



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
HAUS DER ASTRONOMIE
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTRONOMIE

WISSENSCHAFTLICHE ARBEIT

Adaptive Optik: Grundlage der Leistungsfähigkeit heutiger Großteleskope

Fabian Gebhart

Betreut durch

PD. Dr. Olaf Fischer, Dr. Markus Pössel, Dr. Markus Feldt, Dr. Stefan Hippler

27. Juni 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Die Funktionsweise der Adaptiven Optik	6
2.1	Das Auflösungsvermögen	7
2.2	Unsere Atmosphäre	8
2.2.1	Der Einfluss der Atmosphäre	8
2.2.2	Atmosphärische Turbulenzen	11
2.2.3	Kolmogorov-Modell für atmosphärische Turbulenzen	12
2.2.4	Zernike-Polynome	16
2.2.5	Isoplanatischer Winkel	18
2.3	Künstliche Laserleitsterne	19
2.4	Wellenfrontsensoren	21
2.4.1	Physikalische Betrachtung der Wellenfront	21
2.4.2	Shack-Hartmann-Sensor	22
2.4.3	Krümmungssensor	23
2.4.4	Pyramidensensor	23
2.5	Deformierbare Spiegel	24
2.5.1	Spiegel mit piezoelektrischen Aktuatoren	25
2.5.2	Bimorphe Spiegel	26
2.5.3	MOEMS-Spiegel	27
2.5.4	Adaptive Sekundärspiegel	28
2.6	Kontrollmechanismus	29
2.7	Weiterentwicklungen - Moderne Adaptive Optik-Systeme	30
2.7.1	Multi-Conjugate Adaptive Optics (MCAO)	31
2.7.2	Ground Layer Adaptive Optics (GLAO)	32
2.7.3	Multi-Objects Adaptive Optics (MOAO)	32
2.7.4	Extreme Adaptive Optics (XAO)	34
2.8	Aktive Optik	35
2.9	Kenngrößen der Adaptiven Optik	35
3	Die Adaptive Optik im Einsatz	37
3.1	La Silla-Observatorium	37
3.2	Lick-Observatorium	38
3.3	Keck-Observatorium	40
3.4	Subaru-Teleskop	42
3.5	Gemini-Observatorium	43
3.6	Large Binocular Telescope	45
3.7	Very Large Telescope	47

3.8	Giant Magellan Telescope	49
3.9	Thirty Meter Telescope	50
3.10	European-Extremely Large Telescope	52
4	Die Adaptive Optik als Demonstrationsmodell	56
4.1	Motivation	56
4.2	Die Realisierung	56
4.3	Der Fertigungsprozess	58
4.3.1	Die Komponenten	58
4.3.2	Version 1: Hardware und Bilderkennung	59
4.3.3	Version 2: Fünf Laser und deren Zuordnung	60
4.3.4	Version 3: Präzision und Didaktik	62
4.3.5	Version 4: Das finale Modell	65
4.4	Zeitlicher Verlauf der Korrekturen	68
4.5	Bedienung	70
4.6	Didaktik	72
4.7	Gegenüberstellung: Modell – Realität	73
4.8	Dokumentation	74
5	Fazit	75
	Literaturverzeichnis	76
	Anhang	82

1 Einleitung

Seit Beginn der 90er Jahre machen Astronomen von einer Technik Gebrauch, die den Blick der erdgebundenen Teleskope ins All deutlich verschärft. Mit der Verwendung der *Adaptiven Optik* gelang es erstmals, die störenden Turbulenzen der Erdatmosphäre auszugleichen und somit die Beobachtungstechnik zu revolutionieren. Die Entwicklung von ausgeklügelten Mess- und Korrekturverfahren auf der Grundlage innovativer Technologien ermöglicht es den Astronomen, trotz atmosphärischer Störungen gestochen scharfe Bilder aufzunehmen.

Die modernen Naturwissenschaften und ganz besonders die Astronomie leben von innovativen technischen Entwicklungen. So gelang es Galileo Galilei vor rund 400 Jahren mit der Unterstützung eines neuartigen Instruments, Objekte am Nachthimmel zu erspähen, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar gewesen wären. Mit der Erfindung des Teleskops brach für die Astronomie schließlich ein neues Zeitalter an. Anschließend wurden die Leistungsfähigkeit der Teleskope durch Verbesserung der optischen Hauptkomponenten immer weiter gesteigert. Einerseits führten neue Beschichtungen und genauere Schleifmethoden zu einer höheren Qualität. Andererseits sollte eine größere optische Hauptkomponente zusätzlich für eine bessere Leistungsfähigkeit sorgen. Die Entwicklung immer größerer Teleskope hatte in der Vergangenheit jedoch hauptsächlich dazu geführt, dass diese mehr Licht sammeln und damit auch schwächer leuchtende Objekte untersuchen konnten. Das Auflösungsvermögen konnte dadurch jedoch nicht ohne weiteres gesteigert werden. Ursache dafür sind die störenden optischen Einflüsse der Erdatmosphäre, welche sich durch turbulente Durchmischungen der Luftschichten, dem sogenannten *Seeing*, ereignen. Der Austausch von warmer und kalter Luft verursacht in der Troposphäre Winde, die zu verschwommenen und unscharfen astronomischen Bildern führen. Durch diese atmosphärischen Störungen entspricht das tatsächliche Auflösungsvermögen beliebig großer Teleskope etwa dem eines 10 – 20 cm Teleskops. Um dieser Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit entgegenzuwirken, stellten Forscher bereits in den 50er Jahren Überlegungen an, astronomische Aufnahmen ohne die Einflüsse der atmosphärischen Turbulenzen anzufertigen. Eine Möglichkeit, den Einflüssen der Erdatmosphäre zu entkommen, ist die Verwendung von Weltraumteleskopen. Durch die Beförderung in den Weltraum entkommt man den störenden Effekten zwar, jedoch liegt auf der Hand, dass diese Möglichkeit spezielle technische Herausforderungen, verbunden mit immensen finanziellen Mitteln, mit sich bringt. Die zweite, vergleichsweise günstige, Möglichkeit besteht aus der Verwendung der Technik der Adaptiven Optik. Die Adaptive Optik misst die Störung der Wellenfronten und kompensiert diese durch Bewegung und Verformung von Spiegeln. Bereits im Jahre 1953 befasste sich Horace W. Babcock mit der Entwicklung dieser innovativen Technik. Die technische Umsetzung war damals jedoch nicht realisierbar, sodass das erste zivile Adaptive Optik System im Jahre 1992 am 3,6 m - Teleskop in La Silla (Chile), unter dem Namen COME-ON, zum Einsatz kam. Deutlich früher forsch-

ten jedoch militärische Einrichtungen an der Umsetzbarkeit der Technik. Im Rahmen der strategischen Verteidigungsinitiative stellten die Amerikaner bereits in den siebziger Jahren Forschungen auf diesem Gebiet an. Erst nach Beendigung des Kalten Krieges wurden diese Forschungsergebnisse der Öffentlichkeit und somit auch den Astronomen preisgegeben. Was damals die erdgebundene Astronomie revolutionierte, ist heute nichts weniger als die Grundlage für die Leistungsfähigkeit heutiger Großteleskope.

Vergleicht man die Entdeckung der vier größten Monde des Jupiters durch Galileo Galilei mit der Entdeckung des Planeten HR 8799e durch Marois mit dem Keck-Teleskop (Marois et al. 2010) etwa 400 Jahre später, so wird das Potential der Adaptiven Optik deutlich. Der Stern HR8799 befindet sich in einer Entfernung von 130 Lichtjahren und ist damit um einen Faktor von etwa 10^7 weiter entfernt von der Erde als Jupiter und dessen Monde. Die beiden Entdeckungen unterscheiden sich jedoch nicht nur in der Entfernung, sondern auch im Kontrastverhältnis. Schließlich sendet der zentrale Stern deutlich mehr Licht aus als die Planeten und erschwert so die Untersuchung von Objekten in der nächsten Umgebung des Sterns. Entdeckungen wie diese wären ohne die Adaptive Optik nicht vorstellbar.

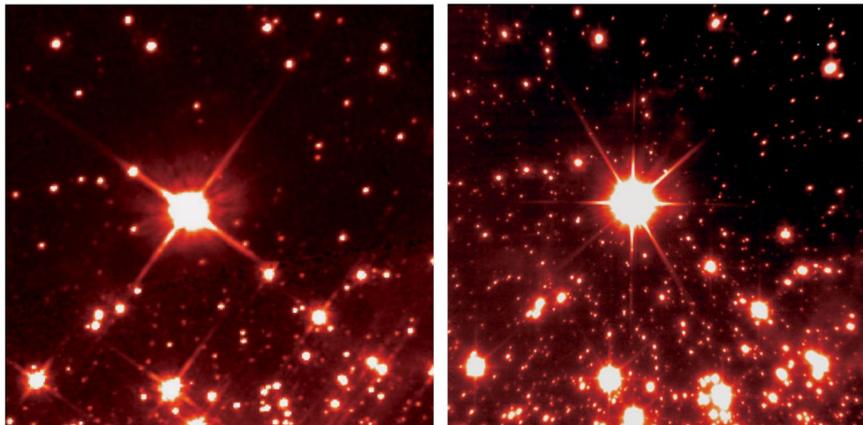


Abbildung 1: Vergleich der räumlichen Auflösung: Eine Aufnahme des NGC 3603 vom Hubble Space Telescope (links) und die gleiche Himmelsregion aufgenommen vom VLT mit Adaptiver Optik (rechts) [Brandner et al. 2002]

Abbildung 1 zeigt, dass die Adaptive Optik inzwischen eine ausgereifte Technik ist. Zu sehen ist der Emissionsnebel NGC 3603 in zwei verschiedenen Aufnahmen. Die linke Aufnahme stammt aus den Archivdaten des Hubble Space Telescope und wurde mit einer Belichtungsdauer von 400 s im I-Band (800 nm) aufgenommen. Das rechte Bild hingegen wurde vom Very Large Telescope Yepun mit einer Belichtungsdauer von 300 s im K-Band ($2,2\ \mu\text{m}$) aufgenommen (Brandner et al. 2002). Die Gegenüberstellung verdeutlicht eindrucksvoll, dass die erdgebundene Astronomie die atmosphärischen Turbulenzen

überwinden und somit ein räumliches Auflösungsvermögen erreichen kann, welches jenem der Weltraumteleskope gleichkommt oder diese sogar übertrifft.

Ziel dieser Arbeit ist das Vorstellen der Funktionsweise der Adaptiven Optik und die darauf basierende Entwicklung eines Demonstrationsmodells. Das Einarbeiten in das wissenschaftliche Gebiet der Adaptiven Optik soll zur Beantwortung der Frage „Wie entwickelt man ein didaktisch wertvolles Modell, welches die Funktionsweise der Adaptiven Optik möglichst anschaulich wiedergibt?“ beitragen. Um diese Ziele zu realisieren, wurde die Arbeit im wesentlichen in fünf Kapitel aufgeteilt. Nach der Einleitung folgt das zweite Kapitel, welches sich mit der Funktionsweise der Adaptiven Optik und deren Komponenten beschäftigt. Kapitel drei stellt eine exemplarische Betrachtung der im Einsatz befindlichen Adaptive Optik Systeme mit einem Ausblick auf die zukünftige Entwicklung dar. Anschließend folgt Kapitel vier, welches den Fertigungsprozess und den didaktischen Hintergrund des Adaptiven Optik Modells dokumentiert. Eine Reflexion über die Anfertigung des Demonstrationsmodells und eine Gegenüberstellung zur realen Adaptiven Optik bilden schließlich das Fazit.

2 Die Funktionsweise der Adaptiven Optik

Astronomen, die mit einem Teleskop Himmelsbeobachtungen anstellen, müssen immer damit rechnen, dass das Licht, auf dem Weg vom Objekt bis zur Erde, Störungen erfährt. Diese Störungen ereignen sich in der Atmosphäre der Erde. Durch den Austausch von warmer und kalter Luft entstehen Turbulenzen, die die zu uns kommende Strahlung ablenken. Aufgenommene astronomische Bilder erscheinen somit unscharf und verschwommen.

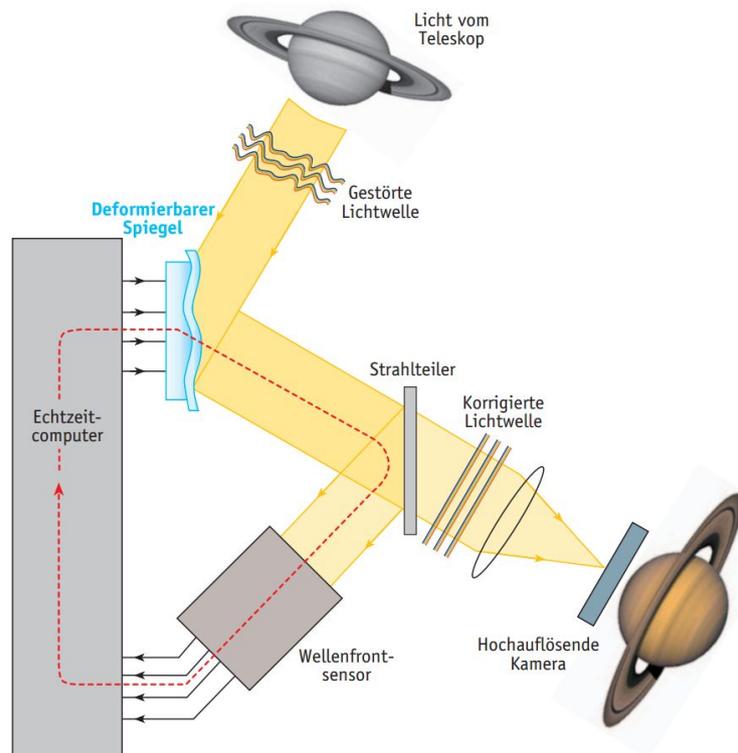


Abbildung 2: Funktionsweise der Adaptiven Optik [Hippler and Kasper 2004]

Um die Einflüsse der Atmosphäre überwinden und die Störung der Wellenfronten korrigieren zu können, muss die Adaptive Optik zuallererst in der Lage sein, die Störung messen und analysieren zu können. Dies erledigen die sogenannten Wellenfrontsensoren. Die Wellenfrontsensoren messen die lokalen Störungen möglichst hochauflösend über einen festgelegten Bereich des Sichtfeldes. Aus diesen Daten berechnet ein Computer eine Matrix mit den genauen Werten der lokalen Wellenfrontstörungen. Zur mathematischen Beschreibung dienen verschiedene Modelle, die die sogenannte Phasenaberration als Funktion des Raumes und als Überlagerung mehrerer Moden darstellen. Mehrere Hundert mal pro Sekunde berechnet der Computer somit eine zur Störung passende Kor-

rekturmatrix. Die anschließende Korrektur wird durch sogenannte deformierbare Spiegel realisiert. Durch das passende Verformen dieser Spiegel lassen sich die gestörten Wellenfronten weitgehend wieder korrigieren und schließlich Bilder ohne atmosphärische Turbulenzen aufnehmen.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise der klassischen Adaptiven Optik. Das von oben kommende Licht des Saturns fällt durch das Teleskop zuerst auf den deformierbaren Spiegel. Anschließend wird Licht durch einen Strahlteiler auf den Wellenfrontsensor und eine Kamera aufgeteilt. Damit die Kamera nun korrigierte Bilder aufnehmen kann, muss der Computer die Korrektur in Echtzeit berechnen und an den deformierbaren Spiegel weiterleiten. Um die Arbeitsweise des Systems als Ganzes besser verstehen zu können, werden in diesem Kapitel die einzelnen Komponenten und verschiedene physikalische Effekte noch genauer beschrieben.

2.1 Das Auflösungsvermögen

Sowohl das menschliche Auge, als auch die Großteleskope neuester Generation unterliegen dem *Rayleigh*-Kriterium für maximale Auflösung. Das Kriterium beschreibt das optische Auflösungsvermögen unter optimalen Bedingungen begrenzt durch Beugungseffekte. Dabei ist der Winkel α (in rad) der kleinstmögliche Winkel unter welchem zwei Objekte noch als solche getrennt voneinander wahrgenommen werden können:

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.1)$$

Damit hängt der Winkel α von der Wellenlänge λ des Lichts und dem Durchmesser D der Öffnung des optischen Systems ab. Aufgrund der Wellennatur des Lichtes wird es entsprechend dem *Huygenschen Prinzip* an einer Öffnung gebeugt. Dabei entspricht jeder Punkt der einfallenden Wellenfront einem Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Dadurch entstehen in jedem noch so perfekten optischen Instrument Beugungsbilder der beobachteten Objekte, welche das Auflösungsvermögen einschränken. Betrachtet man zwei Punktequellen, so sind diese gerade noch voneinander trennbar, wenn das zentrale Beugungsmaximum der zweiten Quelle auf das erste Minimum der ersten Quelle fällt, siehe Abbildung 3.

