

FP36 - Wellenfrontanalyse (Kurze Ausarbeitung)

Felix Kaufmes und Lucas Eekhof

Light emitted by astronomical objects travels a massive distance before arriving at the telescope's optical components. On their way the light waves get distracted and reflected. After entering the Earth's atmosphere, an incoming wavefront passes turbulences caused by temperature differences in the air. As the refractive index of a gas highly depends on the temperature, the regions with different temperatures cause an optical disturbance of a passing wavefront. This effect is called "seeing". These fluctuations in the light intensity complicate the resolution of astronomical signals. Therefore, all modern telescopes contain a system to compensate these effects. This adaptive optics system is built up of a wavefront sensor, a deformable mirror and a beamsplitter. By measuring the signal deformation, the wavefront sensor can regulate the adaptive mirror in real time to correct the aberration.

In this experiment we first analyse the system properties by determining the gain of the used sensor. This is done by measuring the photon transfer curve. As the main part, we build up the Shack-Hartmann wavefront sensor and simulate an incoming, distorted wavefront by using an astigmatic lens. From this, the gradients of the wavefront can be determined to calculate the original wavefront.

1 Einführung

1.1 Shack-Hartmann-Sensor

Für adaptive Optiken ist die Verwendung von Wellenfrontsensoren nötig. Häufig kommt dabei der Shack-Hartmann-Sensor zur Anwendung, der mit einem Array an Microlinsen arbeitet, welches die Wellenfront punktuell auf einen CMOS-Chip fokussiert, siehe 3. ¹

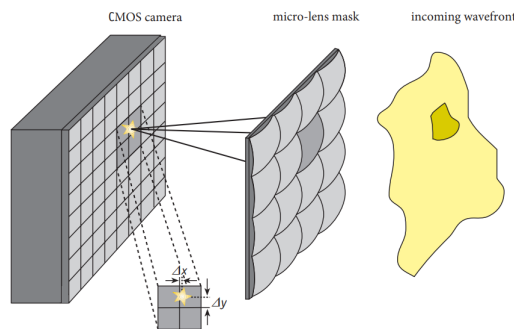


Abbildung 1: Skizze eines Shack-Hartmann-Sensors

Die einzelnen Brennpunkte der Linsen werden durch Verzerrungen der Wellenfront (z. B. durch atmosphärische Störungen) auf dem Detektor verschoben. Diese Verschiebung lässt Rückschlüsse auf die Form der Wellenfront zu. Die Beziehung zwischen der Verschiebung Δx , der Neigung der Wellenfront zur Linsenebene Θ und der Brennweite f lautet:

$$\Delta x = f M \lambda \Theta$$

Mit M als der Vergrößerung zwischen CMOS-Detektor und Linsenarray, und λ als der betreffenden Wellenlänge. So lassen sich Verschiebungen entlang beider Achsen der Sensorebene messen.

¹Hippler, Stefan und Brandner, Wolfgang und Henning, Thomas: F36 experiment update August 2021 - Wavefront Analysis with a Shack-Hartmann Sensor using a modern CMOS imager, 2021.

1.2 CMOS-Kamera

Als Bilddetektor im Shack-Hartmann-Sensor dient eine CMOS-Kamera, prinzipiell ein aktiver Pixeldetektor. CMOS ist die Abkürzung für "Complementary Metal Oxide Semiconductor", nachdem Herstellungsprozess. Alternativ könnte auch ein CCD-Sensor verwendet werden, aber der CMOS-Sensor ist in einigen Aspekten überlegen. Die Quanteneffizienz von bis zu 90% macht den Sensor sehr empfindlich. Außerdem zeigt die Kamera ein lineares Verhalten in der Gainkurve über den gesamten Messbereich. Der Hauptvorteil ist die Verarbeitung der Signale mit einer deutlich höheren Rate, die aus einem effizienteren Ausleseschema resultiert, was sie für adaptive Optiken sehr wertvoll macht.²

1.2.1 Auslesevorgang

Während ein CCD-Sensor jeden Pixel einer Reihe in einzelner Abfolge ausliest, kann der CMOS-Sensor auf einmal ausgelesen werden, wie aus der Funktionsweise in 2 ersichtlich wird:³

