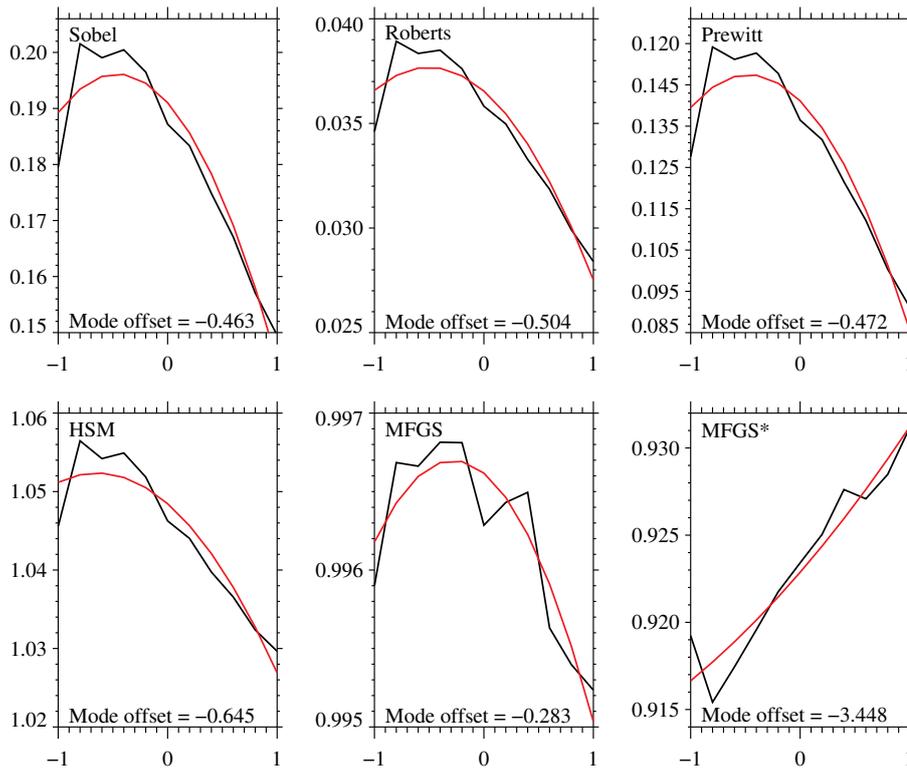


Abbildung 4.6 Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Ca II H-Daten für den Astigmatismus 1. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung für die verschiedenen Metriken dar. Auf der x-Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y-Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

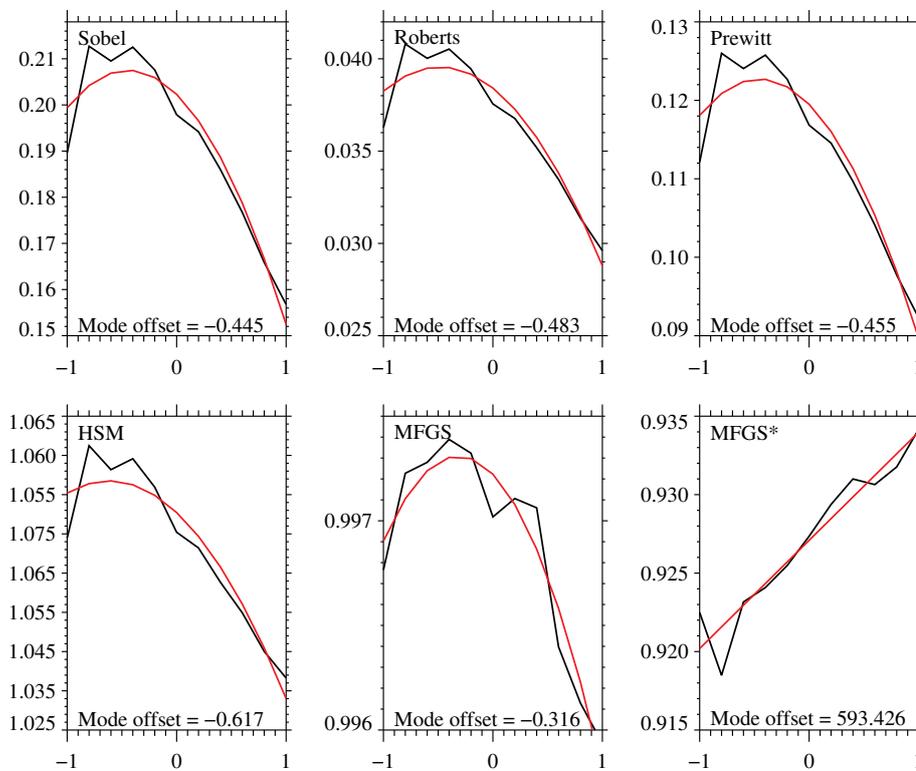


Abbildung 4.7 Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen G-Band-Daten für den Astigmatismus 1. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung für die verschiedenen Metriken dar. Auf der x-Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y-Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

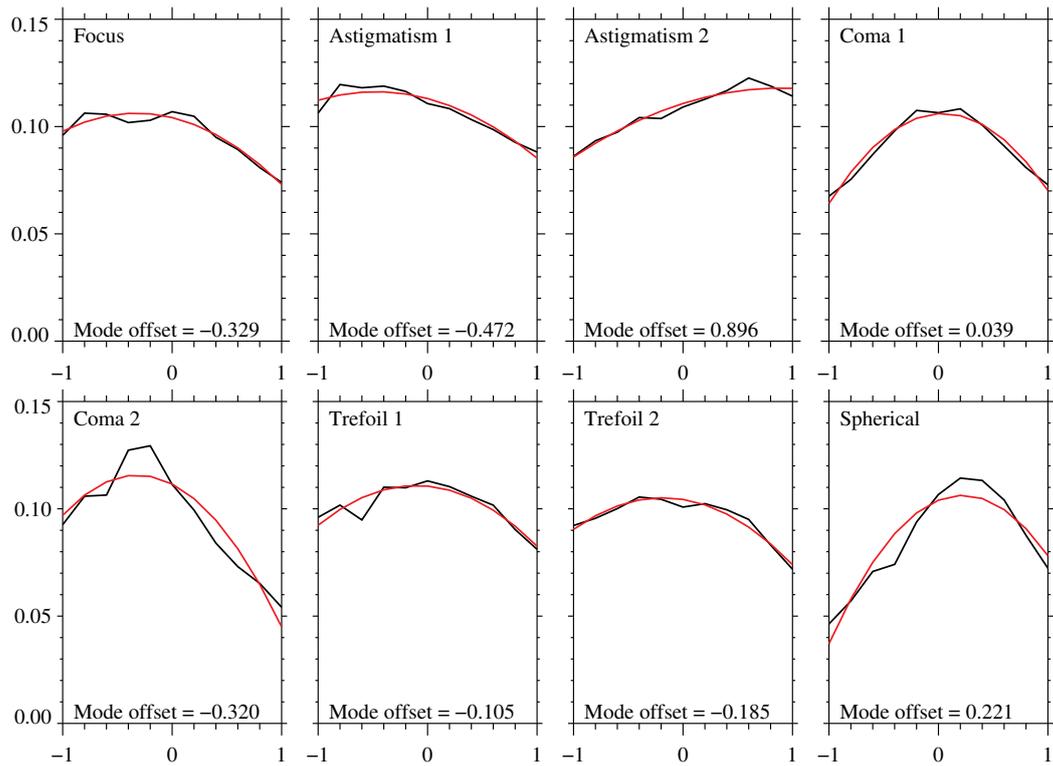


Abbildung 4.8 Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Prewitt-Filters für die Ca II H-Daten vom 28. März 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Ca II H-Daten für die verschiedenen Aberrationen. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung der Metrik dar. Auf der x-Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y-Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