Folglich müsste ein Teleskop mit einem Durchmesser von 10m, wie etwa die beiden *Keck-Teleskope* auf Hawaii, im sichtbaren Bereich ein Auflösungsvermögen von etwa $0,014''$ erreichen. In der Realität werden jedoch keine solch hohen Auflösungen erzielt. Wegen der turbulenten Atmosphäre erreichen erdgebundene Teleskope selbst, bei besonders guten atmosphärischen Bedingungen, maximale Auflösungen von etwa $0,5''$ (Hippler and Kasper 2004). Um schließlich doch schärfere Bilder aufnehmen zu können, benötigt man eine Methode, welche die störenden Einflüsse der Atmosphäre ausgleicht. Dazu betrachten wir im folgenden Abschnitt die Effekte der Erdatmosphäre etwas genauer.

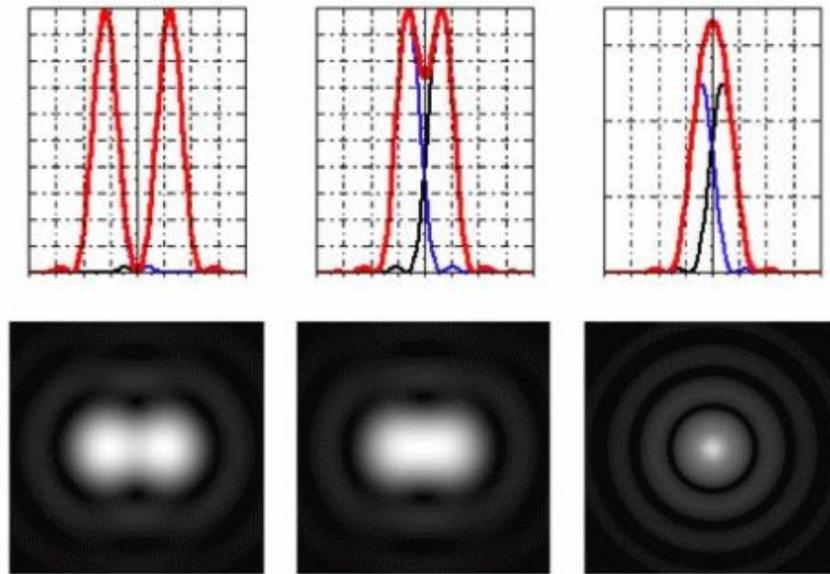


Abbildung 3: Überlagerungen zweier Beugungsbilder: Deutlich voneinander trennbare Lichtquellen (links), gerade noch voneinander trennbar, da Beugungsmaximum der ersten Quelle in das Beugungsminimum der zweiten Quelle fällt (mitte), nicht mehr voneinander trennbare Beugungsbilder (rechts) [Rayleigh resolution, Maxine Jonas, CC BY-SA 3.0]

2.2 Unsere Atmosphäre

Damit wir Himmelskörper beobachten und Strahlung aus dem All detektieren können, muss das Licht auf dem Weg in unser Auge oder in unsere Teleskope die Erdatmosphäre passieren. Durch ihren abschirmenden Charakter schützt uns die Atmosphäre vor hoch-energetischer Strahlung und bildet unter anderem eine wichtige Grundlage für das Leben auf der Erde. Diese Eigenschaften bedeuten für die Astronomie jedoch auch, dass ein Teil der Strahlung stark verändert oder gar nie am Erdboden ankommt. Das folgende Kapitel soll klären, welche physikalischen Prozesse in der Atmosphäre stattfinden und welche Auswirkungen für die Himmelsbeobachtung damit einhergehen.

2.2.1 Der Einfluss der Atmosphäre

Die Erdatmosphäre besteht etwa zu 78% aus Stickstoff und zu 21% aus Sauerstoff, welche hauptsächlich in den Formen N_2 und O_2 vorkommen. Diese und andere Moleküle können durch Anregung der Energiezustände Licht absorbieren, wodurch unter anderem auch die *Fraunhoferlinien* entstehen. Entsprechend der molekilspezifischen Bandstruktur werden Photonen mit bestimmter Energie, also Licht bestimmter Wellenlängen, stärker absorbiert. Die **Absorptionseffekte** haben im optischen Bereich zwar keinen

großen Einfluss auf die Gesamthelligkeit der Himmelskörper, schwächen dafür allerdings diskrete Wellenlängen beachtlich ab (Lawrence 2014, S.25). Das Spurengas Ozon (O_3) hingegen absorbiert fast vollständig die hochenergetische UV-Strahlung. Diesen Effekt nutzen Astronomen aus, um beispielsweise Informationen über die Zusammensetzungen der Atmosphären von Exoplaneten abzuleiten. Doch nicht nur Absorptions-, sondern auch Streuungseffekte spielen eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung der Strahlung durch die Atmosphäre. **Streuung** spielt immer dann eine Rolle, wenn die Photonen ihre kinetische Energie bei Stößen mit den Teilchen aus der Atmosphäre teilweise an diese abgeben, wie es z.B. bei Röntgenstrahlung der Fall ist. Die Photonen der Röntgenstrahlung haben ausreichend hohe Energie um gebundene Elektronen aus den Atomen schlagen zu können, wodurch die Photonen ihre Energie verlieren (Lawrence 2014, S.26). Ein dritter physikalischer Effekt stellt die Brechung von Strahlung dar. **Brechung** tritt immer dann auf, wenn sich der Brechungsindex des Mediums ändert, in dem sich die Strahlung ausbreitet. Gemäß des *Snellius'schen Brechungsgesetzes*

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.2)$$

werden Lichtstrahlen beim Übergang von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium zum Lot hin gebrochen. Die vom Brechungsindex abhängende Phasengeschwindigkeit äußert sich so in einer Richtungsänderung der Welle. Die langwelligen Radiowellen können durch die Richtungsänderung sogar Reflexion erfahren (Lawrence 2014, S.27). Im Bereich von UV-, optischer und infraroter Strahlung äußert sich der Effekt zwar schwächer, verursacht dennoch erhebliche Einbußen im Bereich des Auflösungsvermögens. Durch die beschriebenen physikalischen Effekte schirmt unsere Atmosphäre bestimmte Strahlung stärker ab als andere. Wellenlängenbereiche, die weitestgehend ungehindert durch die Atmosphäre gelangen, werden auch als *Wellenlängenbänder* oder *atmosphärische Fenster* bezeichnet. Diese Bänder werden mit Großbuchstaben entsprechend der jeweiligen optischen Filter bezeichnet. Im optischen Bereich entspricht das R-Band beispielsweise einer Wellenlänge von $0,65 \mu\text{m}$, im infraroten Bereich spricht man unter anderen vom I- ($1,0 \mu\text{m}$), J- ($1,25 \mu\text{m}$), H- ($1,65 \mu\text{m}$), K- ($2,20 \mu\text{m}$) oder L-Band ($3,45 \mu\text{m}$) (Cheng 2009, S.503). Abbildung 4 fasst die sogenannte *Opazität* für verschiedene Wellenlängen zusammen. Die Abbildung deutet darüber hinaus an, dass die Höhe der Teleskope für die entsprechende Wellenlänge eine Rolle spielt. Einige Wellenlängen, wie z.B. Röntgenstrahlung, gelangen nicht durch die Atmosphäre und können somit nur in großen Höhen, mit Hilfe von Weltraumteleskopen, Heißluftballonen oder Höhenforschungsraketen, untersucht werden (Lawrence 2014, S.27). Doch nicht nur extreme Höhen jenseits des Erdbodens verbessern die astronomischen Beobachtungen, auch die Wahl eines höher gelegenen Standorts auf einem Berg kann deutliche positive Effekte mit sich bringen, da die Dichte der Luft gemäß der hydrostatischen Höhenformel exponentiell mit steigender Höhe abnimmt. Außerdem schränkt die Anwesenheit von zu viel Wasserdampf

die Sicht auf den Nachthimmel ein, sodass selbst die abgelegensten Regionen wie Wüsten aufgrund ihrer Trockenheit als geeignete Standorte für Teleskope in Frage kommen (Lawrence 2014, S.30).

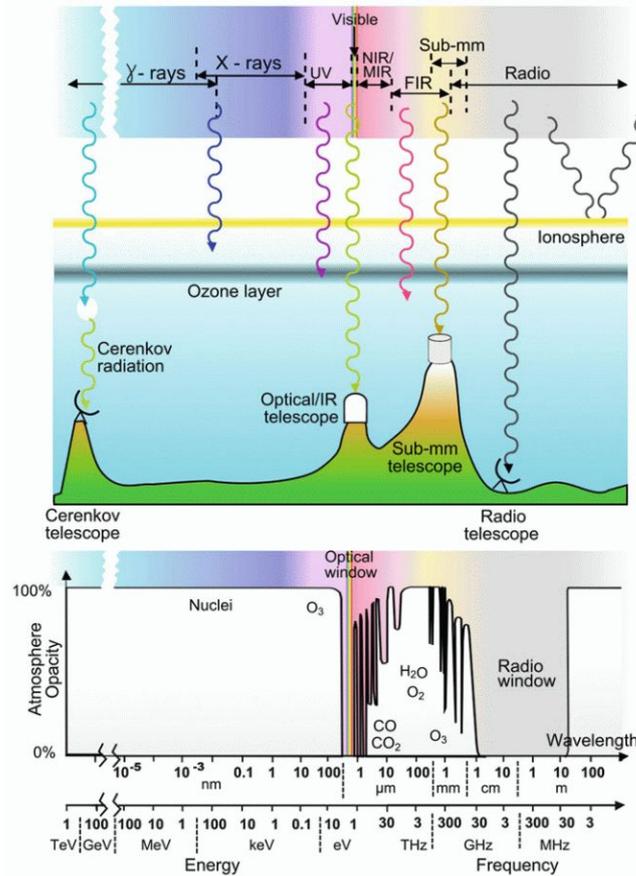


Abbildung 4: Atmosphärische Opazität für verschiedene Wellenlängen © Dr. Adam Woodcraft

Neben den physisch unvermeidbaren Auswirkungen der Absorption, Streuung und Brechung des Lichtes birgt die Atmosphäre weitere Hürden, die von Astronomen bei der Beobachtung von Himmelskörpern berücksichtigt werden müssen. Ein theoretisch vermeidbarer Effekt stellt die **Lichtverschmutzung** dar. Die menschengemachte Begleiterscheinung der Industrialisierung ereignet sich somit in der Nähe von Großstädten am stärksten. Das Licht von Straßenbeleuchtungen, Leuchtreklamen, Industriebeleuchtungen und vielen anderen künstlichen Lichtquellen strahlt oft unnötigerweise nach oben und wird schließlich in der Erdatmosphäre an Wassertröpfchen, Staub und sonstigen Aerosolen gestreut und erhellt so die Umgebung. Die Entstehung von den bekannten Leuchtlocken über Städten führt dazu, dass einerseits immer weniger Menschen die Milchstraße

mit ihrem bloßen Auge beobachten können und andererseits der Bau von neuen Großteleskopen möglichst weit abseits von dicht besiedelten Regionen vorgenommen wird. Ein weiterer Faktor ist der Einfluss der Luftmassen beziehungsweise des **Zenitwinkels** auf die astronomischen Beobachtungen. Wellenlängen, für welche die Atmosphäre nur teilweise transparent ist, werden bei größerem Zenitwinkel stärker abgeschirmt, da sie dabei mehr Luftmassen durchqueren müssen (Lawrence 2014, S.31). Die Beobachtung bestimmter Objekte lässt sich folglich am Besten bei minimalem Zenitwinkel durchführen.

Anhand der erwähnten Effekte und Auswirkungen der Atmosphäre auf die Himmelsbeobachtung lassen sich bevorzugte Standorte für den Bau von Großteleskopen ermitteln. Im Allgemeinen bieten sich dafür also möglichst trockene, hohe und weit von dicht besiedelten Regionen entfernte Standorte an. Für die optische, Infrarot und Submillimeter Astronomie eignet sich der Vulkan Mauna Kea als höchster Berg auf Hawaii besonders gut. Neben den berühmten *Keck*-, *Subaru*- und *Gemini*- Teleskopen besteht das Mauna-Kea-Observatorium aus zahlreichen anderen Teleskopen, die von den besonderen atmosphärischen Bedingungen des Standorts profitieren. Neben der Atacamawüste im Norden Chiles, welche Heimat des *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*, des *La-Silla-Observatoriums* und des *Paranal-Observatoriums* ist, wurden auch Standorte wie Namibia zur Messung der kosmischen Gammastrahlung (*High Energy Stereoscopic System*), aber auch die Antarktis zur Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem *Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization (BICEP)* Experiment, gewählt.

So gut die Bedingungen der jeweiligen Standorte auch sein mögen, Teleskope, die im Bereich Submillimeter, sichtbare Wellenlängen oder Infrarot arbeiten, müssen immer mit optischen Störungen durch Luftunruhen kämpfen. Die Turbulenzen lassen sich zwar ebenfalls durch die Wahl des Standortes minimieren, aber niemals völlig vermeiden. Um zu verstehen, wie man den Luftunruhen dennoch auf die Schliche kommen kann, betrachten wir die atmosphärischen Turbulenzen im Folgenden etwas genauer.

2.2.2 Atmosphärische Turbulenzen

Ein jeder, der sich schon einmal etwas Zeit genommen hat um die Sterne zu beobachten, kann bestätigen, dass diese auf scheinbar funkeln. Diese scheinbare Änderung der Helligkeit wird als Szintillation bezeichnet. Das Funkeln kommt jedoch nicht durch eine Änderung der Helligkeit der Sterne selbst zustande, sondern durch die turbulenten Bewegungen von Luftschichten in der Atmosphäre (Cheng 2009, S.261). Dabei werden drei verschiedene Arten von Turbulenzen unterschieden (Lawrence 2014, S.43). Störende Luftbewegungen können direkt in der Teleskopkuppel durch Konvektion entstehen, dem sogenannten *Dome Seeing*. Wärmere Luft von elektrischen Geräten oder optischen Instrumenten steigt auf und die kältere Luft der Umgebung sinkt ab. Ein weiterer Effekt ereignet sich durch das Aufeinandertreffen von Wind und bodennahen Strukturen

wie Felsformationen oder Gebäuden, weshalb der Effekt auch als *bodennahe Turbulenzen* (engl. groundlayer turbulence) bezeichnet wird. Doch nicht nur die bodennahen Turbulenzen sorgen für erschwerte Bedingungen, auch die unterschiedlich schnellen Luftschichten in größerer Höhe verursachen Turbulenzen, sodass die Lichtstrahlen beim Durchqueren der Atmosphäre scheinbar willkürlich ablenkt werden. Moderne Großteleskope erreichen durch das Kühlen der Instrumente und Fluten der Kuppel mit laminaren Luftströmungen bereits eine Senkungen der Turbulenzen im Teleskopgebäude, können diese jedoch nicht vollständig vermeiden (Lawrence 2014, S.43). Die höher gelegenen atmosphärischen Turbulenzen hingegen lassen sich auf diese Weise nicht beeinflussen, weshalb wir deren Entstehung im Folgenden noch etwas genauer betrachten möchten. Der Strömungslehre zufolge entstehen immer dann Turbulenzen, wenn die *Reynoldszahl*

$$Re = \frac{\rho \cdot v_0 \cdot L_0}{\eta} = \frac{v_0 \cdot L_0}{\nu} \quad (2.3)$$

einen kritischen Wert überschreitet. Dabei entspricht ρ der Dichte von Luft, v_0 der Geschwindigkeit, L_0 der charakteristischen Größe einer Turbulenzzelle, η der dynamischen Viskosität und ν , über den Zusammenhang $\eta = \nu \cdot \rho$, der kinematischen Viskosität. Bei einem Überschreiten von $Re \approx 2000$ entstehen aus der laminaren Strömung schließlich Turbulenzen (Hippler and Kasper 2004). Typische Werte für die Bedingungen in der Atmosphäre sind $L_0 \approx 15$ m, $v_0 \approx 1$ m s⁻¹ und $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6}$ m² s⁻¹, welche zu einer Reynoldszahl von $Re \approx 10^6$ führen. Dieser Wert stellt eine bereits fortgeschrittene entwickelte Turbulenz dar, was einen durchaus normalen atmosphärischen Zustand widerspiegelt.