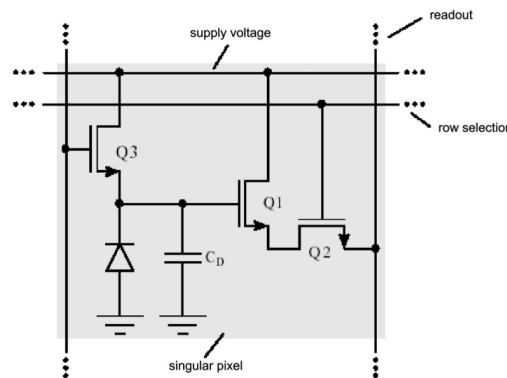


Abbildung 2: Skizze eines CMOS-Pixels

Ein Pixel besteht aus mehreren Transistoren und einer Photodiode. Der Messablauf ist dreiteilig: Zunächst wird der Pixel durch Aktivierung von Q_3 zurückgesetzt und der Kondensator C_D geladen. Nun wird Q_3 deaktiviert. Der Photostrom entlädt über die gesamte Integrationszeit immer weiter C_D . Abschließend wird die Restladung auf C_D mithilfe von Q_1 und Q_2 ausgelesen. Das Binning von Pixeln kann dazu beitragen, das Signal-Rauschverhältnis zu verbessern, aber auf Kosten der Auflösung.

1.2.2 Bestimmung der Gainkurve

Um den CMOS-Sensor zu charakterisieren können verschiedene Eigenschaften herangezogen werden. Sehr wichtig ist der System-Gain, der Umrechnungsfaktor zwischen empfangenen Photoelektronen und Digitalsignal. Diese Kurve erhält man durch Auftragen der Photonen-Transferkurve, der die Abhängigkeit der Varianz des Signals von der gemessenen Intensität zeigt. Der Gain entspricht dann der Steigung dieser Kurve, nach:

$$N_C^2 = \frac{1}{g} S_C + R_C^2 + k^2 S_C^2$$

Mit der Varianz N_C^2 , dem Ausleserauschen R_C , dem Signal S_C und dem Verhältnis von Flatfield-Rauschen zu Signal k . Um den letzten Term zu eliminieren werden bei jeder Messung zwei Bilder gemacht. Bei Annahme eines konstanten Ausleserauschens entspricht die Steigung der Photonen-Transferkurve dem Gainfaktor.⁴

²en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor ; abgerufen am 13.03.2022

³en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor ; abgerufen am 13.03.2022

⁴Hippler, Stefan und Brandner, Wolfgang und Henning, Thomas: F36 experiment update August 2021 - Wavefront Analysis with a Shack-Hartmann Sensor using a modern CMOS imager, 2021.

1.3 Zernike-Polynome

Eine Wellenfront $W_{(x,y)}$ mit beliebiger Verzerrung lässt sich durch die Zernike-Polynome $Z_{(x,y)}$ ausdrücken. Diese Polynome unterschiedlicher Ordnungen entsprechen verschiedenen Arten von optischen Aberrationen. Jede Wellenfront lässt sich als Linearkombination von Zernike-Polynomen beschreiben, die Funktionen bilden dabei ein Orthogonalsystem.⁵

$Z_j(x,y)$	n, m	$Z_n^m(x,y)$	Name
$Z_0(x,y)$	0, 0	1	piston
$Z_1(x,y)$	1, -1	y	tilt
$Z_2(x,y)$	1, 1	x	tip
$Z_3(x,y)$	2, -2	2xy	astigmatism

Abbildung 3: Die ersten sieben Zernike-Polynome mit ihren korrespondierenden Arten von optischen Aberrationen

Durch Aufnahme der Punkte im Shack-Hartmann-Sensor nach Aberration, und durch Vergleich mit einem Referenzbild, kann aus dem Gradienten auf die relevanten Zernike-Polynome, und die Art der Aberration zurückgeschlossen werden.

2 Durchführung

2.1 1. Aufgabe

Zunächst wird der System-Gain des Detektors durch Aufnahme einer Photon-Transferkurve bestimmt. Der Aufbau für diesen Teil besteht aus einem CMOS-Sensor und einer Flatfield-Lampe, die direkt vor den Detektor in einem lichtdichten Behälter positionieren. Als Lichtquelle der Flatfieldlampe dient eine rote LED. In der Software wird der Gainparameter auf 120 belassen, und das Pixelbinning auf 4 eingestellt. Die Integrationszeit wird auf 60 ms eingestellt, sodass die Kurve nicht im saturierenden Bereich liegt. Nun werden jeweils zehn Bilder bei verschiedenen Diodenströmen aufgenommen, in einem Bereich von 0 mA bis 25 mA. Die Messung bei 0 mA dient dabei zur Bias-Korrektur.

2.2 2. Aufgabe

Nun werden die Shack-Hartmann-Punkte auf dem Sensor im aberrierten und im unverzerrten Fall miteinander verglichen, der sich so ergebende Gradient wird untersucht.