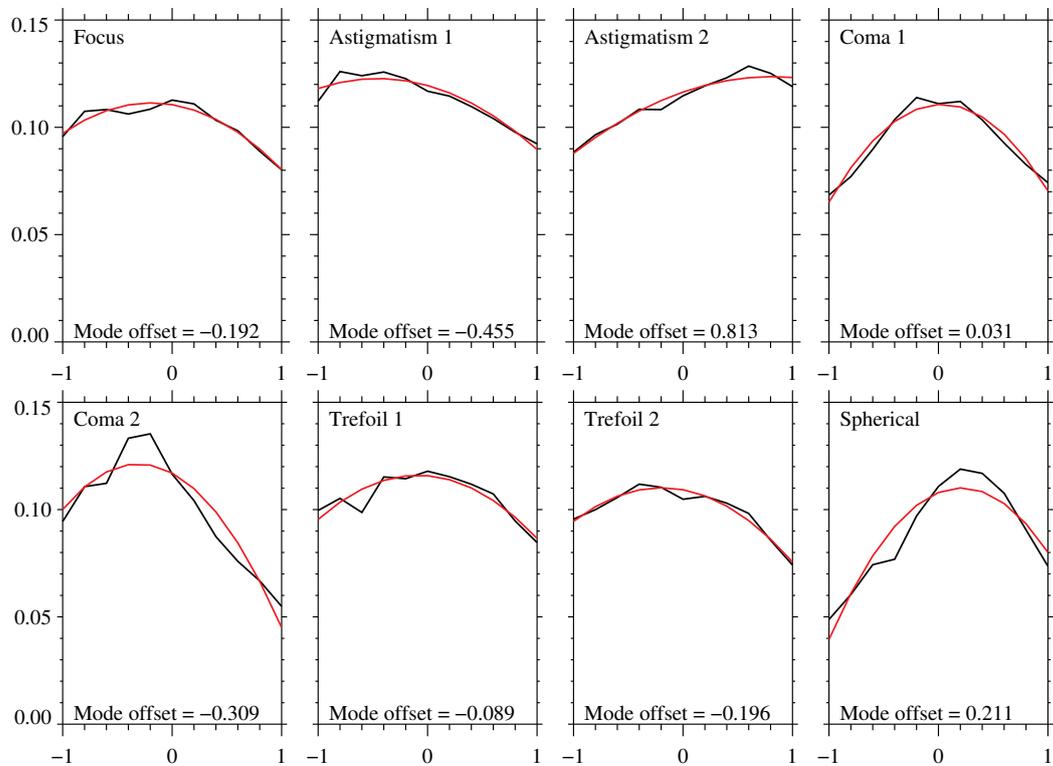


Abbildung 4.9 Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Prewitt-Filters für die G-Band-Daten vom 28. März 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen G-Band-Daten für die verschiedenen Aberrationen. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung der Metrik dar. Auf der x-Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y-Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

4.3 Datenauswertung – Vergleich GFPI und HiFi

In diesem Abschnitt wird eine neue Datenreihe vom 28. September 2017 ausgewertet. Es wurden Daten für GFPI und HiFi aufgenommen, die jeweils mit zwei Kameras ausgestattet sind. Dafür wurden die Instrumente defokussiert und in 0.3 rad-Schritten in einem Bereich von ± 2.4 rad abgetastet. Auf die Daten wurden die zuvor verwendeten Metriken angewendet und die Auswertung mittels des Sobel-Filters ist grafisch in Abb. 4.10, 4.11, 4.12 und 4.13 dargestellt. Dabei entspricht die schwarze Kurve den Daten und die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung für die verschiedenen Metriken dar.

Wie schon bei Auswertung der Datenreihe vom 28. März 2017 liegen die resultierenden Werte der Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren sehr nah beieinander, wobei die besten RMS-Werte für das HiFi-System durch den Sobel-Filter erzielt werden und auch die Differenzen zwischen den Offsets der Detektoren bei Anwendung dieser Metriken die geringsten Werte ergeben (siehe Tabelle 4.5). Lediglich die verkürzte Rechenzeit des Prewitt-Filters spricht auch hier für seine Anwendung. Aufgrund der Abweichungen der beiden MFGS Methoden und des HSM wurden zur Durchschnittsbildung in Tabelle 4.5 und 4.6 nur die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren einbezogen. Auch bei Anwendung der MFGS zur Auswertung der Daten des GFPI kommt es zu großen Abweichungen zueinander und zu den übrigen Werten. Die lokale MFGS* ergibt den besten χ^2 -Wert, führte bei Anwendung aber wieder zur Parabelverläufen mit Minima oder diagonal verlaufenden Linien. Bei Auswertung der GFPI-Daten hat sich bei Anwendung des Roberts-Filters der geringste RMS-Wert ergeben und auch die resultierenden Differenzen der Offsets begünstigen bei einigen Aberrationen die Wahl des Roberts-Filters. Die Offsets für das HiFi-System und den Detektor im Breitband-Kanal des GFPI stimmen in etwa überein, ausgenommen der Wert des Astigmatismus 2, der auf dem Breitband-Kanal um einen Faktor 2 in Minus-Richtung verschoben ist. Die Offsets des Detektors im Schmalband-Kanal des GFPI sind konstant etwa 0.1 rad kleiner als die übrigen Offsets. Auch hier ist die Verschiebung des Offsets für den Astigmatismus 2 zu beobachten. Bei Anwendung der Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren liegen die resultierenden Offsets in vergleichbaren Größenordnungen, weshalb durch eine entsprechende Ansteuerung des DMs die Aberrationen auf allen vier Detektoren kompensiert werden können.

Die Verwendung eines schmalbandigen Filters (zwei Fabry-Pérot Etalons) führt zu einem geringeren Signal, als auf dem Breitband-Kanal. Insgesamt sind für beide Kanäle annähernd identische Offsets ermittelt worden, was die Annahme bestätigt, dass die Aberrationen sich aus gleichen Teilen zusammensetzen, d.h. die Aberrationen entstehen im gemeinsamen Lichtweg, also hauptsächlich vor dem Fokus F4.