2.2.3 Kolmogorov-Modell für atmosphärische Turbulenzen

Zur Veranschaulichung und Beschreibung der Turbulenzen entwickelte der russische Mathematiker Andrei Kolmogorov im Jahre 1961 ein Modell (Kolmogorov 1991), welches auf der Arbeit von V.I. Tatarski zur Ausbreitung von Wellen in einem turbulenten Medium basiert und in der Regel gut durch Messdaten bestätigt wird (Tatarski 1961). Da die physikalischen Effekte der Atmosphäre, insbesondere auf sehr kleinen Skalen, noch nicht vollständig verstanden sind, verwendet man zur Beschreibung Modelle, die auf statistischen Analysen beruhen (Tyson 2010, S.24). Nach Kolmogorov zerfallen große Turbulenzzellen durch Abgabe ihrer kinetischen Energie in immer kleinere Zellen. Die Größe der Turbulenzzellen variiert dabei von $L_0 \approx 100$ m bis $l_0 \approx 10$ mm. Das schematische Prinzip der Turbulenzzellen ist in Abbildung 5 dargestellt. Durch die Viskosität der Luft zerfallen die kleinen Turbulenzzellen und geben ihre Energie durch Reibungseffekte in Form von Wärme an die Umgebung ab (Hippler and Kasper 2004).

Die Änderung der Temperatur schlägt sich direkt auf die Änderung der Dichte nieder, welche wiederum Einfluss auf den Brechungsindex von Luft hat. Gemäß (2.2) erfährt

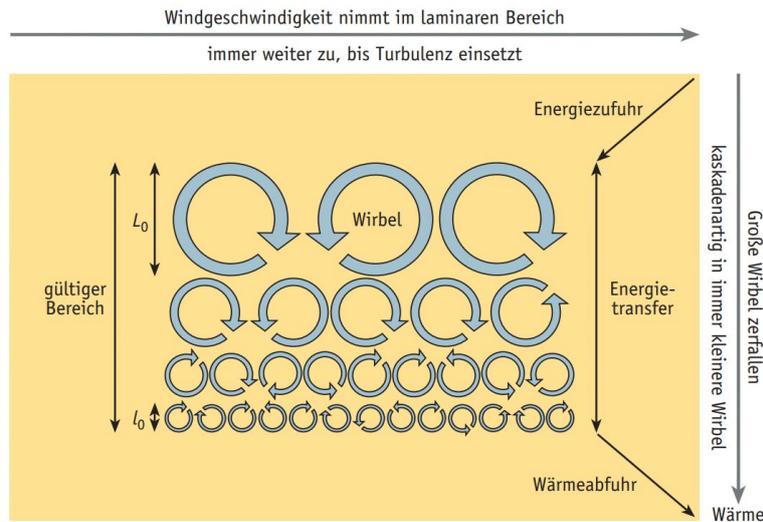


Abbildung 5: Modell zur Veranschaulichung der Entwicklung von Turbulenzen nach Kolmogorov [Hippler and Kasper 2004]

die Wellenfront eine Richtungsänderung. Somit wird deutlich, dass Licht, welches beim Durchqueren unserer Atmosphäre verschiedene Schichten Luft mit unterschiedlichen Brechungsindizes passiert, auf nahezu zufällige Art und Weise abgelenkt wird. Diese Fluktuationen des Brechungsindex beschränken die erdgebundenen Teleskope in ihrem Auflösungsvermögen, welche somit verwaschene, unscharfe astronomische Bilder erzeugen. Um den zufälligen Charakter der Natur beschreiben zu können, führte Kolmogorov die sogenannte *Strukturfunktion*

$$D_f(r) = \langle |f(r_1) - f(r_1 + r)|^2 \rangle \quad (2.4)$$

ein. Dabei beschreibt $f(r)$ eine statistische, zu messende Größe wie zum Beispiel die Phasenstörung, welche im räumlichen Mittelwert $\langle f(r) \rangle = 0$ ist. Die Strukturfunktion charakterisiert somit die räumliche Eigenschaft der turbulenten Umgebung durch die mittlere Differenz zweier Messgrößen an den jeweiligen Orten r_1 und $r_1 + r$. Aus diesem Ansatz entwickelte der russische Physiker Alexander Obukhov 1949 folgendes Ergebnis

$$D_f(r) = C_n^2 \cdot r^{2/3}, \quad (2.5)$$

welches auch unter dem Namen *Obukhovsches Gesetz* bekannt ist (Glindemann et al. 1999). Die Größe C_n^2 stellt die *Brechungsindex-Strukturkonstante* dar, welche Funktion der Höhe (Turbulenz-Profil) über den jeweiligen Messstandorten ist und im Bereich von 10^{-14} bis 10^{-18} liegt (Lawrence 2014, S.43). Anschließend wurde von D. L. Fried der

sogenannte *Fried-Parameter*

$$r_0 = \left[0,423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sec(z) \int C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (2.6)$$

eingeführt, der als Funktion der Brechungsindex-Strukturkonstante als fundamentaler Parameter für astronomisches Seeing verwendet wird (Wilson 2007, S.388). Dabei ist λ die Wellenlänge des einfallenden Lichts und z die Zenitdistanz, unter der beobachtet wird. Mit dem Fried-Parameter lässt sich mit der Beziehung

$$r_0 = \frac{\lambda}{\text{Seeing}} \quad (2.7)$$

die Größe der Seeing-Scheibe (Halbwertsbreite der Punktbildfunktion) beschreiben, siehe Abbildung 6. Ein kleiner Fried-Parameter repräsentiert somit starke Turbulenzen und große Werte von r_0 entsprechend schwache Turbulenzen und gutes Seeing. Der Fried-Parameter kann darüber hinaus als Größe eines Teleskops interpretiert werden, welches in einem turbulenzfreien Medium das gleiche Auflösungsvermögen erreichen würde wie ein unendlich großes Teleskope mit turbulenten Störungen (Avila 1974, S.7). Mit anderen Worten gibt er den maximalen Aperturdurchmesser an, bei dem ein Teleskop mit nahezu beugungsbegrenzter Auflösung arbeiten kann, ohne zusätzliche Korrekturen bezüglich der atmosphärischen Turbulenzen beanspruchen zu müssen. Damit lässt sich abschätzen, aus wie vielen räumlichen Unterteilungen die Einfallsfläche des Lichts mindestens bestehen muss. Aus der Integration der Brechungsindex-Strukturkonstante über den Weg des Lichtes durch die Atmosphäre vom Teleskop bis zu Höhe h wird deutlich, dass der Fried-Parameter auch ein Maß für die Qualität der optischen Transmission durch die Atmosphäre wiedergibt. Die Proportionalität des Fried-Parameters zu der Wellenlänge des einfallenden Lichts aus (2.6) ist

$$r_0 \propto (\lambda^{-2})^{-3/5} \propto \lambda^{6/5} \quad (2.8)$$

und gibt einen wichtigen Zusammenhang an, welcher auch experimentell bestätigt wurde (Wilson 2007, S.388). Mit (2.7) folgt für die Abhängigkeit des Seeing von der Wellenlänge

$$\text{Seeing} \propto \lambda^{-1/5}. \quad (2.9)$$

Mit wachsender Wellenlänge nimmt die Größe des Seeings folglich langsam ab, sodass das Auflösungsvermögen für Teleskope, die mit infrarotem Licht arbeiten, weniger von den atmosphärischen Turbulenzen beeinflusst wird, als das Auflösungsvermögen der Teleskope, die im sichtbaren Spektralbereich arbeiten. Mit der Gleichung (2.6) für den Fried-Parameter ergibt sich für die Struktur-Funktion nach Kolmogorov der vereinfachte

Ausdruck

$$D_f(r) = 6,88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (2.10)$$

Aus der Betrachtung der Punktbildfunktion (engl. point spread function, kurz PSF) eines Bildes von einem Stern, welches ohne Seeing-Effekte aufgenommen wurde und eines mit Seeing (Abbildung 6) lässt sich ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Qualität einer Adaptiven Optik ableiten. Das Verhältnis zwischen den Maxima der Intensitäten gibt das sogenannte *Strehlverhältnis* an:

$$S = \frac{I_{\text{Seeing}}}{I_{AO}}. \quad (2.11)$$

Das Strehlverhältnis, oder Strehlzahl, liegt zwischen Null und Eins und kann demnach auch in Prozent angegeben werden. Je größer die Strehlzahl desto besser ist die Winkelauflösung eines optischen Systems und je geringer die Bildqualität, desto kleiner die Strehlzahl. Schließlich lässt sich das Licht einer Punktquelle mit geringer Winkelauflösung nur als breit ausgedehnte Lichtquelle, und mit hoher Winkelauflösung als kleineren, helleren Punkt, erkennen. Ein Strehlverhältnis $S > 80\%$ entspricht einer sehr guten Korrektur und wird nur von sehr modernen Adaptive Optik-Instrumenten erreicht (Hippler and Kasper 2004).

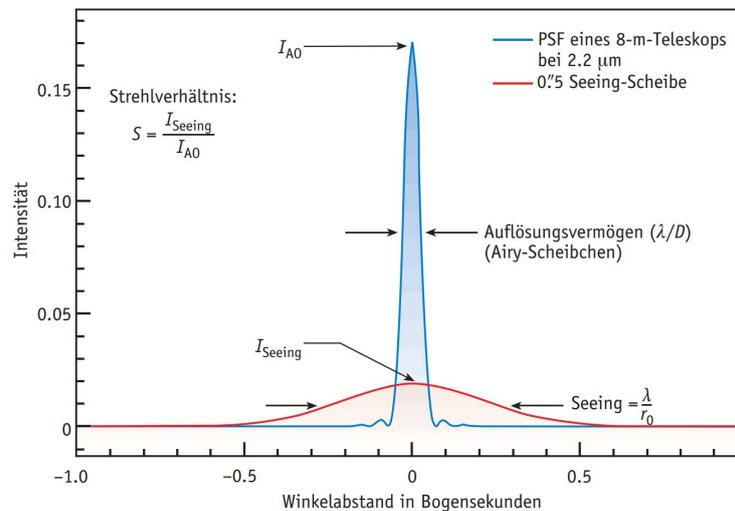


Abbildung 6: Punktbildfunktionen von einem Stern ohne Turbulenzen (blau) und mit Turbulenzen (rot) [Hippler and Kasper 2004]

Neben dem Fried-Parameter, der Ortsskala zur Beschreibung der räumlichen Struktur der atmosphärischen Turbulenzen, verwendet das Kolmogorov-Modell auch eine Zeitskala (oder atmosphärische Zeitkonstante) τ_0 , welche in guter Näherung die Zeit angibt, in

der die Atmosphäre als statisch angenommen werden kann. Der Kehrwert der Zeitskala entspricht der sogenannten *Greenwood-Frequenz* (Campbell 2009)

$$\frac{1}{\tau_0} = f_G = 2,31\lambda^{-\frac{6}{5}} \left[\sec(z) \int C_n^2(h) v_W^{\frac{5}{3}}(h) dh \right]^{\frac{3}{5}}. \quad (2.12)$$

Dabei ist v_W die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe h . Zusammen mit einer konstanten Windgeschwindigkeit v_W folgt für die Zeitkonstante

$$\tau_0 = 0,3 \frac{r_0}{v_W}. \quad (2.13)$$

Die beiden Größen r_0 und τ_0 ergeben zwei fundamentale Regelparameter zur Beschreibung einer Adaptiven Optik (Glindemann et al. 1999). Bei einem Seeing von einer Bogensekunde und einer Wellenlänge von $\lambda = 500 \text{ nm}$ erhält man ein r_0 von etwa 10 cm. Darüber hinaus entspricht das, mit Gleichung (2.13) und einer typischen Windgeschwindigkeit von $v_W = 10 \text{ ms}^{-1}$, einem τ_0 von 3 ms. Das würde für das eingangs erwähnte Keck-Teleskop mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 10 m eine Adaptive Optik mit Mindestanforderungen von $(10m/r_0)^2 = 10000$ Unterteilungen in Korrektur-elementen und einer Korrekturfrequenz von $f_G = 1/\tau_0 = 333 \text{ Hz}$ ergeben. Bei Beobachtungen im infraroten Licht ergibt sich bei einer längeren Wellenlänge von $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ ein Fried-Parameter von etwa $r_0 = 50 \text{ cm}$. Für das Keck-Teleskop, das auch im infraroten Bereich arbeitet, würde das erneut eine Adaptive Optik mit den Eckdaten: 400 Unterteilungen und einer Korrekturfrequenz von etwa 70 Hz (vgl. Glindemann et al. 1999) bedeuten. Im Kapitel *Deformierbare Spiegel* wird das Thema der Wellenfrontkorrektur genauer beschrieben.

2.2.4 Zernike-Polynome

Zur mathematischen Beschreibung der gestörten optischen Wellen dienen die sogenannten *Zernike-Polynome*. Im Bereich der Adaptiven Optik sind die von *Robert J. Noll* 1976 berechneten orthogonalen Zernike-Polynome am gebräuchlichsten. Diese sind definiert als:

$$Z_j(r) = \sqrt{n+1} R_n^0(r) \quad m = 0 \quad (2.14)$$

$$Z_j(r) = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos(m\theta) \quad m \neq 0, j \text{ gerade} \quad (2.15)$$

$$Z_j(r) = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin(m\theta) \quad m \neq 0, j \text{ ungerade} \quad (2.16)$$

mit

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^S (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} \cdot r^{n-2s} \quad (2.17)$$

wobei n der radialen Ordnung und m der azimuthalen Ordnung entspricht, die beide positive ganze Zahlen sind (Cheng 2009, S.245). Mit dem Zusammenhang der Indizes:

$$j = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (2.18)$$

lassen sich die Polynome auch als Funktionen $Z_n^m(r)$ auf dem Einheitskreis ($r < 1$) definieren, siehe Abbildung 7.

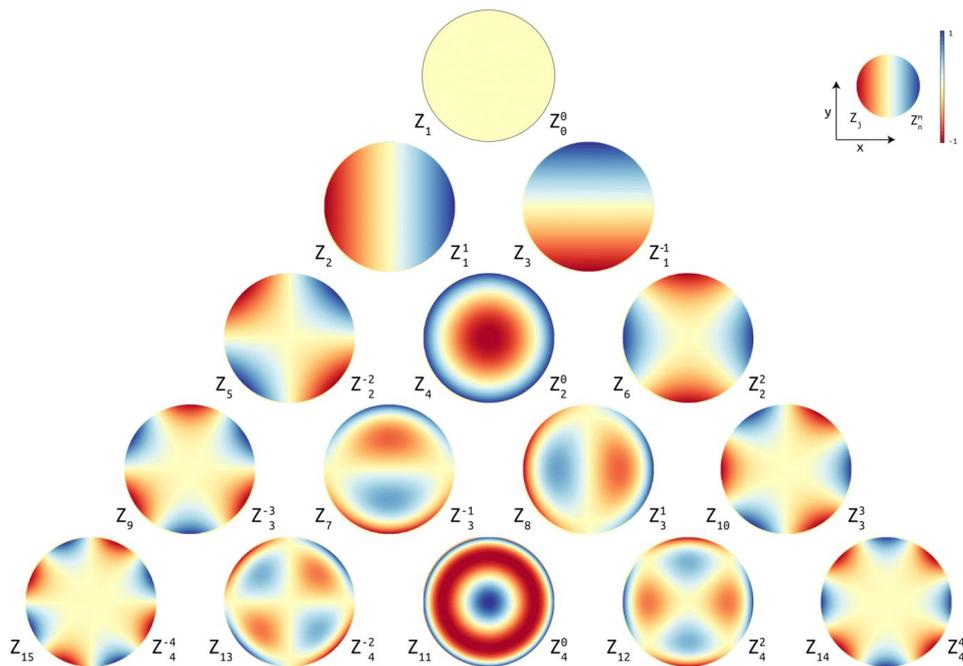


Abbildung 7: Darstellung der ersten 15 Zernike Polynome, dabei entspricht die vertikale Achse der radialen Ordnung und die horizontale Achse der azimuthalen Ordnung [Zernike Polynome, 2pem, CC BY-SA 3.0]

Dabei nimmt m nur Werte von 0 bis n an. Der von Null eingeführte einzelne Index j fasst die beiden Indizes n und m somit zusammen. Das Skalarprodukt der Zernike-Polynome lässt sich als Integral über die Teleskopapertur definieren:

$$(Z_i, Z_j) = \frac{1}{\pi} \int_{|\vec{r}| < 1} d\vec{r} Z_i(\vec{r}) Z_j(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j. \end{cases} \quad (2.19)$$

Damit sind die Polynome alle orthogonal zueinander und jedes Polynom repräsentiert eine bestimmte Mode. Um eine Aberration einer Wellenfront nun darzustellen zu können, müssen nur noch die entsprechenden Zernike-Moden aufaddiert werden. Die Phasenab-

erration $\phi(\vec{r})$ charakterisiert dabei schließlich die atmosphärische Störung:

$$\phi(\vec{r}) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(\vec{r}) \quad (2.20)$$

Somit lassen sich alle möglichen Phasenabberationen, die auf die Teleskopoptik treffen, als Summe der Zernike-Polynome darstellen. Durch die Addition von mehreren 10 bis 100 Moden lassen sich Wellenfronten darstellen, die mit Hilfe einer adaptiven Optik soweit korrigiert werden können, dass die Aufnahmen beugungsbegrenzte Auflösung erreichen (Hippler and Tokovinin 2008). Abbildung 7 bildet die ersten 15 Zernike Polynome ab. Einigen der ersten Zernike-Moden wurden Namen zugeordnet, die auf die Art des optischen Fehlers hinweisen, wie zum Beispiel Defokus (Z_4), Astigmatismus ($Z_{5,6}$) und Koma ($Z_{7,8}$).