Der Aufbau, zu sehen in 4, beinhaltet in folgender Reihenfolge als Lichtquelle einen monochromatischen Laser mit $\lambda = 637,5$ nm, eine Sammellinse als Kollimator, eine astigmatische Linse und einen Shack-Hartmann-Sensor mit CMOS-Kamera. In letzterem wird ein "Keystone-Lenslet-Array" mit 28 konzentrisch angeordneten Mikrolinsen verwendet. Die Geräte werden auf der optischen Bank in Entfernungen gemäß ihrer Brennweiten aufgestellt:⁶

⁵Hippler, Stefan und Brandner, Wolfgang und Henning, Thomas: F36 experiment update August 2021 - Wavefront Analysis with a Shack-Hartmann Sensor using a modern CMOS imager, 2021.

⁶Hippler, Stefan und Brandner, Wolfgang und Henning, Thomas: F36 experiment update August 2021 - Wavefront Analysis with a Shack-Hartmann Sensor using a modern CMOS imager, 2021.

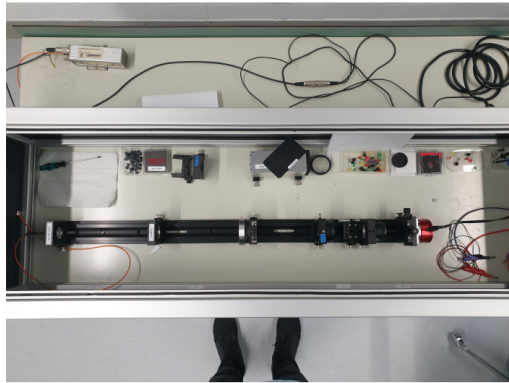


Abbildung 4: Der Aufbau auf der optischen Bank

3 Auswertung

3.1 1. Aufgabe

Im ersten Schritt verwenden wir unsere Dunkelmessung, um die Daten unserer Messreihe zu korrigieren. Da wir in jedem Intensitätsschritt zehn Bilder aufgenommen haben, bilden zunächst den Mittelwert aller bei ausgeschalteter LED aufgenommenen Bilder. Dieses Masterdark wird von allen im Folgenden verarbeiteten Bildern zunächst abgezogen. Danach lässt sich aus den inneren Bildbereichen eines Paares von Flats mit gleichen Parametern jeweils ein mittleres Signal errechnen, mit deren Verhältnis lässt sich das zweite Bild normalisieren. Wird dieses normalisierte Bild vom ersten abgezogen, lässt sich dadurch der Flatfield-Effekt herausrechnen. Aus dieser Differenz ist die Varianz errechenbar. Um nun die Photonentransferkurve zu erstellen wird die Varianz gegen das mittlere Signal aufgetragen, jeweils für jeden der aufgenommenen Intensitätsschritte. Wird nun eine lineare Funktion gefittet, kann der System-Gain als die Steigung dieser Funktion ausgelesen werden. Man erhält so bei den in der Durchführung geschilderten Parametern den Gainwert $0,939 \pm 0,007 \frac{e^-}{ADU}$, aus dem folgenden Graphen:

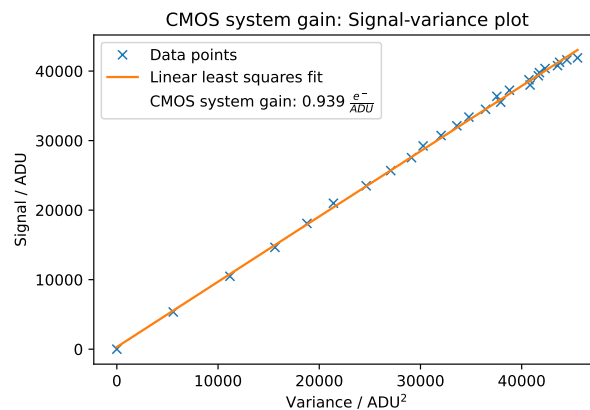


Abbildung 5: Gefittete System-Gain-Kurve

3.2 2. Aufgabe

Zur Auswertung der Shack-Hartmann-Bilder verwenden wir ein Python-Skript, welches den Ort und die Intensität der durch das Linsenarray verursachten Shack-Hartmann-Punkte plottet. Es erkennt die 28 Punkte, zeichnet um sie herum einen Kreis und gibt ihre Koordinaten aus, die im Weiteren verwendet werden können. Um die Verschiebung der Punkte zu bestimmen, werden die x- und die y-Koordinaten von denen des Referenzbildes abgezogen. Die charakteristische Werte der Verschiebung, Δx und Δy ,