Die Datenauswertung hat Metriken geliefert, die sich zur Kalibrierung des GREGOR Teleskops mithilfe eines automatisierten Prozesses eignen. Die Metriken zur Auswertung des Fokus und zur Auswertung der Aberrationen höherer Ordnung unterscheiden sich. Auch bei den Aberrationen höherer Ordnung haben unterschiedliche Metriken wie die Prewitt, Sobel und Roberts Operatoren gezeigt, dass sie sehr gute Ergebnisse liefern. Für die verschiedenen Aberrationen des GFPI und HiFi ergeben sich vergleichbare Offsets. Davon ausgenommen ist der Astigmatismus 2, wo das detektierte Maximum des GFPI nah an der Grenze des Messbereichs zu finden ist und sich die Offsets des GFPI und HiFi um etwa einen Faktor 2 unterscheiden.

Im Rahmen einer Automatisierung der Kalibrierung des GREGOR Teleskops ist nach der Einstellung des Fokus die Aufnahme der übrigen Kalibrierungsdaten möglich. Abbildung 4.14 zeigt den Programmablaufplan für die automatisierte Aufnahme der Kalibrierungsdaten, dabei ist der Programmstart bis zur Ausführung des ersten Scans identisch zu dem Programmablauf der Fokuseinstellung. Das Programm wird mittels des in LabView geschriebenen Programms Conductor ausgerichtet. Dieses wird typischer Weise dazu benutzt, das Teleskop präzise auf die Sonne auszurichten. Anschließend werden die Dunkel und Weißbilder aufgenommen. Nach dem Verstellen des Filterrads F3 auf das Auflösungstargets können die acht behandelten Aberrationen, innerhalb einer Schleife angefahren werden. Die Scans überdecken einen Bereich von ± 2.4 rad mit einer Schrittweite von 0.3 rad. Auf die so aufgenommenen Messdaten wird der jeweilige Filter angewendet und somit die x -Koordinate gespeichert, bei der die am besten fokussierte Aufnahme entstanden ist. Der Anwender wird darauf hingewiesen, dass der erste Durchlauf vollzogen wurde und das Programm startet innerhalb einer weiteren Schleife einen Durchlauf zur Optimierung der Daten. Dafür wird die Schrittweite des Scans auf 0.1 rad reduziert und ein erneuter Scan in einem Bereich von ± 0.5 rad um die gefundene x -Koordinate des ersten Durchlaufs wird durchgeführt. Das Programm speichert die daraus resultierenden Koordinaten der neuen Offsets und gibt im Anschluss die jeweilige

Aberration mit dem dazugehörigen Offset aus. Das Teleskop wird dann für Beobachtungen freigegeben und der Anwender darüber mittels einer Textausgabe informiert.

Tabelle 4.5 Datenreihe vom 28. September 2017: Offsets und RMS der einzelnen Filter für die Aberrationen höherer Ordnung für das HiFi-System. Der Parameter Δ bezeichnet die Differenz zwischen den beiden Offsets. Der Durchschnitt wurde für die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren berechnet.

Aberration			Filter					Durchschnitt
			Sobel	Roberts	Prewitt	HSM	MFGS	
Fokus	Ca II H	Offset	0.090	0.087	0.090	0.068	0.309	0.089
		RMS [%]	11.22	11.51	11.23	1.62	0.05	11.32
	G-Band	Offset	0.126	0.124	0.126	0.099	0.285	0.126
RMS [%]		10.51	10.73	10.51	1.54	0.05	10.59	
		Δ	0.036	0.037	0.037	0.031	0.024	0.037
Astigmatismus 1	Ca II H	Offset	0.442	0.456	0.446	0.444	-0.628	0.448
		RMS [%]	8.74	9.12	8.79	1.42	0.03	8.88
	G-Band	Offset	0.418	0.429	0.421	0.411	-0.740	0.423
RMS [%]		8.05	8.36	8.10	1.32	0.02	8.17	
		Δ	0.025	0.028	0.025	0.033	0.112	0.026
Astigmatismus 2	Ca II H	Offset	-0.779	-0.786	-0.771	-0.787	0.038	-0.778
		RMS [%]	7.71	7.85	7.70	1.30	0.02	7.75
	G-Band	Offset	-0.691	-0.695	-0.684	-0.689	0.044	-0.690
RMS [%]		7.25	7.38	7.23	1.23	0.02	7.29	
		Δ	0.087	0.091	0.086	0.098	0.006	0.088
Koma 1	Ca II H	Offset	0.069	0.071	0.069	0.057	0.087	0.069
		RMS [%]	12.86	12.84	12.96	1.84	0.12	12.89
	G-Band	Offset	0.068	0.070	0.068	0.053	0.109	0.069
RMS [%]		12.31	12.28	12.39	1.84	0.11	12.33	
		Δ	0.000	0.001	0.001	0.004	0.023	0.001
Koma 2	Ca II H	Offset	0.217	0.219	0.216	0.154	0.205	0.217
		RMS [%]	13.00	12.96	13.08	1.44	0.07	13.01
	G-Band	Offset	0.213	0.214	0.212	0.146	0.191	0.213
RMS [%]		12.47	12.39	12.52	1.45	0.07	12.46	
		Δ	0.004	0.005	0.004	0.008	0.014	0.004
Trefoil 1	Ca II H	Offset	0.040	0.039	0.037	0.079	0.324	0.039
		RMS [%]	4.26	4.22	4.27	0.68	0.10	4.25
	G-Band	Offset	0.041	0.041	0.039	0.075	0.264	0.040
RMS [%]		4.81	4.76	4.81	0.69	0.08	4.80	
		Δ	0.002	0.002	0.001	0.004	0.059	0.002
Trefoil 2	Ca II H	Offset	0.033	0.041	0.035	0.073	0.194	0.037
		RMS [%]	4.42	4.40	4.44	0.77	0.10	4.42
	G-Band	Offset	0.029	0.035	0.030	0.055	0.182	0.031
RMS [%]		5.01	4.99	5.04	0.76	0.08	5.02	
		Δ	0.005	0.007	0.005	0.018	0.012	0.005
sphärische Aberration	Ca II H	Offset	-0.132	-0.132	-0.132	-0.079	-0.295	-0.132
		RMS [%]	8.88	8.79	8.89	1.67	0.35	8.85
	G-Band	Offset	-0.125	-0.124	-0.125	-0.079	-0.305	-0.124
RMS [%]		10.19	10.08	10.21	1.67	0.28	10.16	
		Δ	0.007	0.008	0.007	0.000	0.009	0.008
Mittelwert	Ca II H	RMS $_{\phi}$	8.55	8.60	8.59	1.30	0.11	8.58
	G-Band	RMS $_{\phi}$	8.59	8.61	8.61	1.28	0.09	8.60

Tabelle 4.6 Datenreihe vom 28. September 2017: Offsets und RMS der einzelnen Filter für die Aberrationen höherer Ordnung für das GFPI. Der Parameter Δ bezeichnet die Differenz zwischen den beiden Offsets. Der Durchschnitt wurde für die Sobel, Roberts und Prewitt Operatoren berechnet.