Die Verwendung der Zernike-Polynome bietet sich zur Beschreibung der Wellenfrontstörung zwar an, ist jedoch nicht die einzige Möglichkeit. Die von Fried empfohlenen *Karhunen-Loeve-Funktionen* erreichen beispielsweise eine deutliche Verbesserung bei der Beschreibung der Wellenfront in höheren Moden, lassen sich allerdings nicht analytisch berechnen (Lane and Tallon 1992).

2.2.5 Isoplanatischer Winkel

Die Messung der durch Turbulenzen gestörten Wellenfront erfolgt über das Licht eines Referenzsterns, auch *Leitstern* genannt. Der Winkelabstand, bei dem das Licht des Leitsterns die wesentlich gleichen Luftunruhen durchquert, wie das des Beobachtungsobjekts, wird durch den isoplanatischen Winkel θ_0 beschrieben:

$$\theta_0 = 0,31 \frac{r_0}{H} \quad (2.21)$$

Dabei ist r_0 der Fried-Parameter und H die mittlere Höhe der Turbulenzschichten, welche üblicherweise in den Höhen 5 – 10 km liegen. Abbildung 8 stellt diesen Zusammenhang schematisch dar. Wird der Abstand zwischen den beiden Objekten größer als der isoplanatische Winkel, so unterscheiden sich die gestörten Wellenfronten der beiden Lichtquellen immer stärker und die Adaptive Optik korrigiert eine Wellenfront, die gar nicht der des wissenschaftlich zu untersuchenden Objekts entspricht. Deshalb definiert man den isoplanatischen Winkel auch als Winkel zum Referenzstern, unter welchem das Strehlverhältnisses um 50% abnimmt.

Durch diesen Effekt entsteht zwischen Referenzstern und dem Beobachtungsobjekt ein Kegel, der durch den Winkelabstand θ beschrieben wird und über dessen Bereich das Teleskop nicht in der Lage ist die atmosphärische Störung zu messen. Der Effekt dieser „fehlenden“ Daten wird aufgrund des charakteristischen Kegels als *cone-effect* oder

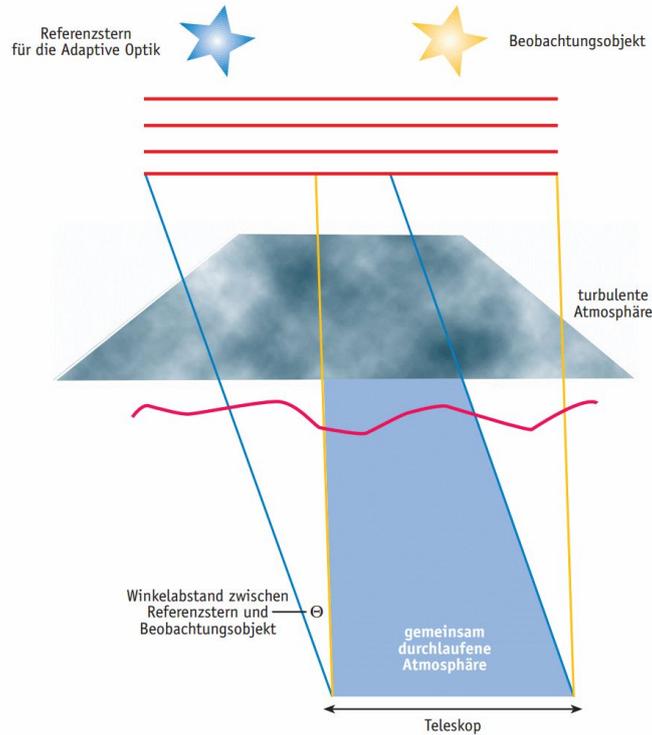


Abbildung 8: Schematische Darstellung des isoplanatischen Winkels [Hippler and Kasper 2004]

als *fokaler Anisoplanatismus* bezeichnet. Für mehrere Schichten von Turbulenzen in verschiedenen Höhen müssen die entsprechenden Brechungsindex-Strukturkonstanten $C_n^2(h)$ aufsummiert werden. Für den einfachen Fall von einer turbulenten Schicht in der Höhe h berechnet sich der isoplanatische Winkel wie folgt: $\theta_0 = r_0/h$. Somit erhält man Winkelabstände von $\theta_0 = 2''$ bei einem Fried-Parameter von $r_0 = 10$ cm in einer Höhe von $h = 10$ km. Erneut verbessern sich die Bedingungen für Beobachtungen im Infrarotbereich von $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ zu etwa $\theta_0 = 10''$. Angesichts dieser kleinen Abstände zu den Leitsternen und der Tatsache, dass diese eine Mindesthelligkeit von etwa 8 mag aufweisen sollten, um trotz Rauscheffekte gute Ergebnisse zu erzielen, lassen sich nicht besonders viele passende Konstellationen am Nachthimmel finden. Da diese Bedingungen nur durch den geringsten Teil des Himmels erfüllt werden, verschaffen sich moderne Teleskope mit der Verwendung von künstlichen Laserleitsternen Abhilfe.

2.3 Künstliche Laserleitsterne

Da sich die beschriebenen Luftunruhen sehr zügig verändern, muss der anvisierte Leitstern sehr hell sein, um Veränderung der Wellenfront ausreichend messen zu können. Wie

im Abschnitt 2.2.5 *Isoplanatischer Winkel* dargestellt, muss der Leitstern zusätzlich in der Nähe des eigentlichen Beobachtungsobjekts liegen, damit das Licht beider Objekte die gleichen Turbulenzen durchquert. Mit diesen beiden Bedingungen bleibt ein überraschend kleiner Anteil des Himmels übrig, welcher mit dem Adaptiven Optik-System beobachtet werden kann. In der Nähe der galaktischen Ebene begrenzen diese Einschränkungen den Anteil des Himmels auf wenige Prozent und in den Polregionen sogar bis auf unter ein Prozent (Hippler and Kasper 2004). Diese natürliche Bedingung schränkte den Anwendungsbereich der Adaptiven Optik natürlich deutlich ein, weshalb man sich seit Beginn des 21. Jahrhunderts durch künstlich erzeugte Sterne Abhilfe verschafft.

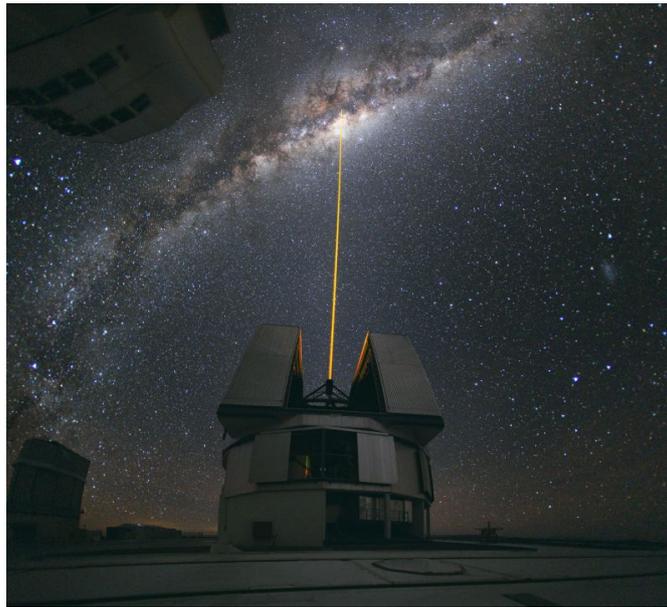


Abbildung 9: Der Laserstrahl des VLT Yepun Teleskops erzeugt in etwa 90 km Höhe einen künstlichen Laserleitstern [ESO: Y. Beletsky potw1036a]

Abbildung 9 zeigt die Verwendung eines künstlichen Laserleitsternes durch das VLT-Hauptteleskop Yepun. Der Laserstrahl leuchtet hier gelblich, da die Adaptive Optik des VLT einen Natriumlaser verwendet, welcher auf eine Wellenlänge von 589 nm auf die D_2 -Resonanzlinie eingestellt ist und somit in etwa 90 km Höhe durch die Natriumatome der Mesosphäre zurückgestreut wird. Neben dem Natriumlaser werden auch Rayleigh-Laserleitsterne verwendet, deren Strahlung im sichtbaren oder nahen ultravioletten Licht an Molekülen und Aerosolen der unteren Atmosphäre durch Rayleigh-Streuung zurückgestreut werden. Die dadurch erreichte Höhe beträgt etwa 30 km (Hickson 2008). Mit dieser Art von Technik ist es folglich möglich die Abdeckung des Himmels durch die Adaptive Optik immens zu vergrößern.

2.4 Wellenfrontsensoren

Einen weiteren wesentlichen Bestandteil der Adaptiven Optik stellt der sogenannte Wellenfrontsensor dar. Mit Hilfe dieser speziellen Sensoren ist es möglich Störungen einer Wellenfront zu analysieren. Die Analyse der Wellenfront ist eine elementare Funktion der adaptiven Optik, da somit jede Störung in der Wellenfront durch einer Änderung in dem adaptierenden Element zu einer korrigierten Wellenfront führt. Der Ausgleich der atmosphärischen Schwankungen wird meist durch das Verformen eines Spiegels realisiert. Um die optische Störung einer Welle zu messen, existieren verschiedene Verfahren, wie der *Shack-Hartman*-, der *Krümmungs*- und der *Pyramidensensor*. Neben der Funktionsweise der verschiedenen Sensoren soll in diesem Kapitel außerdem die Physik der Wellenfronten erläutert werden.

2.4.1 Physikalische Betrachtung der Wellenfront

Als Wellenfront, bzw. Phasenfront, bezeichnet man im Allgemeinen eine zusammenhängende Fläche, auf der alle Punkte einer Welle die gleiche Phase und den gleichen Abstand von der elektromagnetischen Quelle haben. Die Art der Ausbreitung der Wellenfront hängt dabei von der räumlichen Struktur der Quelle ab. Im für diese Arbeit interessanten Fall spielen dabei hauptsächlich Punktquellen eine Rolle, da astronomische Objekte aufgrund ihrer großen Entfernung, in guter Näherung, als diese angenommen werden können. Damit ist die von der Strahlungsquelle ausgesandte Wellenfront kugelförmig. Wie in Abbildung 10 abgebildet, ist die Wellenfront stets senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle orientiert. Vergleicht man den Abstand der astronomischen Objekte mit der Abmessung der Teleskopöffnung wird schnell deutlich, dass sich die weitere Annahme, die einfallenden Wellenfronten seien plan, als sinnvoll erweist.

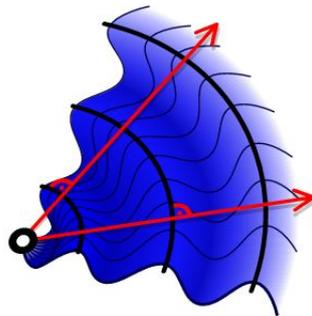


Abbildung 10: Ausbreitung der Wellenfront einer Punktquelle [Wellenfront, Expes, CC BY-SA 3.0]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle hängt mit $c = c_0/n$ vom Brechungsindex des jeweiligen Mediums ab. Die, im Kapitel 2.2 *Unsere Atmosphäre*

beschriebenen, atmosphärischen Turbulenzen führen schließlich zu Fluktuationen im Brechungsindex des Mediums, in dem sich die Strahlung ausbreitet. Gemäß Gleichung (2.2) ändert sich die Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Strahlung und führt somit zu einer gestörten Wellenfront. Damit die Störung der Wellenfront durch die Adaptive Optik kompensiert werden kann, muss ein Wellenfrontsensor die Störungen im Millisekundenbereich und mit räumlicher Auflösung passend zur Größe der Korrekturlemente auslesen können (Tokovinin 2001).

2.4.2 Shack-Hartmann-Sensor

Der Shack-Hartmann-Sensor ist ein wichtiger und häufig eingesetzter Wellenfrontsensor in der Adaptiven Optik. Wie in Abbildung 11 schematisch dargestellt, besteht der Sensor aus einem Linsenraster und einer CCD-Kamera. Ursprünglich wurde der Sensor vom deutschen Astronom Johannes Hartmann als Löcher-Maske verwendet, um die optischen Eigenschaften einer Linse zu vermessen. Erst später ersetzte Ronald Shack die Löcher durch kleine Linsen, wodurch die Beugungseffekte der Löcher reduziert und die gesammelte Menge an Licht verbessert wurde und schließlich eine einfallende Wellenfront ein Gitter von Punktbilder erzeugte (Tyson 2010, S.147).

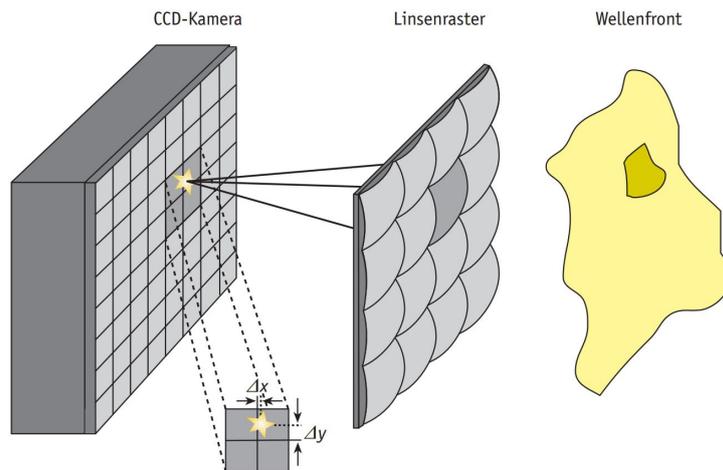


Abbildung 11: Der Shack-Hartmann-Sensor bildet eine Störung der Wellenfront in einem, vom Referenzpunkt abweichenden, durch ein Linsenraster gebündelten Punkt, ab [Hippler and Kasper 2004]

Die Unterteilung der Apertur in sogenannte Subaperturen macht es möglich, die lokale Verkippung der Wellenfront in der Größenordnung der Subaperturen aufzulösen. Alle Mikrolinsen haben die gleiche Fokallänge und erzeugen auf den, typischerweise 8×8 Pixel großen CCD-Chips, ein Punktbild, welches aufgrund der Neigung der Wellenfront

von einem Referenzwert abweichen kann. Die Referenzwerte liegen jeweils genau in der Mitte unter den Mikrolinsen, was den Zustand einer perfekt ebenen Welle beschreibt. Die räumlichen Abweichungen von den Referenzwerten (hier als Δx und Δy bezeichnet) werden durch eine zweidimensionale Matrix repräsentiert und geben Auskunft über den lokalen Gradienten der Wellenfront. Anhand dieser Daten und unter Verwendung der *Zernike-Polynome* kann die Wellenfrontstörung rekonstruiert und schließlich durch die Verformung eines Spiegels kompensiert werden.

2.4.3 Krümmungssensor

Der Krümmungssensor (engl. *Curvature Sensor*) wurde 1988 von F. Roddier entwickelt und kam 1996 mit dem Adaptiven Optik System des *3,6m Canada-France-Hawaii Telescops* erstmals zum Einsatz. Gleichwohl der Krümmungssensor durch seine ausgeprägte Leistungsfähigkeit besticht, hält sich seine Verbreitung aufgrund seiner anspruchsvollen Technik in Grenzen (Glindemann et al. 1999). Ähnlich wie der Shack-Hartmann-Sensor besteht auch der Krümmungssensor aus einer Anordnung von vielen Subaperturen. Im Gegensatz zum Shack-Hartmann-Sensor messen beim Krümmungssensor die Subaperturen die lokalen Wellenfrontstörungen jedoch nicht durch Abbildung des Lichtes auf einen CCD-Chip, sondern durch die Messung der Intensitätsverteilungen in zwei Ebenen, einmal vor und einmal nach dem Fokus. Die Wellenfront erzeugt in den beiden Ebenen defokussierte Bilder mit unterschiedlichen Intensitätsverteilungen. Die Differenz der beiden Bilder der Ebenen I_1 und I_2 in Abbildung 12 ergibt schließlich ein Maß für die lokale Krümmung der Wellenfront.