werden nun verwendet, um die Verzerrung der Wellenfront zu analysieren. Da die Wellenfront aufgrund von Unenauigkeiten im Versuchsaufbau nicht notwendigerweise parallel zum Linsenarray steht, enthalten die Koordinatenverschiebungen einen konstanten Term. Dieser kann aus den Daten eliminiert werden, indem man den Mittelwert aller Δy - und Δx -Werte berechnet und von den ursprünglichen Verschiebungen abzieht. Die daraus resultierenden Shack-Hartmann-Gradienten beinhalten nun nur noch den Effekt der astigmatischen Linse. Das Ergebnis ist im Folgenden graphisch dargestellt:

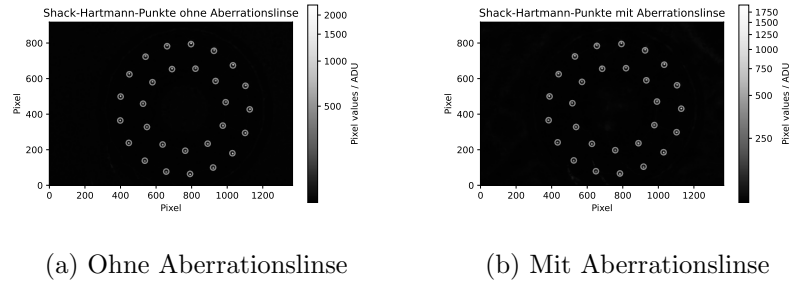


Abbildung 6: Bild hinter dem Microlens-Array

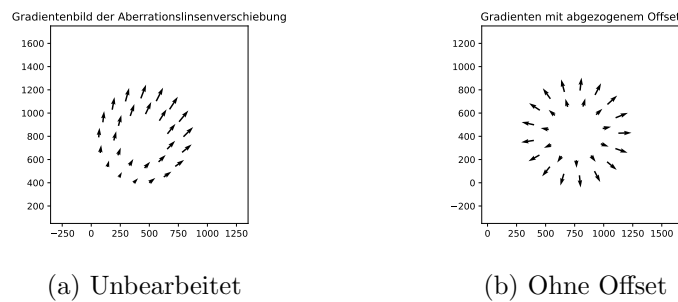


Abbildung 7: Shack-Hartmann-Gradienten

Die Ausrichtung und die Länge der Pfeile stehen dabei für die Orientierung und die Stärke der Verschiebung jedes Shack-Hartmann-Punktes.

Man kann sich leicht überlegen, dass die dargestellte Struktur der sattelähnlichen Form der Zernike-Polynome entspricht. Genauer handelt es sich um eine Übereinstimmung mit den Zernike-Polynomen zweiter Ordnung, welche gerade diejenigen sind, die den vorliegenden Astigmatismus beschreiben sollen. Um die Aberration zu quantifizieren, müssten die Koeffizienten der Zernike-Polynome bestimmt werden. Das wäre möglich, indem man eine Linearkombination derselben an das Ergebnis fittet. Damit wären eine vollständige Rekonstruktion der Wellenfront möglich, was jedoch in diesem Versuch nicht gefordert ist.

3.2.1 Mögliche Fehler

Im Folgenden sollen mögliche Fehler in der Bestimmung des Shack-Hartmann-Gradienten analysiert werden, um Schlüsse über die Richtigkeit unserer Ergebnisse zu ziehen.

Eine Klasse von Fehlern liegt im Versuchsaufbau, da alle Komponenten manuell platziert wurden. Einerseits könnten die Abstände der Bauteile auf der optischen Bank ungenau gewählt worden sein, wodurch eine Defokussierung des Bildes verursacht worden sein könnte. Das wäre dann der Fall, wenn die Brennweite des Linsenarrays nicht mit dem Abstand zur Kamera übereinstimmte. Eine solche Verzerrung führte zu einer Aufweichung der Shack-Hartmann-Punkte, sodass deren Koordinaten nicht mehr genau bestimmt werden könnten. Dadurch ergäben sich Ungenauigkeiten in der Berechnung des Gradienten. Sollte die Lichtquelle oder der Kollimator fehlerhaft positioniert gewesen sein, so könnte das Lichtsignal auseinanderlaufen anstatt sich parallel fortzupflanzen. Das führte dazu, dass man es nicht

länger mit einer planen Wellenfront zu tun hätte. Da wir eine solche aber für unsere Berechnungen voraussetzen, wäre deren Richtigkeit nicht mehr sichergestellt. Ein weiteres Problem bei der Positionierung der Komponenten stellt die Orientierung derselben dar, da eine nicht vollständig parallele Ausrichtung eine Verschiebung der Wellenfront verursachen würde. Diese müsste, wie in unserem Falle bereits geschehen, in die Berechnung einfließen. Zusätzlich würde durch von außen einfallendes, nicht auf die betrachtete Lichtquelle zurückzuführendes Licht die Messung beeinflusst.