Aberration			Filter					Durchschnitt
			Sobel	Roberts	Prewitt	HSM	MFGS	
Fokus	Schmalband	Offset	0.372	0.403	0.384	0.458	0.382	0.386
		RMS [%]	6.05	5.74	6.13	0.35	0.25	5.97
	Breitband	Offset	0.479	0.478	0.480	0.477	0.571	0.479
		RMS [%]	11.06	10.84	11.06	1.93	0.24	10.99
		Δ	0.107	0.075	0.096	0.019	0.188	0.093
Astigmatismus 1	Schmalband	Offset	0.308	0.307	0.307	0.394	0.026	0.307
		RMS [%]	3.30	3.02	3.30	0.17	0.10	3.20
	Breitband	Offset	0.406	0.454	0.425	0.529	-0.093	0.428
		RMS [%]	4.59	4.65	4.70	0.88	0.10	4.65
		Δ	0.098	0.147	0.119	0.134	0.119	0.121
Astigmatismus 2	Schmalband	Offset	-1.533	-1.715	-1.599	-1.831	-1.009	-1.616
		RMS [%]	3.61	3.34	3.65	0.20	0.20	3.53
	Breitband	Offset	-1.132	-1.183	-1.138	-1.349	-0.693	-1.151
		RMS [%]	5.74	5.47	5.66	0.99	0.15	5.62
		Δ	0.401	0.531	0.460	0.482	0.316	0.464
Koma 1	Schmalband	Offset	0.157	0.159	0.159	0.159	0.169	0.159
		RMS [%]	7.32	6.59	7.36	0.38	0.60	7.09
	Breitband	Offset	-0.106	-0.112	-0.106	-0.068	-0.128	-0.108
		RMS [%]	7.71	7.27	7.77	1.13	0.45	7.58
		Δ	0.263	0.271	0.265	0.227	0.297	0.266
Koma 2	Schmalband	Offset	0.268	0.280	0.274	0.289	0.390	0.274
		RMS [%]	6.99	6.35	7.05	0.35	0.46	6.80
	Breitband	Offset	0.359	0.357	0.357	0.305	0.382	0.358
		RMS [%]	9.58	9.12	9.64	1.12	0.38	9.45
		Δ	0.091	0.077	0.083	0.016	0.008	0.084
Trefoil 1	Schmalband	Offset	0.073	0.071	0.073	0.117	0.423	0.072
		RMS [%]	3.27	2.95	3.29	0.20	0.38	3.17
	Breitband	Offset	0.005	0.006	0.003	0.021	0.149	0.005
		RMS [%]	3.93	3.74	3.94	0.49	0.23	3.87
		Δ	0.067	0.066	0.070	0.096	0.274	0.068
Trefoil 2	Schmalband	Offset	0.217	0.224	0.228	0.268	0.385	0.223
		RMS [%]	3.84	3.55	3.91	0.25	0.46	3.77
	Breitband	Offset	-0.142	-0.167	-0.147	-0.115	0.305	-0.152
		RMS [%]	4.41	4.36	4.47	0.55	0.29	4.41
		Δ	0.359	0.391	0.376	0.383	0.079	0.375
sphärische Aberration	Schmalband	Offset	0.232	0.225	0.233	0.226	0.322	0.230
		RMS [%]	6.74	5.98	6.76	0.41	1.01	6.49
	Breitband	Offset	-0.063	-0.066	-0.063	-0.044	-0.152	-0.064
		RMS [%]	8.06	7.59	8.10	1.19	0.76	7.92
		Δ	0.296	0.291	0.296	0.270	0.474	0.294
Mittelwert	Schmalband	RMS_{ϕ}	5.01	4.54	5.05	0.28	0.46	4.86
	Breitband	RMS_{ϕ}	6.29	6.03	6.33	0.91	0.34	6.21

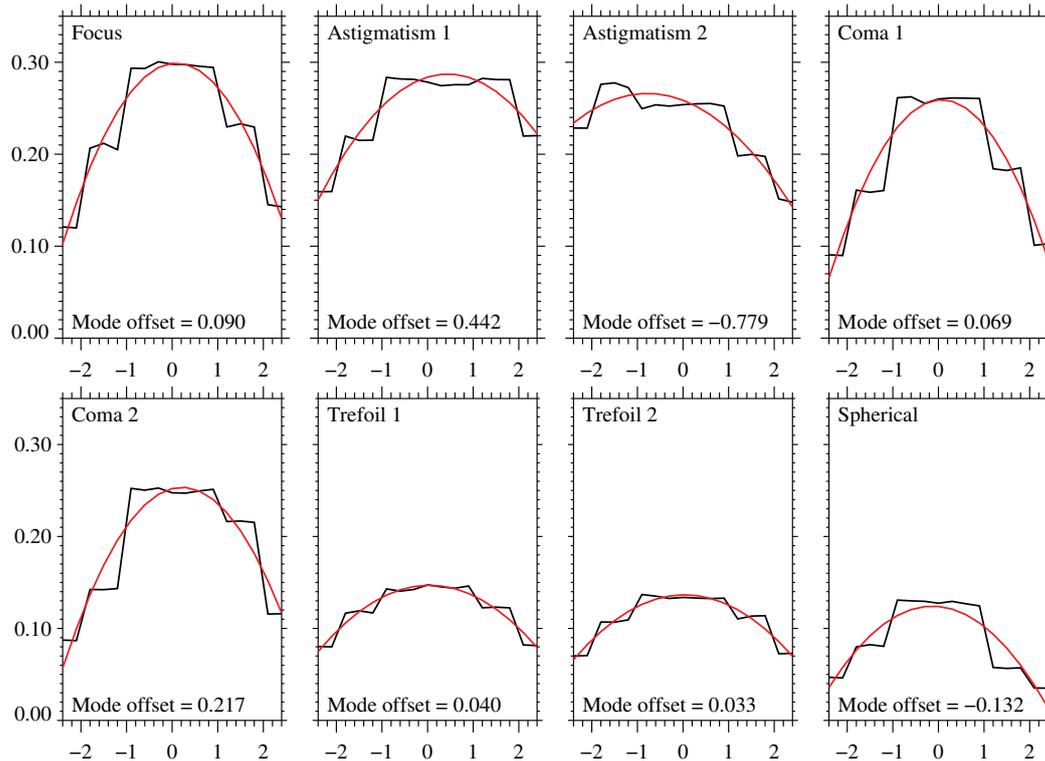


Abbildung 4.10 HiFI: Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Sobel-Filters für die Ca II H-Daten vom 28. September 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Ca II H-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