Der große Vorteil des Krümmungssensors ist die mögliche Verwendung von sogenannten APDs (Avalanche Photo Diodes) als Lichtdetektor. Diese Art der Photodioden ist hochempfindlich, besonders schnell und erzeugt kein Ausleserauschen (Hippler and Kasper 2004). Durch eine Quanteneffizienz von etwa 60% und der Fähigkeit, sogar einzelne Photonen messen zu können bieten die APDs eine besonders wichtige Alternative im Bereich der Lichtdetektoren, die letztlich sogar eine verbesserte Himmelsabdeckung ermöglicht (Tokovinin 2001).

2.4.4 Pyramidensensor

Die aktuellste Entwicklung im Bereich der Wellenfrontsensoren stellt der Pyramidensensor dar, welcher 1995 von dem italienischen Astronom Roberto Ragazzoni eingeführt wurde (Ragazzoni 1996). Der Pyramidensensor ist dem Shack-Hartmann-Sensor in seiner Funktionsweise sehr ähnlich. Anstatt einer Anordnung von kleinen Linsen verwendet man beim Pyramidensensor eine Anordnung von kleinen pyramidenförmigen Prismen in der Bildebene des Teleskops (Tyson 2010, S.151). Fällt ein Lichtstrahl auf die quadratische Pyramide, wird er in vier Teilstrahlen zerlegt, welche dann an jeweils vier verschiedenen

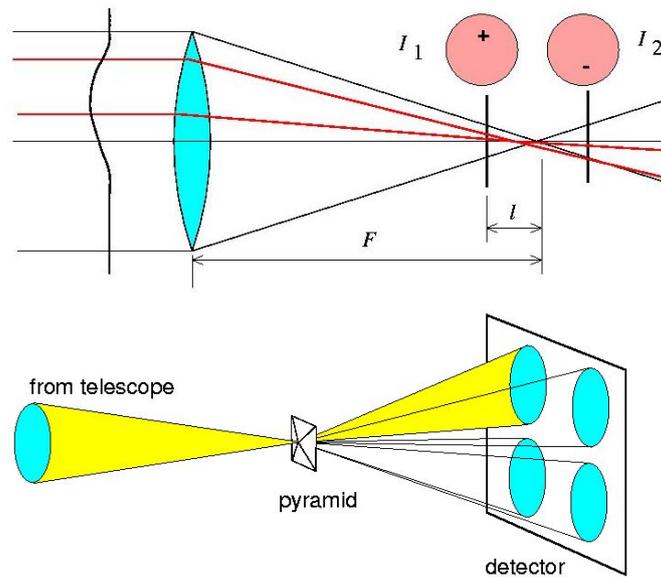


Abbildung 12: Darstellung der Messprinzipien des Krümmungssensors (oben) und des Pyramidensensors (unten) [Tokovinin 2001]

Stellen auf dem Detektor registriert werden. Anhand der dadurch erzeugten Intensitätsverteilungen auf dem Detektor lässt sich schließlich wieder die Störung der Wellenfront rekonstruieren. Bei einem perfekt störungsfreien Bild fällt der Lichtstrahl exakt symmetrisch auf das Zentrum der Pyramide und beleuchtet damit alle vier Flächen gleich stark. Damit entstehen vier Teilbilder mit entsprechend gleicher Intensitätsverteilung. Trifft eine gestörte Wellenfront auf die Pyramide, so wird eine der vier Flächen stärker beleuchtet als die anderen, wodurch ein davon abhängiges Intensitätsmuster in den vier Teilbildern entsteht. Ein wesentlicher Vorteil des Pyramidensensors gegenüber dem Shack-Hartmann-Sensor ist die verbesserte räumliche Auflösung. Während beim Shack-Hartmann-Sensor die Größe und Anzahl der Subaperturen die Auflösung limitiert, begrenzt beim Pyramidensensor die Größe der Detektorpixel die Auflösung (Tyson 2010, S.151). Sowohl die Prinzipien des Shack-Hartmann- und des Pyramidensensors als auch deren Empfindlichkeiten werden in einer *Animation des Osservatorio Astronomico di Padova*¹ besonders einleuchtend gegenübergestellt.

2.5 Deformierbare Spiegel

Nachdem die Entstehung und der Messung der gestörten Wellenfronten erläutert wurde, gilt es nun einen weiteren elementaren Bestandteil der Adaptiven Optik, die deformierbaren Spiegel (auch Wellenfrontkorrektoren genannt) zu untersuchen. Um aus einer

¹<https://www.youtube.com/watch?v=qXqkbPZZdcs>

gestörten Wellenfront eine korrigierte Wellenfront zu erhalten und somit ein verwaschenes Bild wieder scharf sehen zu können, gibt es verschiedene Ansätze. Eine sogenannte *low-order* Adaptive Optik korrigiert beispielsweise nur die Bildbewegung (Verkipfung der Wellenfront) und den Fokus (Hippler and Tokovinin 2008). Segmentierte Spiegel, mit mehr als 10 000 Segmenten und jeweils drei Freiheitsgraden, können zwar kostengünstig produziert werden, erfahren durch die Lücken zwischen den Segmenten jedoch Energieverluste, welche die Spiegel in ihrer Leistungsfähigkeit einschränken (Tyson 2010, S.181). Ein deformierbarer Spiegel mit vielen unabhängigen Aktuatoren hingegen bietet die Möglichkeit, viele Wellenfrontstörungen mit hoher Geschwindigkeit auszugleichen. Dabei verbiegen die Bewegungen der Aktuatoren eine kontinuierliche Spiegeloberfläche auf eine Art und Weise, die quasi der Invertierung der gemessenen Wellenfrontstörung entspricht und somit die Aberration ausgleicht. Um schließlich eine möglichst ebene Wellenfront zu erhalten, muss die Anzahl der Korrekturlemente etwa dem räumlichen Abtastraster des Wellenfrontsensors und der Abstand zwischen den Korrekturlementen etwa dem Fried-Parameter (siehe Gleichung (2.6)) entsprechen. Damit das System den atmosphärischen Schwankungen ausreichend schnell folgen und diese kompensieren kann, müssen sich die Aktuatoren in Intervallen von etwa $\tau_0/10$ (siehe atmosphärische Zeitkonstante aus Gleichung (2.13)) neu ausrichten können. Neben den erwähnten low-order Adaptiven Optiken werden in modernen Großteleskopen meist zusätzliche deformierbare Spiegel eingesetzt. Nach welchen Prinzipien die deformierbaren Spiegel arbeiten und welche Eigenschaften diese aufweisen, soll in diesem Kapitel erläutert werden.

2.5.1 Spiegel mit piezoelektrischen Aktuatoren

Eine Möglichkeit zur Realisierung eines deformierbaren Spiegels stellt die Verwendung der sogenannten *Piezo-Stack-Aktuatoren* dar. Piezo-Stack-Aktuatoren sind aneinander gereihte Piezo-Aktuatoren, die durch das Anlegen einer Spannung ihre Länge und damit den Aktuatorhub ändern. Durch das Befestigen der Aktuatoren zwischen einer massiven Platte und einem deformierbaren Glasspiegel, lässt sich die lokale Verbiegung des Spiegels präzise beeinflussen. Wie in Abbildung 13 dargestellt, sorgt die Verwendung von vielen nebeneinander angebrachten Aktuatoren für eine flächendeckende kontrollierbare Spiegelverbiegung.

Um mit diesem Prinzip die gestörten Wellenfronten wieder „geradezubiegen“, müssen die Aktuatoren einen Hub von einigen Mikrometern und eine Ansprechzeit von etwa $100 \mu\text{s}$ erreichen (Hippler and Kasper 2004). Die Ansprechzeit beschreibt die Zeit zwischen dem Anlegen einer Spannung und dem Ende der Ausdehnungs- bzw. Kontraktionsphase. Durch geschickt gewählte Materialkombinationen lassen sich Aktuatoren realisieren, die diesen Anforderungen gerecht werden und dabei eine räumliche Ausdehnungen von einigen Millimetern aufweisen. Damit lassen sich die Aktuatoren in typischen Abständen von $5 - 7 \text{ mm}$ aneinander reihen. Folglich lassen sich an einem kreisförmigen Spiegel von

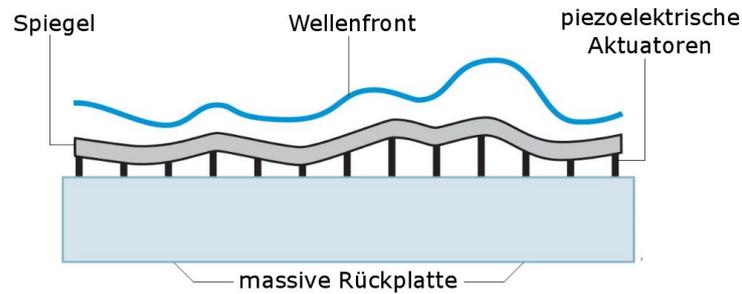


Abbildung 13: Funktionsprinzip des Piezoelektrischen Spiegel [Hippler and Kasper 2004]

30 cm Durchmesser etwa 1000 Aktuatoren anbringen (Hippler and Kasper 2004). Der Piezoelektrische Spiegel wird typischerweise in Kombination mit dem Shack-Hartmann-Sensor verwendet.

2.5.2 Bimorphe Spiegel

Der bimorphe Spiegel besteht aus zwei Lagen Piezoelektrischer Keramik, deren Oberseite über eine kontinuierliche Elektrode mit einer dünnen Glas- oder Metallplatte verbunden ist. Die Unterseite wird mit einer Anzahl unabhängiger Steuerelektroden versehen, welche einzeln angesteuert zu der gewünschten Verbiegung des Spiegels führen (siehe Abbildung 14).

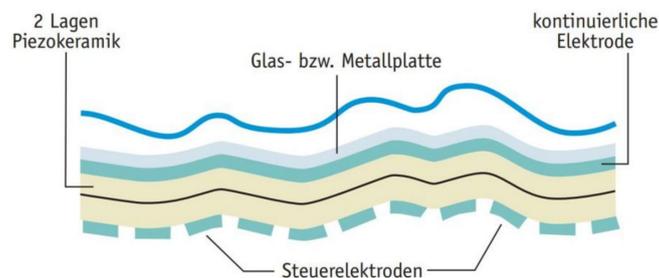


Abbildung 14: Funktionsprinzip des bimorphen Spiegels [Hippler and Kasper 2004]

Diese Art des deformierbaren Spiegels eignet sich aufgrund der geringen räumlichen Auflösung nur für den Ausgleich niedriger Ordnungen. Um die Auflösung zu erhöhen, müsste man den Spiegeldurchmesser verkleinern. Der minimale Durchmesser hängt jedoch von der notwendigen minimalen Dicke ab, welche bei der Herstellung benötigt wird (Hippler and Kasper 2004). Darum befinden sich bisher nur bimorphe Spiegel mit vergleichsweise wenig Aktuatoren im Einsatz. Beispielsweise wurde das 8,2m Subaru-Teleskop mit einem Bimorphen Spiegel aus 36 Elementen und drei konzentrischen Rinnelektroden ausgestattet (Tyson 2010, S.190). Da der Krümmungsradius des bimorphen

Spiegels proportional zur angelegten Spannung ist, wird diese Art Spiegel auch *Krümmungsspiegel* genannt (Tokovinin 2001). Der bimorphe Spiegel wird aufgrund ähnlicher Proportionalitäten (zur gemessenen und erzeugten Krümmung) und Randbedingungen oft zusammen mit dem Krümmungssensor eingesetzt (Hippler and Tokovinin 2008).

2.5.3 MOEMS-Spiegel

Eine weitere, vielversprechende Art der deformierbaren Spiegel sind die sogenannten *MOEMS-* oder *MEMS-Spiegel*. MOEMS steht dabei für „*micro optical electro mechanical systems*“ und meint ein elektromechanisches System welches, bestehend aus Siliziumchips, von der Halbleiter Industrie gefertigt wird und momentan einer rasanten Entwicklung unterliegt (Hickson 2008). Durch die Verwendung der herkömmlichen Produktionstechniken für Siliziumchips sind die MOEMS die ersten in Massen produzierbaren Komponenten der Adaptiven Optik, wodurch der Kostenfaktor deutlich geringer wird. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die extrem kleine räumliche Ausdehnung der Aktuatoren und die damit verbundene Möglichkeit eine große Dichte an Aktuatoren realisieren zu können.

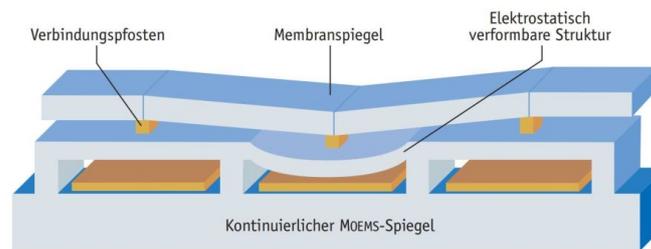


Abbildung 15: Funktionsprinzip des MOEMS Spiegel [Hippler and Kasper 2004]

Wie in Abbildung 15 dargestellt, bestehen die MOEMS Spiegel aus einer Maske von Elektroden, die einzeln angesteuert werden können. Durch die elektrostatischen Kräfte führen diese Ansteuerungen zu Verformungen des Spiegels. Befestigt man nun an einer Seite eine beschichtete dünne Glasplatte und gestaltet die Gegenseite als unbeweglich, so erhält man einen deformierbaren Spiegel, dessen Aktuatoren Abstände etwa $100\ \mu\text{m}$ betragen und somit eine erstaunlich hohe räumliche Auflösung ermöglicht (Hippler and Kasper 2004). Sogar die anfängliche Einschränkung des zu geringen Korrektorschubs wurde bewältigt, sodass MOEMS- deformierbare Spiegel bereits zum Einsatz gekommen sind. Der *Gemini Planet Imager (GPI)* verwendet einen MOEMS-Spiegel mit 2000 Aktuatoren und ist seit 2013 Teil des *8,1 m Gemini South Telescope* in Chile (Macintosh, Graham, Palmer, et al. 2006). Auch für das *Thirty Meter Telescope* sind Projekte mit MOEMS-deformierbaren Spiegeln mit bis zu 15000 Aktuatoren in Planung (Wallace et al. 2006).

2.5.4 Adaptive Sekundärspiegel

Alle bisher beschriebenen Prinzipien der deformierbaren Spiegel basieren darauf, mindestens einen weiteren Spiegel in den Lauf des vom Teleskop gesammelten Lichts zu bringen. Durch die Verwendung zusätzlicher reflektierender Flächen im Strahlengang des Lichts reduziert sich die Transmission des Gesamtsystems und weitere thermische Störquellen kommen hinzu (Hippler and Tokovinin 2008).



(a) Nahaufnahme der Aktuatoren

(b) Die Halterung des Spiegels mit 1170 Öffnungen für die Aktuatoren bei der Inspektion

Abbildung 16: Adaptive Sekundär Spiegel des VLT [ESO: arsenault_fig5b, VLT_ASM]

Um weitere mögliche Störfaktoren zu vermeiden, bedient man sich eines Konzepts, welches den Sekundärspiegel des Teleskops durch einen adaptiven Sekundärspiegel ersetzt. Die Realisierung des Konzepts beruht auf der Verwendung von magnetischen Aktuatoren (siehe Abbildung 16 (a)), auch *voice coils* oder *Schwingspulen* genannt, deren Position durch kapazitive Abstandssensoren in einer Regelschleife ständig kontrolliert wird. Abbildung 16 (b) zeigt den Aufbau der Grundplatte für den 112 cm großen Sekundärspiegel des VLT. Durch jede der 1170 Öffnungen wird später ein Aktuator zur Gesamtverformung des dünnen Spiegels beitragen (R. Arsenault et al. 2013). Der erste adaptive Sekundärspiegel dieser Art wurde am Arcetri-Observatorium in Florenz entwickelt und kam im Jahre 2002 am *Multiple Mirror Telescope* in Arizona mit 336 Aktuatoren und einem Korrektorhub von etwa 100 Mikrometern zum Einsatz (Hippler and Tokovinin 2008). Nachdem schließlich auch im Jahre 2010 die beiden 91 cm großen Sekundärspiegel des *Large Binocular Telescopes* mit 672 Aktuatoren zu adaptiven Sekundärspiegeln umgerüstet wurden und deren Funktionsweise sich als erfolgreich erwies, rückten immer mehr Großteleskope in den Fokus der Adaptiven Optik basierend auf dem Prinzip der adaptiven Sekundärspiegel (Jäger and Herbst 2010).

Zu beachten sind bei den deformierbaren Sekundärspiegeln jedoch folgende Nachteile: Die Aktuatoren erreichen erst nach mehr als einer Millisekunde ihre gewünschte Position

und erzeugen auf der Glasplatte unerwünschte Resonanzphänomene, die durch intelligente Kontrollmechanismen unterdrückt werden müssen (Hippler and Kasper 2004).