Eine weitere Fehlerklasse bilden die Unzulänglichkeiten der verwendeten Bauteile und Instrumente selbst. Sollten die verbauten Mikrolinsen nicht allesamt identisch gewesen sein, so käme es zu einer Verschiebung der Brennweite damit einer Änderung der Verzerrung. Ebenso könnte dies durch Defekte der Kameralinse, bspw. Verunreinigungen durch Staubkörner, hervorgerufen werden. Beides führte zu Unsicherheiten bei der Bestimmung des Shack-Hartmann-Gradienten.

Des Weiteren könnte die Lichtquelle Probleme verursachen. Unseren Berechnungen liegt die Annahme einer bestimmten Wellenlänge zugrunde. Doch ist nicht sicher, ob die Lichtquelle tatsächlich monochromatisches Licht ausstrahlt und, falls dies der Fall ist, ob dessen Wellenlänge mit dem Sollwert übereinstimmt. Außerdem ist es möglich, dass der Laser nicht vollständig kohärent ist, wodurch Interferenzeffekte verursacht würden.

Das obige Ergebnis hätte auch verbessert werden können, indem man die im ersten Teil angefertigte Dunkelmessung genutzt hätte, um die Aufnahmen des Shack-Hartmann-Sensors im zweiten Teil zu bereinigen. Auf diese Weise hätte man sich eines eventuellen systematischen Fehlers des Detektors entledigen können.

4 Diskussion

Im ersten Schritt bestimmten wir Gain des verwendeten CMOS-Detektors. Dies war uns möglich, indem wir die Photonentransferkurve maßen, welche die Abhängigkeit der Varianz im Signal von dem am Sensor ankommenden Signal darstellt. Um den Flatfield-Effekt auszugleichen, nahmen wir in jedem Intensitätsschritt zehn Bilder auf. Davon wählten wir zwei Messreihen aus, welche wir weiter verwerteten. Bei einer Integrationszeit von 60 ms erhielten wir aus der Steigung der Fitkurve einen Gain von

$$g = 0,939 \pm 0,007 \frac{1}{\text{ADU}} \quad (1)$$

Um die Güte dieses Ergebnisses zu beurteilen, wäre ein Vergleichswert notwendig. Ein solcher liegt uns weder aus einer weiteren Messung noch aus der Literatur vor. Mögliche Fehler in dieser Analyse könnten von Rauschen, z. B. in der Ausleseelektronik, verursacht worden sein.

Im zweiten Schritt wurde der Shack-Hartmann-Sensor auf der optischen Bank platziert. Mit dieser Anordnung konnten wir die Verschiebung der Shack-Hartmann-Punkte durch die astigmatische Linse beobachten. Auf diese Weise konnten wir den Gradienten der verzerrten Wellenfront berechnen. Hieraus könnte unter Nutzung von Zernike-Polynomen eine vollständige Rekonstruktion der ursprünglichen Wellenfront vorgenommen werden. Der berechnete Gradient weist augenscheinlich eine Radialsymmetrie auf. Dies widerspricht der Erwartung, da die zu einer astigmatischen Linse gehörigen Zernike-Polynome eine sattelähnliche Struktur besitzen. Möglicherweise weist die verwendete Linse eine andere als die angegebene Symmetrie auf. Für die Diskussion weiterer möglicher Fehler sei auf Abschnitt 3.2.1 verwiesen. Das Gros des Fehlers kommt durch die ungenaue Positionierung der Komponenten auf der optischen Bank zustande. Weil das Ergebnis aber hinreichend genau mit den Erwartungen übereinstimmt, nehmen wir an, dass es sich hierbei um keine relevante Abweichung handelt.

Im Ganzen betrachtet war der Versuch insofern erfolgreich, als die Wellenfrontverzerrung und der Gain des CMOS-Detektor mit großer Genauigkeit bestimmt werden konnten. Der vorliegende Versuch ist durchaus dazu geeignet, das Wissen über die Analyse von Wellenfronten und die Bedienung von entsprechenden Detektoren beim Experimentator zu vertiefen.