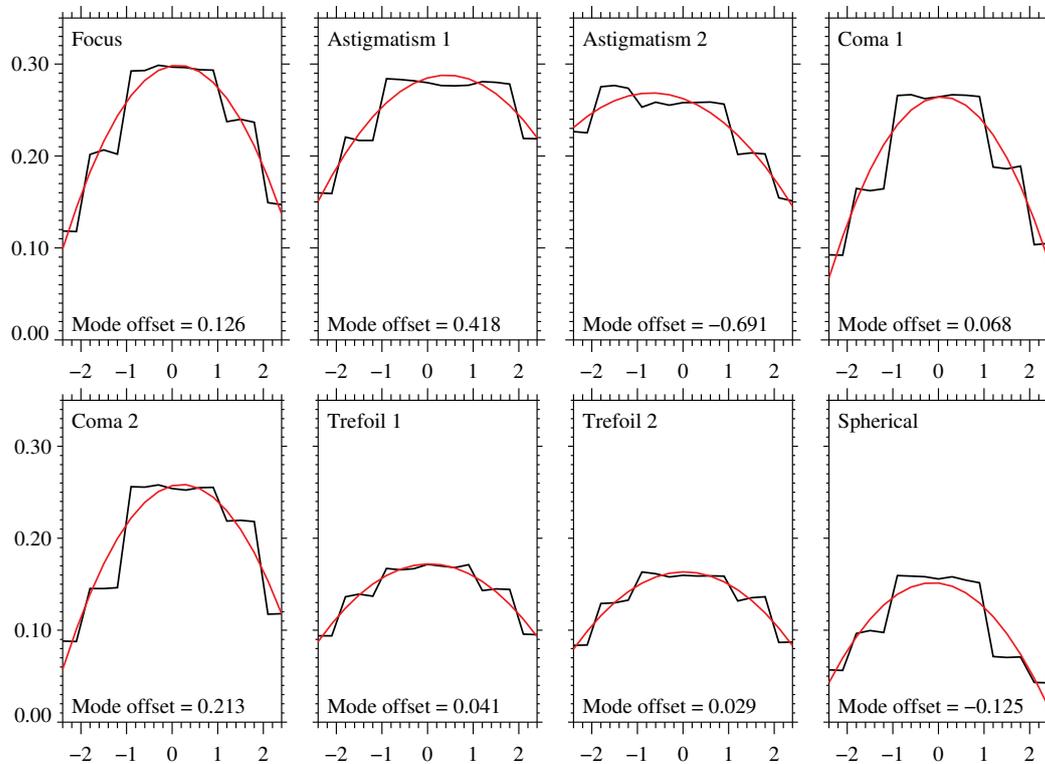


Abbildung 4.11 HiFI: Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Sobel-Filters für die G-Band-Daten vom 28. September 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen G-Band-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

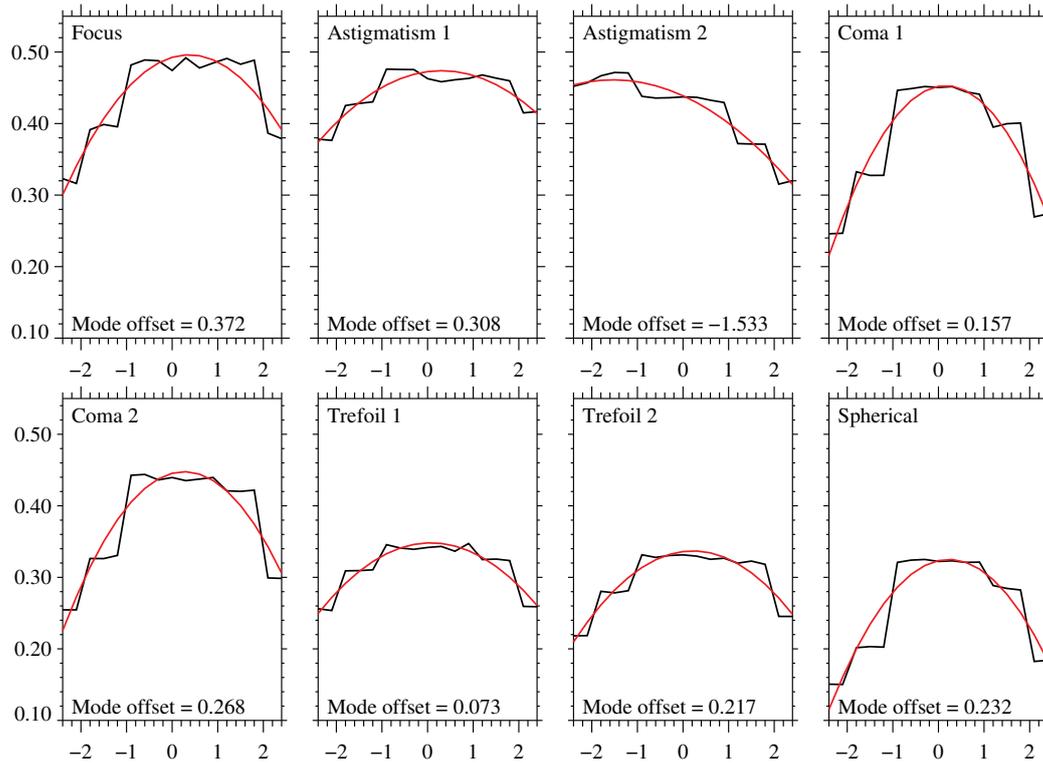


Abbildung 4.12 GFPI: Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Sobel-Filters für die Schmalband-Daten vom 28. September 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Schmalband-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

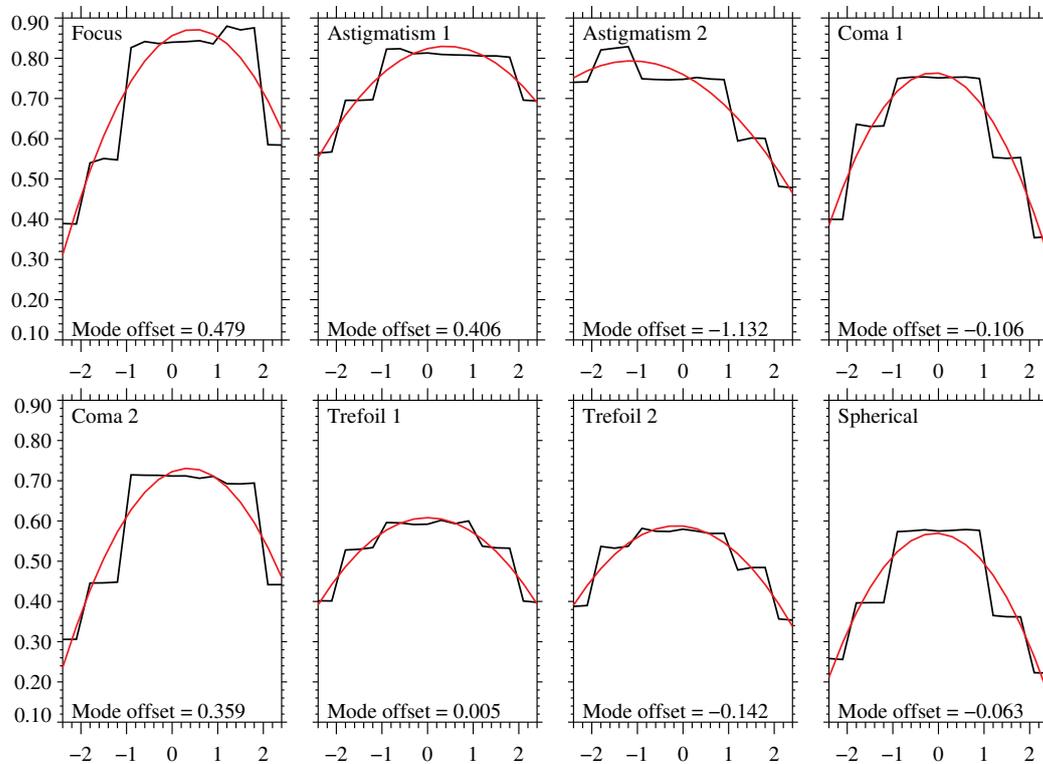


Abbildung 4.13 GFPI: Ausgabe der Datenanalyse nach Anwendung des Sobel-Filters für die Breitband-Daten vom 28. September 2017. Die schwarze Kurve entspricht den aufgenommenen Breitband-Daten für den Fokus. Die rote Kurve stellt den Parabelfit 2. Ordnung dar. Auf der x -Achse ist der Messbereich von ± 1 rad aufgetragen, auf der y -Achse die Werte von den verschiedenen Filtern.