2.6 Kontrollmechanismus

Um die Funktionsweise der Adaptiven Optik vollständig beschreiben zu können, fehlt neben den bereits eingeführten Wellenfrontsensoren und Wellenfrontkorrektoren ein letzter elementarer Bestandteil, der wesentlich zur Funktionsweise beiträgt, jedoch bei der ersten Betrachtung nicht direkt auffällt: ein Computer mit einem entsprechend angepassten Programm, welches die gemessenen optischen Störungen in Echtzeit verarbeitet und die dazu passenden Signale für den deformierbaren Spiegel generiert. Als Bindeglied zwischen Analyse und Korrektur spielt der Kontrollmechanismus somit eine bedeutende Rolle.

In der Regelungstechnik unterscheidet man im wesentlichen zwischen zwei Arten der Regelung: dem *open-* und dem *closed-loop* (dt. *offener* und *geschlossener Regelkreis*). Die Steuerung eines Systems im open-loop erzeugt anhand eines Input-Werts lediglich einen bestimmten Output-Wert. Bevor das eingegebene Signal an das zu steuernde System zurückgegeben wird, wird es meist auf irgendeine Art und Weise verändert, oder einfach verstärkt. Nach diesem Prinzip arbeiten beispielsweise einerseits Spannungsverstärker, andererseits aber auch Teleskope, die ein bestimmtes Objekt fokussieren und dabei der Erdrotation folgen. Im Unterschied dazu reagiert ein closed-loop System, neben dem bloßen Eingangssignal, zusätzlich auf ein Rückkopplungs- beziehungsweise Feedback-Signal des Systems. Ein Beispiel für ein closed-loop-System ist die Temperaturregelung im menschlichen Körper. Entgegen allen äußeren Einwirkungen hält der Körper die Temperatur konstant auf etwa 37°C. Entscheidend dafür ist das fortwährende Überwachen und Halten der Temperatur.

Im Rahmen der Adaptiven Optik unterscheiden sich die beiden System dadurch, dass beim open-loop System die Störung des einfallenden Lichts erst vom Wellenfrontsensor gemessen und anschließend durch den deformierbaren Spiegel korrigiert wird. In diesem Fall erzeugt der Computer ein zum Eingangssignal entsprechendes Ausgangssignal und berücksichtigt dabei nicht, inwieweit die Korrektur dem gewünschten Signal entspricht. Eine Überwachung der Korrektur wird hingegen im closed-loop-System realisiert. Hierbei trifft das einfallende Licht zuerst auf den deformierbaren Spiegel und wird anschließend im Wellenfrontsensor vermessen. Das dadurch entstehende Signal beinhaltet nun immer auch die eigens berechnete Korrektur und erzielt aufgrund dieser Feedbackschleife üblicherweise ein besseres Korrekturverhalten als ein open-loop-System. Darüber hinaus werden Fehler wie Hysterese des Spiegels (also das verzögerte Erreichen der gewünschten Endposition) und statische Aberration automatisch mit der atmosphärischen Störung zusammen ausgeglichen. Aufgrund dieser Vorteile werden in der Praxis hauptsächlich closed-loop-Systeme verwendet. Zu Beginn misst der Wellenfrontsensor die lo-

kalen Störungen des einfallenden Lichts. Der Computer beschreibt die Störung mit Hilfe der Zernike-Polynome und berechnet daraus eine sogenannte *Interaktionsmatrix*. Grob gesagt ergibt sich aus der Invertierung dieser Matrix schließlich die benötigte Spiegelstellung (Hippler and Kasper 2004). Eine mathematische Betrachtung der Regelschleife ist durch das Adaptive Optik-Online-Tutorial² und eine detailliertere Beschreibung der *Rekonstruktion und Kontrolle* durch Tyson 2010 ab S. 197 gegeben.

Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Echtzeitcomputer steigt mit der Anzahl der Subaperturen und beweglichen Elementen einer Adaptiven Optik rasant an. Dank der ebenfalls rasanten Entwicklung der Technologie im Rahmen des *Moore'schen Gesetzes* war die Rechenleistung nur zu Beginn der Adaptiven Optik ein limitierender Faktor (siehe Kapitel 3.1 *La Silla-Observatorium*). Die Rechenleistung, die zur Korrektur der Wellenfrontstörung am Giant Magellan Telescope unter der Verwendung eines deformierbaren Spiegels mit 4620 Aktuatoren, sechs Laser Leitsternen, deren Licht von sechs Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren vermessen wird, die ihrerseits aus jeweils 1500 Subaperturen bestehen, würde naiv berechnet eine Interaktionsmatrix mit 17032×4620 Elementen ergeben (Lloyd-Hart et al. 2006). Um dies berechnen zu können, müsste ein Computer ununterbrochen mindestens 100 GFlop ausführen können. Durch die konzeptuelle Aufteilung der Berechnung in hohe und tiefe Moden können diese Anforderungen jedoch etwa um einen Faktor sieben reduziert werden, sodass der Echtzeitcomputer eine anhaltende Berechnung von etwa 15 GFlop leisten muss (Lloyd-Hart et al. 2006). Was für die heutige Technologie keine besondere Herausforderung darstellt.

2.7 Weiterentwicklungen - Moderne Adaptive Optik-Systeme

Die bis zu diesem Kapitel beschriebenen Komponenten einer Adaptiven Optik bilden die grundlegendsten Bausteine eines klassischen Adaptiven Optik-Systems und ermöglichen somit eine vollständige Beschreibung der regulären Funktionsweise. Da die klassische Adaptive Optik jedoch unter einigen Einschränkungen, wie dem *cone-effect* (siehe Abschnitt 2.2.5 *Isoplanatischer Winkel*), der unvollständigen Beschreibung der atmosphärischen Turbulenzen durch einige wenige Moden und dem relativ kleinen Sichtfeld leidet, entwickelten Astronomen neue Systeme, die selbst mit diesen anspruchsvollen Problemen zurecht kommen sollten. Wie sich später zeigen wird, erreichen moderne erdgebundene Teleskope mit diesen weiterentwickelten Adaptive Optik-Systemen annähernd beugungsbegrenzte Auflösungen und übertreffen damit teils sogar die vom *Hubble Space Telescopes* aus dem All aufgenommenen Bilder (Brandner et al. 2002).

²http://www.mpia.de/homes/hippler/AOonline/ao_online_inhalt.html

2.7.1 Multi-Conjugate Adaptive Optics (MCAO)

Das Prinzip der *Multi-Conjugate Adaptive Optics* basiert auf der Beobachtung von mehreren künstlichen oder natürlichen Referenzsternen und der gleichzeitigen Verwendung von mehreren dazugehörigen Wellenfrontsensoren und deformierbaren Spiegeln. Entsprechend Abbildung 17 (a) werden mehrere Referenzsterne in der näheren Umgebung des wissenschaftlichen Objekts am Himmel ausgewählt, durch deren einfallendes Licht die entsprechenden Wellenfrontsensoren die optischen Störungen der unterschiedlichen atmosphärischen Schichten erfassen können. Die Einbringung mehrerer deformierbarer Spiegel in den Strahlengang des Teleskops ermöglicht schließlich die Korrektur der unterschiedlichen Schichten. Dabei wird mindestens ein deformierbarer Spiegel auf die bodennahen Schichten, und ein oder mehrere Wellenfront-Spiegel Paare auf höher liegende Schichten ausgerichtet. Diese ausgeklügelte Vermessung mehrerer Luftschichten liefert vergleichsweise hohe Strehlzahlen über ein deutlich größeres Sichtfeld als die Verwendung von nur einem Referenzstern (welche diesbezüglich auch als *SCAO* für *Single-Conjugate Adaptive Optics* bezeichnet wird). Somit werden durch verschiedene Konstellationen von mehreren künstlichen Laserleitsternen konstante Strehlzahlen von bis zu 60% über ein Sichtfeld von $1,5'$ erreicht (Femenia and Devaney 2003). Das beschriebene Problem des Anisoplanatismus wird durch die Vergrößerung des Sichtfelds schließlich immer kleiner.

Die Verarbeitung der Signale verschiedener Wellenfrontsensoren ermöglicht eine Orientierung der Korrekturen durch unterschiedliche Ansteuerung der Spiegel. Durch eine Stern-orientierte MCAO wird die lokale Störung in Bezug auf jeden einzelnen Referenzstern korrigiert, wodurch gute Verbesserungen in der Nähe der Referenzsterne ermöglicht wird, jedoch kein homogen korrigiertes Sichtfeld. Hierbei muss die Anzahl der Wellenfrontsensoren der Anzahl der Referenzsterne entsprechen, was zu sehr anspruchsvollen optischen Installationen führen kann. Im Gegenzug dazu konzentriert sich bei der Schichten-orientierten MCAO jeder Wellenfrontsensor auf eine bestimmte atmosphärische Schicht. Dies ermöglicht homogenere Strehlzahlen über ein breiteres Sichtfeld. Ähnlich wie die Stern orientierten MCAO arbeitet auch die *Laser-Tomography Adaptive Optik (LTAO)*. In einem schmaleren Sichtfeld werden mehrere künstliche Laserleitsterne verwendet, um die verschiedenen Schichten der Atmosphäre untersuchen zu können. Dabei werden die optischen Störungen entlang der Achse des wissenschaftlichen Objekts korrigiert, um somit hohe Strehlzahlen für ein enges Sichtfeld zu erhalten (Carpentier 2011). Diese Variation der MCAO verhält sich ähnlich zur SCAO, mit dem Unterschied, dass kein heller natürlicher Referenzstern vonnöten ist. Durch dieses tomografische Verfahren lassen sich dreidimensionale Wellenfrontanalysen erstellen, welche durch Matrixmultiplikation rekonstruiert und durch deformierbare Spiegel korrigiert werden können.

Die erfolgreiche Verwendung der MCAO an Teleskopen wie dem *Large Binocular Telescope*, dem *Gemini South Telescope* und dem *VLT* ebnete den Weg für die Planung und Entwicklung von MCAOs für die nächste Generation von Großteleskopen wie dem

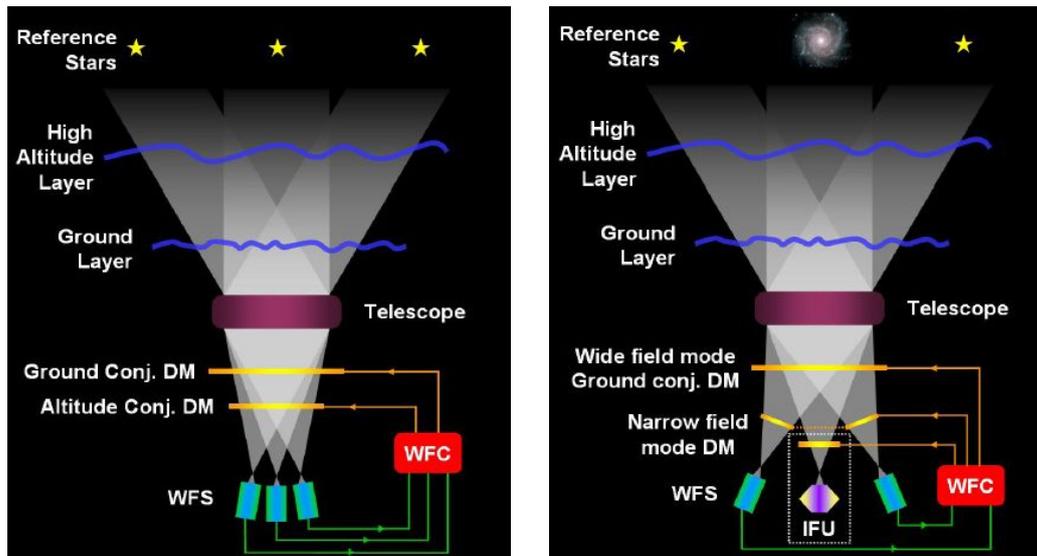
European-Extremely Large Telescope (E-ELT) (Femenia and Devaney 2003).

2.7.2 Ground Layer Adaptive Optics (GLAO)

Um über ein besonders großes Sichtfeld Verbesserungen hinsichtlich der optischen Störungen zu erlangen, verwendet die GLAO vergleichsweise weit auseinander liegende Referenzsterne. Da die Störungen der bodennahen Schichten die Beobachtung in alle Richtungen etwa gleich beeinflusst, wirkt sich deren Analyse und Korrektur besonders deutlich auf die Vergrößerung des isoplanatischen Winkels aus. Die Turbulenzen nahe der Teleskopöffnung werden von mehreren Wellenfrontsensoren gemessen und typischerweise von einem deformierbaren Spiegel korrigiert (Carpentier 2011). Die Messung wird über alle Wellenfrontsensoren gemittelt und in Form einer Interaktionsmatrix an den Korrekturspiegel weitergegeben. Diese Art der Adaptiven Optik ermöglicht eine deutliche Verbesserung des Seeing-Effekts und der dadurch entstehenden Verschmierung. Besonders effizient erweist sich die Technik bei besonders stark ausgeprägten bodennahen Turbulenzen. So erreicht das GLAO Modul *GRALL* des VLT eine Reduktion der Halbwertsbreite der Sterne und eine Verstärkung um den Faktor zwei bei der Konzentration der Energie der Beobachtungsobjekte im kompletten Sichtfeld von $7,5''$ im K-Band (Arsenault 2008). Weil jedoch nur die bodennahen und nicht die höheren atmosphärischen Schichten berücksichtigt werden, erreichen typische GLAO Systeme nur geringe Strehlzahlen von etwa 5% (Arsenault 2008). Um die positiven Effekte der GLAO dennoch sinnvoll nutzen zu können, werden in modernen Großteleskopen meist mehrere Konzepte verbunden, siehe Abbildung 17 (b).

2.7.3 Multi-Objects Adaptive Optics (MOAO)

Die MOAO ist ein sehr neues und wenig erforschtes Konzept. Hierbei wird versucht, nicht etwa wie bei der GLAO ein weites Sichtfeld, sondern nur die Regionen entlang des Lichts der eigentlichen wissenschaftlichen Objekte zu korrigieren. Dazu ist es nötig, jedem wissenschaftlichen Objekt auch einen deformierbaren Spiegel zuzuordnen. Um die Störungen der Wellenfronten berechnen zu können, müssen mehrere Leitsterne in der nächsten Umgebung der wissenschaftlichen Objekte identifiziert und deren Licht durch Wellenfrontsensoren gemessen werden. Anhand dieser Daten lässt sich anschließend das Korrektursignal für die entsprechenden deformierbaren Spiegel berechnen. Da nicht das Licht der Referenzsterne, sondern das der wissenschaftlichen Objekte korrigiert wird, arbeiten die MOAO Systeme im open-loop. Die Verwendung der Wellenfrontsensoren ohne deformierbaren Spiegel als open-loop-System, hat jedoch zur Folge, dass die Wellenfrontsensoren jederzeit die volle Amplitude der Turbulenzen messen und somit möglichst viele Subaperturen und einen großen dynamischen Bereich haben müssen. Durch die Einbringung von weiteren deformierbaren Spiegeln für jeden Wellenfrontsensor werden diese An-



(a) Bei der MCAO ist bestimmten atmosphärischen Schichten jeweils ein Wellenfrontsensor und ein deformierbarer Spiegel zugeordnet, sodass durch die Korrektur dieser Schichten ein vergleichsweise homogen korrigiertes, breites Sichtfeld entsteht

(b) Darstellung einer Kombination aus GLAO und MOAO. Die MOAO korrigiert die Wellenfronten mehrerer wissenschaftlichen Objekte durch die Verwendung von entsprechend viele Referenzsterne und deformierbare Spiegel

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Funktionsweisen von modernen Adaptive Optik Systemen. Dabei steht DM für *deformable mirror* (dt. deformierbarer Spiegel), WFS für *wavefrontsensor* (dt. Wellenfrontsensor) und IFU für *integral field unit*, was ein optisches Instrument darstellt, welches dreidimensionale Aufnahme der Atmosphäre anfertigt [ESO: AO-Modes]

forderungen vermindert und die Qualität der Korrektur steigt. Die Wellenfrontsensoren beobachten das gestörte Licht der Referenzsterne und arbeiten mit ihren entsprechenden deformierbaren Spiegeln im closed-loop. Da dem wissenschaftlichen Objekt kein Wellenfrontsensor zugeordnet ist, arbeitet dessen Korrekturspiegel weiterhin im open-loop. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem sogenannten *pseudo-closed-loop* im Bezug auf das gesamte System (ESO 2015).

Ähnliche Effekte lassen sich durch die Kombination von GLAO und MOAO, dargestellt in Abbildung 17, erreichen. Die von den Wellenfrontsensoren zu messende Amplitude der Turbulenzen wird durch den auf die bodennahen Schichten ausgerichteten deformierbaren Spiegel reduziert, sodass die Anforderungen an die Wellenfrontsensoren dadurch ebenfalls reduziert werden. Diese komplexe Realisierung einer Adaptiven Optik ermöglicht sowohl eine Korrektur der bodennahen Turbulenzen in einem ausgedehnten Sichtfeld, als auch den Ausgleich der höheren atmosphärischen Schwankungen höher gelegener Schichten in kleineren Regionen um bestimmte wissenschaftliche Objekte (ESO

2015).

Ein solches MOAO System befindet sich am 4,2 m *William Herschel Teleskop* auf der kanarischen Insel La Palma. Durch erfolgreiche Tests des sogenannten *CANARY* MOAO Systems im September 2010 wurde die Realisierbarkeit des Prinzips durch Messungen am Nachthimmel bestätigt, sodass der Umsetzung der MOAO für die nächste Generation von Teleskopen nichts mehr im Wege steht (Rousset et al. 2011). Das *CANARY* System arbeitet mit mehreren natürlichen und künstlichen Leitsternen. Drei Wellenfrontsensoren vermessen die Achsen ferneren Störungen durch die Beobachtung von natürlichen Leitsternen. Der sogenannte *Truth Sensor* ist ein vierter Wellenfrontsensor, welcher das Licht des Sterns entlang der Achse, hinter dem deformierbaren Spiegel im closed-loop, vermisst. Am *CANARY* System werden weiterhin Tests durchgeführt um die Leistungsfähigkeit der fortschrittlichen Technik zu untersuchen. Dennoch zeichnete sich bereits 2011 das Potential der Technik ab, indem das MOAO System in ersten Tests annähernd dieselbe Qualität erreichte wie das herkömmliche SCAO System (Gendron et al. 2011).

2.7.4 Extreme Adaptive Optics (XAO)

Das Ziel der *Extreme Adaptive Optics* ist es, auch hohe Ordnungen der Wellenfrontstörungen zu korrigieren und folglich Strehlzahlen in der Größenordnung von 90% zu erreichen. Voraussetzung dafür ist einerseits ein Wellenfrontsensor mit einer großen Anzahl von Subaperturen und andererseits ein deformierbarer Spiegel mit sehr vielen Aktuatoren. Entgegen der MCAO und GLAO zielt die XAO nicht auf die Korrektur über ein breites Sichtfeld ab, sondern auf eine extrem hohe Korrektur der Störungen nahe der optischen Achse. Da die Korrektur hoher Ordnungen einer hochauflösenden Wellenfrontanalyse bedarf, begrenzt sich der Einsatzbereich der XAO auf vergleichsweise helle Sterne, die eine ausreichende Anzahl von Photonen aussenden. Besonders effektiv erweist sich die Technik beim Aufspüren von Exoplaneten (Fusco, Sauvage, et al. 2014). Ähnlich wie bei der Sonnenbeobachtung kommen auch hier Koronographen zum Einsatz, die durch Abdunkeln der zentralen Helligkeit die Beobachtung von weniger hellen Objekten ermöglichen. Um die direkte Beobachtung von extrasolaren Planeten zu ermöglichen, muss die XAO beugungsbegrenzte Auflösung und Kontrastverhältnisse von über 10^6 zwischen Planet und Mutterstern erreichen (Carpentier 2011). Das sogenannte *High Contrast Imaging* wird unter anderem am Gemini South Telescope in Chile mit dem (GPI) und am VLT mit dem *Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch* (SPHERE) betrieben. Das SPHERE System erreichte in ersten Messungen am Nachthimmel eine eindrucksvolle Strehlzahl von 83%, bei einem Seeing von $0,7''$ im H-Band (Fusco, Sauvage, et al. 2014). Damit lassen sich bereits einige junge jupiterähnliche Gasriesen in großer Entfernung von deren Mutterstern beobachten (Carpentier 2011). Um mit dieser Technik und erdgebundenen Teleskopen Gesteinsplaneten in der habitablen Zone direkt beobachten zu können, muss jedoch weiterhin auf den Einsatz der nächsten Generationen von Großteleskopen

gewartet werden. Die Technik, die diesen Schritt letztlich ermöglichen soll, heißt *Exo-Planet Imaging Camera and Spectrograph (EPICS)* und soll schließlich als XAO-System das Schlüsselinstrument zum Abbilden und Erforschen von Exoplaneten am E-ELT werden. Einen wesentlichen Beitrag zur Lösung dieser Aufgabe stellen zwei deformierbare Spiegel: der 2,6 m M4 Spiegel mit etwa 6 300 Aktuatoren für niedrige Ordnungen und großem Aktuatorhub (SCAO) und der interne XAO-deformierbare Spiegel mit etwa 30 000 Aktuatoren zur Korrektur der höheren Ordnungen (Madec 2012).

2.8 Aktive Optik

Ähnlich der Adaptiven Optik kommt an Großteleskopen eine weitere Technik zum Einsatz, die ebenfalls auf dem Verformen von Spiegeln beruht. Dennoch unterscheiden sich die beiden Verfahren grundsätzlich. Ziel der aktiven Optik ist es die Spiegelkrümmung zu kompensieren, die durch unterschiedliche Kippzustände entsteht. Wenn ein Teleskop die Ausrichtung des Hauptspiegels gegenüber der Schwerkraft ändert, so wirken entsprechend unterschiedliche Kräfte, welche den Spiegel letztlich verbiegen. Um Gewicht zu sparen, werden die immer größeren Spiegel möglichst dünn gebaut. Dadurch verlieren sie jedoch ebenfalls an Steifigkeit und verbiegen sich unter ihrem eigenen Gewicht.

Im Gegensatz zur Adaptiven Optik gleicht die aktive Optik folglich unerwünschte Verformungen aus, um den Hauptspiegel des Teleskops in der gewünschten Ausgangsform zu halten. Die Korrekturen der aktiven Optik werden ebenfalls mit, unter dem Spiegel befindlichen Aktuatoren vorgenommen, finden jedoch auf sowohl größeren räumlichen als auch größeren zeitlichen Skalen (mit etwa 1 Hz) statt (Wilson 2007, S. 397). Wohingegen die Adaptive Optik auf sehr kleinen räumlichen als auch zeitlichen Skalen arbeitet. Entgegen der Adaptiven Optik wird die aktive Optik ausschließlich als Korrektur unter dem Primärspiegel eingesetzt.

Historisch betrachtet kam die aktive Optik 1989 am *New Technology Telescope* etwas früher zum Einsatz als die Adaptive Optik. Nach dem *Keck-I* Teleskop wurden auch die vier Teleskope des *VLT* und das *Large Binocular Telescope* mit einer aktiven Optik ausgestattet.

2.9 Kenngrößen der Adaptiven Optik

Um die Informationen aus diesem Kapitel zusammenzufassen, bietet Tabelle 1 einen Überblick zu den wichtigsten Kenngrößen der Adaptiven Optik. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen Anforderungen von im sichtbaren und im infraroten Licht arbeitenden Adaptiven Optik Systemen hervorgehoben.

Name	Beschreibung	Typische Werte
Fried-Parameter r_0	Maß für die Stärke der atmosphärischen Störungen. Repräsentiert die Kohärenzlänge der Turbulenzzellen.	Sichtbares Licht: $r_0 \approx 0,1 - 0,3$ m Infrarot: $r_0 \approx 0,3 - 1,5$ m
Atmosphärische Zeitkonstante τ_0	Gibt Zeit an, in welcher die Atmosphäre als statisch angenommen werden kann.	Sichtbares Licht: $\tau_0 \approx 1 - 10$ ms Infrarot: $\tau_0 \approx 10 - 45$ ms
Isoplanatischer Winkel θ_0	Winkelabstand zwischen zwei Objekten, deren Licht im wesentlichen die gleichen Luftunruhen durchquert.	Sichtbares Licht: $\theta_0 \approx 0,5 - 4$ '' Infrarot: $\theta_0 \approx 2 - 20$ ''
Brechungsindex-Strukturkonstante C_n^2	Beschreibt das standortabhängige Turbulenzprofil als Funktion der Höhe.	$C_n^2 \approx 10^{-14} - 10^{-18} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$
Anzahl Korrekturlemente	Anzahl der Unterteilungen des Korrekturspiegels	COME-ON: 52 SPHERE: 41×41
Dynamischer Bereich des deformierbaren Spiegels	Mechanische Reichweite der Aktuatoren.	$\delta \approx 10 - 100 \mu\text{m}$
Frequenzbandbreite	Steuerrate der Regelschleife. Für gute Korrekturen, sollte sie mindestens der Greenwoodfrequenz entsprechen (siehe Abschnitt 2.2.3).	COME-ON: 9 Hz SPHERE: 1200 Hz
Strehlzahl S	Verhältnis von maximaler Intensität einer Punktquelle im korrigierten Bild zur maximalen Intensität des beugungsbegrenzten Bildes	Seeing begrenzt: $S < 1\%$ sehr gute Korrektur: $S > 80\%$ XAO: $S > 90\%$

Tabelle 1: Kenngrößen der Adaptiven Optik

3 Die Adaptive Optik im Einsatz

Das folgende Kapitel umfasst eine exemplarische Darstellung der im Einsatz befindlichen und geplanten erdgebundenen Teleskope, die mit der Unterstützung von Adaptiven Optik-Instrumenten arbeiten. Die Reihenfolge der Aufzählung ist dabei an die historische Entwicklung der verschiedenen Systeme angelehnt. Da die adaptive Optik heute viel mehr als Grundlage der Leistungsfähigkeit, statt als kostspieliges Feature eines Teleskops gilt, ist die Anzahl der tatsächlich im Einsatz befindlichen Systeme deutlich höher als die hier aufgelisteten. Dennoch beinhaltet die Auswahl die Teleskope, welche für die Wissenschaft am wichtigsten waren, sind und sein werden.

Bevor die Adaptive Optik für die Astronomie zum Einsatz kam, wurden in verschiedenen militärischen motivierten Projekten an der Umsetzung der Technik geforscht. Das Ziel bestand dabei ebenfalls aus der Korrektur der von der Atmosphäre gestörten Bilder. Jedoch handelte es sich dabei um Bilder von der Erde, aufgenommen von Satelliten aus der Umlaufbahn der Erde und erfüllten somit unter anderem den Zweck der Fernerkundung. Mit dem Ende des Kalten Krieges wurde die Forschung des Militärs veröffentlicht, sodass das erste zivile Adaptive Optik System 1992 zum Einsatz kam.

3.1 La Silla-Observatorium

Das La Silla-Observatorium war sowohl das erste Observatorium der Europäischen Südsternwarte (engl. *European Southern Observatory*, kurz ESO) als auch das erste Observatorium, welches mit einer Adaptiven Optik ausgestattet wurde. Genauer gesagt wurde im Dezember 1992 das 3,6m-Teleskop mit dem sogenannten *COME-ON*-System ausgestattet. Bevor das System in La Silla zum Einsatz kam, durchlief es in den Jahren 1990 und 1991 eine Reihe von ersten Tests am 1,52 m Teleskop am Observatoire de Haute-Provence in Frankreich (Merkle, Kern, et al. 1989), für die allgemeinen Beobachtungsprogramme der Astronomen aus aller Welt stand das COME-ON-System jedoch erst im Frühjahr 1993 am La Silla Observatorium zur Verfügung (Lühe 1994). Dieses neue Instrument war als Prototyp im Einsatz und sollte das Potential und die Realisierung der noch sehr jungen Technik untersuchen. Gleichzeitig sollte der Einsatz die mögliche Integration einer Adaptiven Optik in größere Teleskope, wie dem VLT, prüfen. Das COME-ON Instrument bestand aus einem kontinuierlichen deformierbaren Spiegel mit 19 piezoelektrischen Aktuatoren, einem zwei-achsigen Korrekturspiegel zum Ausgleich der Wellenfrontverkippen, einem Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor mit 20 Subaperturen und einer digitalen Regelschleife mit Feedbackfunktion, welche die Spiegel mit einer Frequenz von gerade einmal 9 Hz ansteuern konnte. Der limitierende Faktor des COME-ON-Systems war die zeitlich beschränkte Frequenzbandbreite. Damit ließen sich zwar hervorragende Bilder mit kurzer Belichtungsdauer aufnehmen, bei Beobachtungen über einen längeren Zeitraum konnte das System den atmosphärischen Turbulenzen je-

doch nur begrenzt folgen. Dennoch war die Euphorie um die neue Technik groß, denn bereits erste Tests im Jahre 1991 zeigten Bilder, die nahezu beugungsbegrenzte Auflösung und Strehlzahlen von 60% und 80% bei Wellenlängen von $3,8\ \mu\text{m}$ erreichten (Merkle and J. P. Gaffard 1991). Durch ein Upgrade im Jahre 1992 wurde der deformierbare Spiegel des COME-ON-System durch einen neuen Spiegel mit 52 Aktuatoren ausgetauscht und mit einen zusätzlichen, empfindlicheren Wellenfrontsensor, eine neue Infrarot-Kamera und eine verbesserte Regelbandbreite von 25 Hz zum *COME-ON-PLUS* erweitert (Lühe 1994). Um die Benutzung des Systems für die beobachtenden Astronomen zu vereinfachen, folgte ein benutzerfreundliches Interface namens ADONIS. Das sogenannte *Adaptive Optics Near Infrared System* war, als Erweiterung des COME-ON-PLUS, lange Zeit das einzige Adaptive Optik-System und erbrachte beeindruckende astrophysikalische Bilder. Abbildung 18 zeigt beispielsweise die erfolgreiche Trennung eines Doppelsterns bei einem Abstand von $0,3''$ (Hubin et al. 1993). Der Vergleich zwischen dem korrigierten mit dem unkorrigierten Bild verdeutlicht das Potential der Adaptiven Optik bezüglich der Steigerung des Auflösungsvermögens.

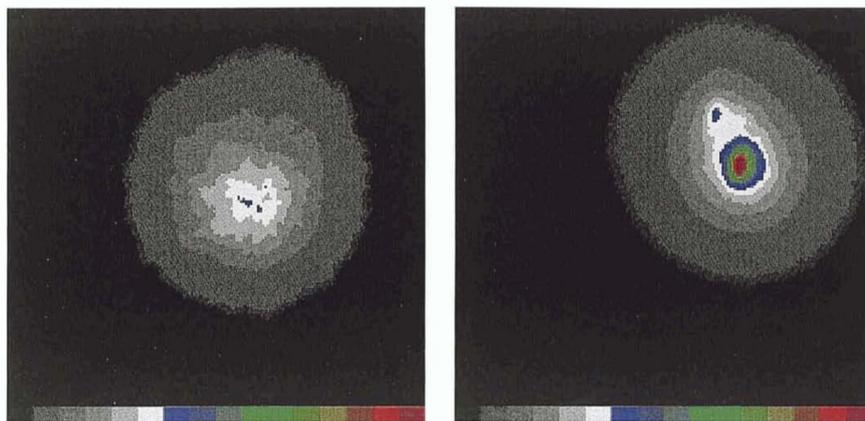


Abbildung 18: Auflösung eines Doppelsternsystems mit dem COME-ON-PLUS-System: unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts) [Hubin et al. 1993]

3.2 Lick-Observatorium

Das Shane-Teleskop des Lick-Observatoriums auf dem Mount Hamilton in Kalifornien ist ein Spiegelteleskop mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 3,0 m und wurde bereits 1959 in Betrieb genommen. Demnach war es lange Zeit eines der größten Reflektorteleskope der Welt. Aufgrund des 3-Foki-Designs bietet sich das Shane-Teleskop zur Ausrüstung für eine große Vielfalt von wissenschaftlichen Instrumenten an. So wurde beispielsweise im Jahre 1969 die erste Erde-Mond Entfernungsmessung mit einem Rubin-Laser am Lick Observatorium durchgeführt (Faller et al. 1969). Das gepulste Licht des Rubin-

Lasers wurde dabei von dem *Lunar Retro-Reflector Array*, welches 1969 von der Apollo 11 Mission auf der Mondoberfläche installiert worden war, reflektiert und vom Shane-Teleskop mit einer entsprechenden Laufzeitverzögerung gemessen. Schon damals wurde die Entfernung auf 5 m genau bestimmt (Faller et al. 1969).