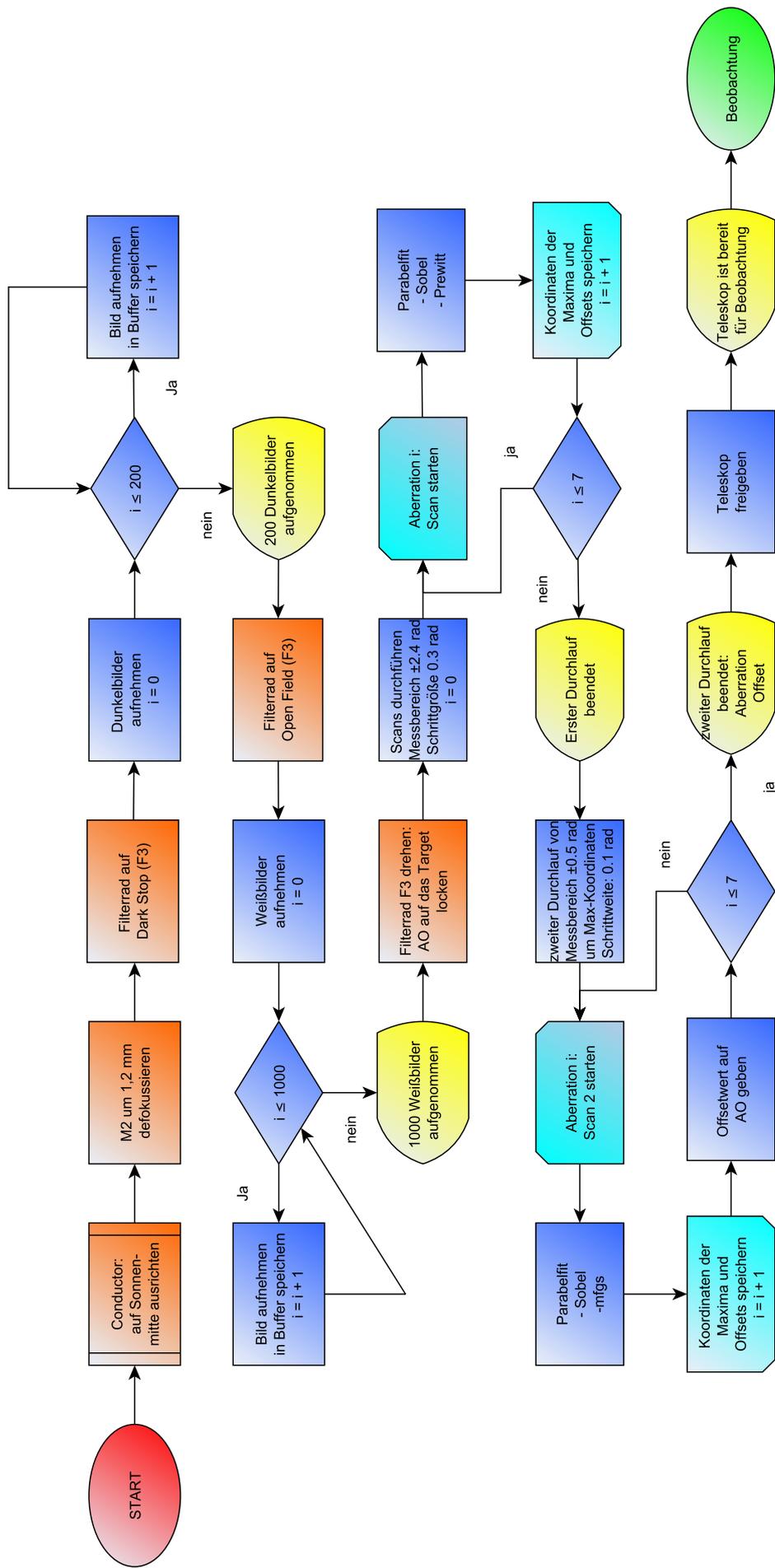


Abbildung 4.14 Programmablaufplan für automatisierte Aufnahme der Kalibrierungsdaten des GREGOR Sonnenteleskops. Grafik mit yed erstellt

Kapitel 5

Ausblick

Es ist möglich, mithilfe angewandter Methoden der digitalen Datenverarbeitung, die Beobachtungsbedingungen am GREGOR Sonnenteleskop zu optimieren. Die besten Ergebnisse wurde im Rahmen der Auswertung der Daten vom 28. März 2017 und 28. September 2017 durch die Sobel, Prewitt und Roberts Operatoren erreicht, die sehr eng beieinander liegende Moden-Offsets berechnen und nur geringfügige Abweichungen zueinander aufweisen. Die Anwendung des HSM und die beiden angewendeten MFGS Methoden scheinen an diesem Punkt ungeeignet, den Anforderungen, einer automatisierten Aufnahme der Kalibrierungsdaten zu genügen. Die Anwendung der MFGS* resultiert in einer fehlerhaften Interpretation der Daten, weshalb fälschlicherweise Parabelverläufe mit einem Minimum zu beobachten sind.

Die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass die momentan eingestellten Offsets nicht mehr aktuell sind und zum Teil große Abweichungen zu den ermittelten Werten aufweisen, was eine Verschlechterung der Bildqualität bei Beobachtungen verursacht. In Tabelle 5.1 sind die aktuell verwendeten Offsets aufgetragen, sowie die Offsets aus der Datenauswertung, die durch den Sobel und den Prewitt Operator errechnet wurden, dabei wird der angegebene Wert aus den beiden Offsets des jeweiligen Instruments gebildet. Die Abweichung zwischen den verwendeten Offsets und den ermittelten Werten zeigt, dass ein regelmäßiges Überprüfen der Daten, durch einen zeitsparenden automatisierten Prozesses sinnvoll ist um die Fokussierung vorzunehmen, sowie zur Aufnahme der Kalibrierungsdaten zur Kompensation der Aberrationen höherer Ordnung.

Zur Realisierung einer besseren Fokussierung innerhalb eines automatisierten Prozesses hat sich der Prewitt Operator als gute Wahl erwiesen, um eine schnelle und genaue Justierung der Fokuseinstellung vorzunehmen und so eine optimale Fokussierung zu gewährleisten. Für die Aberrationen höherer der

Tabelle 5.1 Die aktuell verwendeten Offsets der AO und die Offsets im Durchschnitt von beiden Kameras des jeweiligen Instrumenten

Aberration	Moden-Offset				
	Aktuell	HiFI		GFPI	
		Sobel	Prewitt	Sobel	Prewitt
Fokus	0	0.108	0.108	0.425	0.432
Astigmatismus 1	-0.25	0.430	0.434	0.357	0.366
Astigmatismus 2	0.5	-0.735	-0.728	-1.332	-1.369
Koma 1	0.1	0.068	0.069	0.026	0.027
Koma 2	-0.25	0.215	0.214	0.313	0.316
Trefoil 1	-0.2	0.041	0.038	0.039	0.038
Trefoil 2	0	0.031	0.033	0.038	0.040
sphärische Aberration	0	-0.128	-0.128	0.085	0.085

Fokusterordnung hat sich der Sobel-Filter bewährt. Die Ergebnisse, die bei der Auswertung der HiFI und GFPI Daten erzielt wurden, legen die Verwendung dieser Metrik nahe, um eine automatisierte Kalibrierung mit Hilfe des Wellenfrontsensors und des verformbaren Spiegels umzusetzen, durch die die fixen Aberrationen minimiert werden können, die innerhalb der Transferoptiken vom Fokus F3 zu den wissenschaftlichen Foki verursacht werden.

Die Unterschiede, die dabei zwischen den verschiedenen Detektoren der beiden Instrumente entstehen, sind vernachlässigbar und die Aberrationen des Systems können gut kompensiert werden, indem statische Aberrationen auf den DM eingestellt werden. Eine Ausnahme dazu bildet der Astigmatismus 2, dessen ermittelter Moden-Offset für die beiden Kanäle des GFPI, um etwa einen Faktor 2 größer ist als die ermittelten Werte des HiFI. Die wahrscheinlichste Ursache dafür ist entweder die Transferlinse 1 oder der dichroitische Strahlteiler, durch den das einfallende Lichtbündel in Richtung HiFI und GFPI aufgeteilt wird. Zudem ist es möglich, dass die Auswertung dadurch negativ beeinflusst wird, dass das Parabelmaximum sehr nah am Rand des Messbereichs zu finden ist. Für eine zweifelsfreie Bestimmung des Offsets ist es anzuraten, den Messbereich zur Auswertung des Astigmatismus 2 auf -2.7 oder -3 rad erweitern.

Die Differenz von 0.1 rad, die zwischen dem Schmalband- und dem Breitband-Detektor des GFPI detektiert wurde, ist vermutlich auf die Planparallele Oberfläche des 90/10-Strahlteilers der beiden Kanäle zurückzuführen.

Die im Rahmen dieses Projekts erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist durch eine automatische Fokussierung, unter Nutzung des Prewitt-Filters, und automatische Kalibrierung, unter Nutzung des Sobel-Filters, die Beobachtungsbedingungen am GREGOR Teleskop zu verbessern. Die durch Bildfehler verursachte Verschlechterung der Abbildung lässt sich minimieren und die letztlich erreichte Auflösung kann gesteigert werden. Die Implementierung eines solchen Verfahrens mithilfe der DaVis Software befreit die Fokussierung vom subjektiven Eindruck des Anwenders und gewährleistet eine Zeitersparnis des Prozesses. Um die Aufnahme der Kalibrierungsdaten zu starten, sollte in die Bedienfläche des Teleskops eine Schaltfläche implementiert werden, durch deren Aktivierung die in Abb. 4.4 und 4.14 gezeigten Programme ausgeführt werden. Der Anwender kann die Prozesse durch Anklicken dieser Schaltfläche starten und bestätigt im Anschluss nur noch die beste Fokusposition, während alle anderen Abläufe automatisch starten und die Ergebnisse dem Anwender präsentiert werden.

Eine solche Optimierung der Aufnahme der Kalibrierungsdaten ist nicht an das GREGOR Teleskop gebunden und kann nach erfolgreicher Implementierung auch für andere Teleskope sehr nützlich sein, um beispielsweise die Kalibrierung der adaptiven Optik des VTT zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- Berkefeld, T., Schmidt, D., Soltau, D., von der Lühe, O., Heidecke, F.: 2012, The GREGOR adaptive optics system. *Astron. Nachr.* **333**, 863.
- Collados, M., López, R., Páez, E., Hernández, E., Reyes, M., Calcines, A., Ballesteros, E., Díaz, J.J., Denker, C., Lagg, A., Schlichenmaier, R., Schmidt, W., Solanki, S.K., Strassmeier, K.G., von der Lühe, O., Volkmer, R.: 2012, GRIS: The GREGOR Infrared Spectrograph. *Astron. Nachr.* **333**, 872.
- Deng, H., Zhang, D., Wang, T., Ji, K., Wang, F., Liu, Z., Xiang, Y., Jin, Z., Cao, W.: 2015, Objective Image-Quality Assessment for High-Resolution Photospheric Images by Median Filter-Gradient Similarity. *Sol. Phys.* **290**, 1479–1489.
- Denker, C., Kuckein, C., Verma, M., Balthasar, H., Diercke, A., Dineva, E., González Manrique, S., Louis, R., Seelemann, T., Hoch, S.: 2018a, High-Resolution Fast Imager (HiFI) for Image Restoration. *Astron. Nachr.* in preparation.
- Denker, C., Kuckein, C., Verma, M., González Manrique, S., Diercke, A., Enke, H., Klar, J., Balthasar, H., Louis, R., Dineva, E.: 2018b, Image Restoration and Imaging Spectroscopy at the GREGOR Solar Telescope. *Astrophys. J., Suppl. Ser.* submitted.
- Granzer, T., Halbgewachs, C., Volkmer, R., Soltau, D.: 2012, Preparing the GREGOR solar telescope for night-time use: Deriving a pointing model. *Astron. Nachr.* **333**, 823.
- Halbgewachs, C., Caligari, P., Glogowski, K., Heidecke, F., Knobloch, M., Mustedanagic, M., Volkmer, R., Waldmann, T.A.: 2012, The GREGOR telescope control system. *Astron. Nachr.* **333**, 840.
- Hammerschlag, R.H., Kommers, J.N., Visser, S., Bettonvil, F.C.M., van Schie, A.G.M., van Leverink, S.J., Sliepen, G., Jägers, A.P.L., Schmidt, W., Volkmer, R.: 2012, Open-foldable domes with high-tension textile membranes: The GREGOR dome. *Astron. Nachr.* **333**, 830.
- Hecht, E.: 1994, *Optik*, Deutschland.
- Hofmann, A., Arlt, K., Balthasar, H., Bauer, S.M., Bittner, W., Paschke, J., Popow, E., Rendtel, J., Soltau, D., Waldmann, T.: 2012, The GREGOR polarimetric calibration unit. *Astron. Nachr.* **333**, 854.
- Kuckein, C., Denker, C., Verma, M., Balthasar, H., González Manrique, S.J., Louis, R.E., Diercke, A.: 2017, sTools - a data reduction pipeline for the GREGOR Fabry-Pérot Interferometer and the High-resolution Fast Imager at the GREGOR solar telescope. In: Vargas Domínguez, S., Kosovichev, A.G., Antolin, P., Harra, L. (eds.) *Fine Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere, IAU Symposium 327*, 20–24.
- Noll, R.J.: 1976, Zernike Polynomials and Atmospheric Turbulence. *J. Opt. Soc. Am. A* **66**, 207–211.
- Puschmann, K.G., Denker, C., Kneer, F., Al Erdogan, N., Balthasar, H., Bauer, S.M., Beck, C., Bello González, N., Collados, M., Hahn, T., Hirzberger, J., Hofmann, A., Louis, R.E., Nicklas, H., Okunev, O., Martínez Pillet, V., Popow, E., Seelemann, T., Volkmer, R., Wittmann, A.D., Woche, M.: 2012a, The GREGOR Fabry-Pérot Interferometer. *Astron. Nachr.* **333**, 880.

- Puschmann, K.G., Balthasar, H., Beck, C., Louis, R.E., Popow, E., Seelemann, T., Volkmer, R., Woche, M., Denker, C.: 2012b, The GREGOR Fabry-Perot interferometer: status report and prospects. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, Proceedings of SPIE* **8446**, 844679.
- Schmidt, D., Berkefeld, T., Feger, B., Heidecke, F.: 2010, Latest achievements of the MCAO testbed for the GREGOR Solar Telescope. In: *Adaptive Optics Systems II, Proceedings of SPIE* **7736**, 773607.
- Schmidt, W., von der Lühe, O., Volkmer, R., Denker, C., Solanki, S.K., Balthasar, H., Bello Gonzalez, N., Berkefeld, T., Collados, M., Fischer, A., Halbgewachs, C., Heidecke, F., Hofmann, A., Kneer, F., Lagg, A., Nicklas, H., Popow, E., Puschmann, K.G., Schmidt, D., Sigwarth, M., Sobotka, M., Soltau, D., Staude, J., Strassmeier, K.G., Waldmann, T.A.: 2012, The 1.5 meter solar telescope GREGOR. *Astron. Nachr.* **333**, 796.
- Soltau, D., Volkmer, R., von der Lühe, O., Berkefeld, T.: 2012, Optical design of the new solar telescope GREGOR. *Astron. Nachr.* **333**, 847–853.
- von der Lühe, O., Volkmer, R., Kentischer, T.J., Geißler, R.: 2012, The GREGOR Broad-Band Imager. *Astron. Nachr.* **333**, 894.

Appendix – Liste der Abkürzungen

AIP	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
AO	Adaptive Optik
BB	Breitband (engl. Broad Band)
BBC	Breitbandkanal(engl. broad-band channel)
DM	Verformbarer Spiegel (deformable mirror)
EM	Elektromagnetisch
FOV	Gesichtsfeldwinkel (engl. Field-of-View)
FPI	Fabry-Pérot Interferometer
FWHM	volle Halbwertsbreite (engl. Full-width-at-Half-Minimum)
GAOS	GREGOR Adaptives Optik System
GFPI	GREGOR Fabry-Pérot Interferometer
GPU	GREGOR Polarisierungseinheit
GUI	Grafische-Benutzer-Schnittstelle (engl. Graphical User Interface)
HiFi	High-resolution Fast Imager
HOAO	High-order Adaptive Optic
HV	High-Voltage
HWHM	halbe Halbwertsbreite (engl. Half-width-at-Half-Minimum)
IAG	Institut für Astrophysik Göttingen
IDL	Interactive Data Language
KIS	Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik
KL	Karhunen-Loeve
LSA	sphärische Längsaberration (engl. longitudinal spherical aberration)
MCAO	Multi Konjugierte Adaptive Optik
MPS	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
NBC	Schmalbandkanal(engl. narrow-band channel)
NIR	Nahes Infrarot
OT	Observatorio del Teide
PI	Proportional-Integral (engl. proportional–integral)
PID	Proportional-Integral-Differential (engl. proportional–integral–derivative)

ROI	Region von Interesse (engl. Region-of-Interest)
SA	sphärische Aberration (engl. spherical aberration)
SHWFS	Shack-Hartmann-Wellenfront-Sensor
SNR	Signal zu Rausch-Verhältnis (engl. signal to noise ratio)
TSA	sphärische Queraberration (engl. transverse spherical aberration)
TT	Tip-Tilt-Spiegel
VIS	Sichtbarer Spektralbereich
VTT	Vacuum Tower Telescope
WF	Wellenfront
WFS	Wellenfrontsensor

Danksagung

Ich möchte meinem Betreuer Prof. Dr. Carsten Denker meinen besonderen Dank und meine Anerkennung aussprechen. Ohne dessen Unterstützung, freundliche Kommentare und Verbesserungen die Arbeit nicht in dieser Form vorliegen würde. Dank seiner herausragenden Expertise konnte er mich immer wieder in meiner Recherche und bei meinen Fragen unterstützen. Ich habe in dieser Zeit viel gelernt und es war ein Vergnügen unter seiner Betreuung zu arbeiten. Ich freue mich diese Zusammenarbeit auch in Zukunft fortsetzen zu können. Ich möchte auch meinem Betreuer Prof. Dr. Michael Vollmer für seine Unterstützung beim Schreiben dieser Arbeit und die vielen vorangegangenen lehrreichen und anschaulichen Vorlesungen danken.

Ein speziellen Dank möchte ich an die Mitglieder der optischen Sonnenphysik richten, mit denen zusammen zu arbeiten ein echtes Vergnügen ist. Besonderer Dank gilt dabei Dr. Christoph Kuckein für die Aufnahme der zweiten Datenreihe und seine regelmäßige Unterstützung beim Entwickeln von Gedankengängen, dem Programmieren mit IDL und für die Korrektur der Arbeit. Vielen Dank auch an Andrea Diercke für die Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit und die große Hilfe beim Umgang mit Latex und dem in Form bringen der Arbeit. Zudem möchte ich Ekatarina Dineva und den Doktoren Horst Balthasar und Meetu Verma für die Unterstützung und Ratschläge beim Anfertigen dieser Arbeit danken.

Vielen Dank an Hannah Riesenberg die viel Zeit in die Korrektur gesteckt hat und mit ihren freundlichen Kommentaren immer wieder meinen Ausdruck verbessern konnte.

Nicht zuletzt gebührt mein Dank meiner Familie. Ohne euren Rückhalt und eure Unterstützung wäre ich heute nicht hier. Einen lieben Dank an Julia Mießner, die mich auf dieses Studium aufmerksam machte, durch guten Zuspruch davon überzeugte es anzufangen und im Laufe dessen immer wieder unterstützte.

Zusätzlich möchte ich Prof. Dr. Klaus-Peter Möllmann danken, nicht nur für die hervorragende Lehre, sondern auch für ein Engagement das wiederholt weit über die Lehrveranstaltung hinaus ging.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel und Quellen genutzt habe.

Robert Kamlah

Ort, Datum