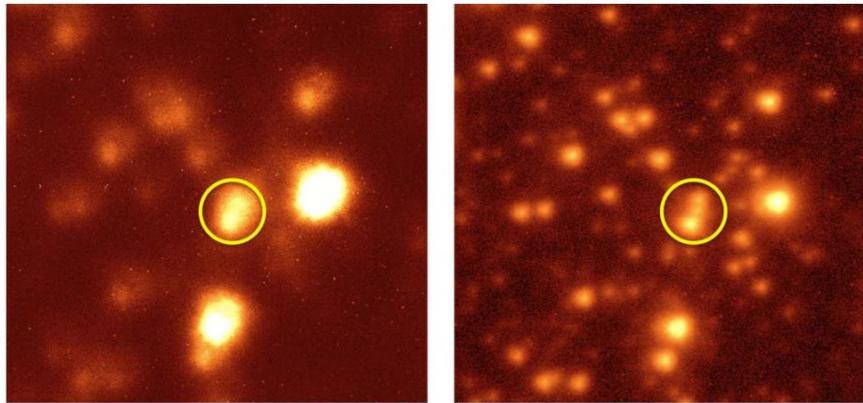


Abbildung 19: Aufnahmen des Kugelsternhaufens Messier 92 durch das Shane-Teleskop mit der ShaneAO: unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts) [McGurk et al. 2014]

Bedeutend für die Adaptive Optik wurde das Lick-Observatorium jedoch nicht durch den Rubin-, sondern durch einen Natrium-Laser, welcher 1996 den ersten künstlichen Laserleitstern erzeugte (Gavel et al. 2014). Wie im Abschnitt 2.3 *Künstliche Laserleitsterne* beschrieben, wird das vom Natrium in oberen atmosphärischen Schichten zurückgestreute Licht durch einen Wellenfrontsensor vermessen, um damit die Störung der Wellenfront analysieren zu können. Der vom Lick-Observatorium verwendete Natrium-Laser erzeugte einen künstlichen Referenzstern mit einer Leistung von 20 W. Diese Leistung entspricht einem zurück gestreuten Photonenfluss von etwa $0,5 \text{ Photonen cm}^{-2} \text{ ms}^{-1}$ und somit einem Stern mit äquivalenter Helligkeit von 8 mag (Olivier et al. 1995). Diese Helligkeit reicht aus, um auch bei kleineren Wellenlängen von etwa 500 nm gut korrigieren zu können (Hippler and Kasper 2004). Mittlerweile besteht die Shane Adaptive Optik (ShaneAO) aus einem sogenannten *ALPAO* deformierbaren Membranspiegel mit 52 magnetisch steuerbaren Aktuatoren, mit einem Hub von $\pm 50 \mu\text{m}$ zur Korrektur von Verkippungen und niedrigen Ordnungen, einem MEMS Spiegel mit 1020 Aktuatoren, hoher Geschwindigkeit und hohem Auflösungsvermögen zur Korrektur der hohen Ordnungen, zwei austauschbaren Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren und einem Shane Adaptive optics infraRed Camera-Spectrograph (ShARCS) (Gavel et al. 2014). Die Verwendung von Laserleitsternen ermöglicht dem Shane-Teleskop zusätzlich schwach leuchtende Objekte mit der Korrektur der Adaptiven Optik zu untersuchen. So ermöglichte die ShaneAO zum Beispiel das Separieren dreier Sterne, die ohne Adaptive Optik nur als ein Stern zu erkennen sind, siehe Abbildung 19. Die Bilder stammen vom M92 Kugelsternhaufen und wurden

im K-Band aufgenommen. Die Ausdehnung des gelb markierten Sterns in Abbildung 19 links ist etwa $1''$, wohingegen die Entfernung zwischen den drei Sternen im Bild rechts nur $0,42''$ und $0,58''$ beträgt (McGurk et al. 2014).

3.3 Keck-Observatorium

Das *Keck-Observatorium* befindet sich in 4200 m Höhe auf dem Mauna Kea auf der Insel Hawaii. Es besteht aus zwei Teleskopen mit je einem Hauptspiegeldurchmesser von 10 m, die eine identische Bauform haben und aufgrund ihrer Nähe und der entsprechenden Einrichtung auch als optisches Interferometer benutzt werden können. Die Hauptspiegel bestehen aus jeweils 36 kleinen hexagonalen Segmenten, deren Positionen alle einzeln justiert werden können. Durch diese neuartige Bauweise sind die individuellen Spiegelsegmente leichter, was die Korrektur der *aktiven Optik* vereinfacht (siehe Abschnitt 2.8 *Aktive Optik*). Die beiden Teleskope wurden 1993 (Keck-I) und 1996 (Keck-II) in Betrieb genommen. Erst im Jahre 2007 wurden sie als größte optische Teleskope der Welt durch das *Gran Telescopio Canarias* mit einem Spiegeldurchmesser von 10,4 m abgelöst.



Abbildung 20: Sonnenuntergang auf dem Mauna Kea: (von links nach rechts) Subaru, Keck-I und Keck-II © Olaf Kunze

Bereits 1999 kam die Adaptive Optik des Keck-II Teleskops zum ersten Mal zum Einsatz und wurde somit die erste Adaptive Optik der 8 – 10 m-Durchmesser Teleskope. Die Kombination aus großer lichtsammelnder Fläche und moderner Technik lieferte nie dagewesene Winkelaufösungen von bis zu $0,022''$ bei einem Stern der Helligkeit 4,5 mag, einer Belichtungsdauer von 10 ms und der Wellenlänge von 850 nm (P. Wizinowich et al. 2000). Dabei entspricht die gemessene Winkelaufösung von $0,022''$ der Halbwertsbreite der Intensitätskurve des Sterns. Das Adaptive Optik-System des Keck-Observatoriums arbeitet mit einem Shack-Hartmann-Sensor aus 20×20 Subaperturen, einem Verkip-

pungspegel und einem deformierbaren Spiegel mit 349 Aktuatoren (Dam, Le Mignant, and Macintosh 2004). Durch die große Teleskopöffnung waren Korrekturen mit Referenzsternen der Helligkeit bis zu 14 mag möglich (Dam, Le Mignant, and Macintosh 2004). Um darüber hinaus noch dunklere Himmelsregion mit einer Adaptiven Optik Korrektur untersuchen zu können, wurde das Keck-Observatorium 2003 mit einem künstlichen Laserleitstern System ausgestattet. Durch diese Aufrüstung wurde das Keck-Observatorium zusätzlich zum ersten Observatorium, das ein 8 – 10 m-Klasse Teleskop mit einem Laser Leitstern betrieb. Die Kombination von natürlichen und künstlichen Leitsternen befähigte das Keck-Observatorium zu einer Beobachtung von schwachen Objekten mit 19 mag und zu einer möglichen Himmelsabdeckung von etwa 70% (P. L. Wizinowich et al. 2006). Bei hellen Referenzsternen wurden im K-Band Strehlzahlen zwischen 30% und 40% und bei schwachen Referenzsternen bis zu 10% erreicht (P. L. Wizinowich et al. 2006).

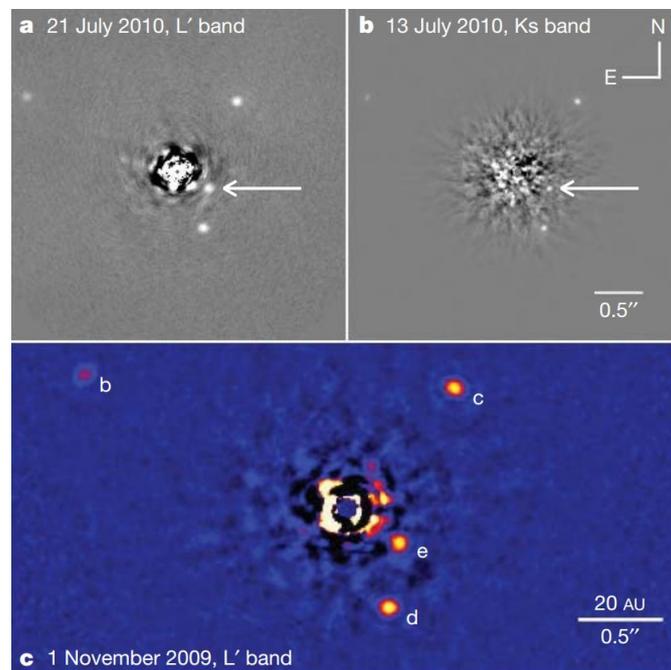


Abbildung 21: Direkte Abbildung des Planeten HR 8799e mit dem Keck-II Teleskop [Marois et al. 2010]

In den Jahren 2009 und 2010 wurden am Keck-II Aufnahmen gemacht, die die bestehenden Planeten Entstehungsmodelle auf den Kopf stellten. Durch die High Contrast Imaging Methode wurde im HR 8799 System ein vierter Planet entdeckt (Marois et al. 2010). Das Keck-Observatorium stellte sein ganzes Potential unter Beweis und bildete einen extrasolaren Planeten in einer Distanz von $0,368'' \pm 0,003''$ (also $14,5 \text{ AU} \pm 0,4 \text{ AU}$) direkt ab (Marois et al. 2010). Abbildung 21 zeigt drei zeitlich unabhängige Aufnahmen des Sterns HR 8799 und dessen Planeten. Alle drei Bilder zeigen den vierten Planeten

HR 8799e deutlich. Doch nicht die Radien ihrer Umlaufbahnen, sondern die besonders ähnlichen Massen der Planeten widersprechen den gängigen Theorien der Planetenentstehung und konfrontierte die Planetenforscher somit mit neuen Aufgaben (Marois et al. 2010).

3.4 Subaru-Teleskop

Der Bau des Subaru-Teleskops, als Teil des *National Astronomical Observatory of Japan*, wurde 1999 fertiggestellt. Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, befindet sich das Subaru-Teleskop (links) gleich neben den beiden Keck-Teleskopen ebenfalls auf dem Mauna Kea. Mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 8,2 m gehört es zu den größten optischen Teleskopen der Erde. Da zur Zeit der Jahrtausendwende die Adaptive Optik bereits eine etablierte Technik war, dauerte es nicht lange, bis auch das Subaru-Teleskop mit dieser Technik die atmosphärischen Schwankungen zu kompensieren versuchte. 2002 wurde das erste Adaptive Optik System AO36 mit einem Krümmungssensor aus 36 APD-Elementen und einem Bimorphen Spiegel mit 36 Elektroden verbaut. AO36 erreichte bei Referenzsternen der Helligkeit 13 mag Strehlzahlen von 40% und Winkelauflösungen von 0,065'' im K-Band (Karoji et al. 2004). Nach einigen erfolgreichen Jahren der Beobachtung wurde das System 2006 durch dessen Nachfolger AO188 ersetzt. Wie der Name bereits andeutet besteht die Weiterentwicklung aus einem Krümmungssensor mit 188 APD Elementen und dem dazugehörigen Bimorphen Spiegel mit 188 Elektroden (Minowa et al. 2010). Die optionale Verwendung von sowohl natürlichen als auch künstlichen Leitsternen und die verbesserten Strehlzahlen von bis zu 70% machten das AO188 über viele Jahre hinweg zu einem bedeutenden Bestandteil des Subaru-Teleskops (Minowa et al. 2010). Zusammen mit dem *High-Contrast Coronagraphic Imager for Adaptive Optics (HiCIAO)* begann 2007 die Suche nach extrasolaren Planeten. HiCIAO sollte als erstes System die gleichzeitige Verwendung von Koronographen und polarimetrischer bzw. spektraler differentieller Bildgebung ermöglichen (Tamura et al. 2007). Durch das Aufteilen des Bildes in mehrere Bilder lassen sich durch die differentielle Bildbetrachtung mehrere unterschiedliche Ebenen von Polarisationen und Spektren aufzeichnen, aus welchen letztlich schwach leuchtende Objekte wie Planeten oder Staub in der Nähe eines stark leuchtenden Sterns besser hervorgehoben werden können (Tamura et al. 2007).

Seit 2013 arbeitet das Subaru-Teleskop jedoch mit einem weitaus moderneren Instrument: dem *Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics system (SCEXAO)*. Neben den bereits erwähnten SPHERE und GPI XAO Systemen des VLT beziehungsweise Gemini-South-Teleskops zielt das SCEXAO System auf die Korrektur extrem hoher Ordnungen der Wellenfrontstörung und somit auf das Erreichen von Strehlzahlen $> 90\%$ im nahen Infrarot (Nemanja Jovanovic et al. 2013). Um dies zu realisieren, müssen jedoch Wellenfrontsensoren und deformierbare Spiegel mit einer extrem hohen Auflösung verwendet werden. Dies wird beim SCEXAO durch einen hochauflösenden Pyramiden-

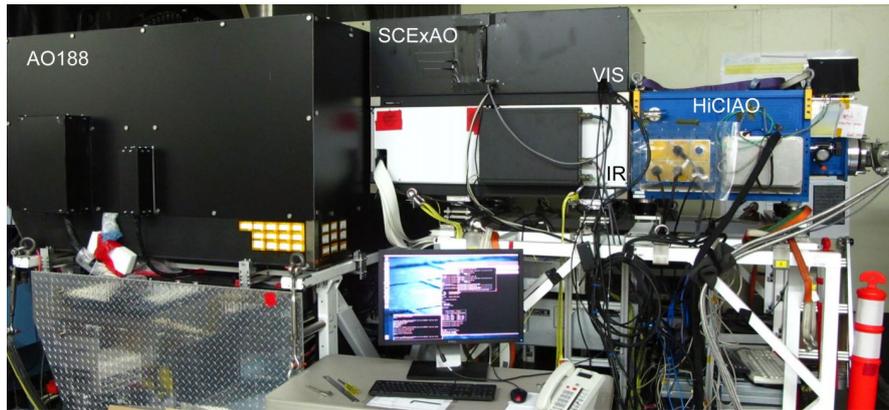


Abbildung 22: Adaptive Optik-Instrument des Subaru-Teleskops: Das Licht des Teleskops kommt von links durch das AO188 System, wird anschließend vom SCEXAO auf hohe Ordnungen korrigiert und letztlich von der HiCIAO Kamera aufgenommen [N. Jovanovic et al. 2015]

sensor und einen MEMS Spiegel mit 2000 Aktuatoren gewährleistet (Nemanja Jovanovic et al. 2013). Abbildung 22 zeigt die erwähnten Adaptive Optik-Instrumente des Subaru-Teleskops. Hält man sich vor Augen, welche Leistung die Adaptive Optik vollbringt, nämlich nichts geringeres als die beugungsbegrenzte Auflösung für erdgebundene Teleskope zu ermöglichen und somit die Beförderung der Teleskope ins All zu ersparen, erscheint dieser Aufwand mehr als gerechtfertigt.

Eine potentielle Aufgabe des SCEXAO Systems könnte darin bestehen, im HR 8799-System (Abbildung 21) einen weiteren Planeten ausfindig zu machen (N. Jovanovic et al. 2015). Polnische Forscher schlossen 2013 aufgrund von Schwankungen in den Umlaufbahnen der bisherigen Planeten auf einen hypothetischen fünften Planeten HR 8799f (Goździewski and Migaszewski 2013). Dieser Planet könnte seinen Mutterstern im Abstand von etwa 9,7 AU oder 7,5 AU umkreisen (Goździewski and Migaszewski 2013).

3.5 Gemini-Observatorium

Nach der Erwähnung der Keck-Teleskope und des Subaru-Teleskops darf das benachbarte Gemini-Teleskop nicht fehlen, denn sie gehören alle zu den 8–10 m-Klasse Teleskopen und sind teil des Mauna-Kea-Observatoriums. Das Gemini-Observatorium besteht, im Gegensatz zu den meisten der bisher erwähnten Observatorien, aus zwei Teleskopen mit jeweils 8,1 m Hauptspiegeldurchmesser. Das *Gemini-North* auf Hawaii und das *Gemini-South* in Chile bilden zusammen ein Observatorium, welches von den USA, Kanada, Brasilien, Argentinien und Chile betrieben wird. Seit der Inbetriebnahme des Gemini-North im Jahre 2000 und des Gemini-South zwei Jahre später liefern die Teleskope einen wichtigen Beitrag zur Wissenschaft. Obwohl neben den Gemini-Teleskopen nun einige andere 8–10 m-

Klasse Teleskope in Betrieb sind, erweist sich das Gemini-Observatorium aufgrund folgender Aspekte als besonders vorteilhaft (Davidge and Côté 2014). Durch die Verwendung von Teleskopen auf der Nord- und Südhalbkugel ist das Gemini-Observatorium das weltweit einzige, welches eine komplette Himmelsabdeckung ermöglicht. Die Empfindlichkeit des Teleskops im infraroten Bereich ist durch ein spezielles Design und durch die Benutzung von Silberbeschichtungen außerordentlich hoch (Davidge and Côté 2014). Im optischen und auch im infraroten Bereich liefern die Gemini-Teleskope aufgrund der besonderen Standorte und schließlich auch dank der hochentwickelten Technik Bilder mit exzellenter Qualität. Einen großen Beitrag zur Realisierung der hohen Bildqualität leisten folgende Adaptive Optik Instrumente: Am Gemini-North befindet sich das System *ALTitude conjugate Adaptive optics for the InfraRed (ALTAIR)* seit 2004 in Verbindung mit natürlichen Leitsternen und seit 2007 mit Laserleitsternen im Einsatz. Bestehend aus einem Shack-Hartmann-Sensor mit einem 12×12 Linsenarray, einem deformierbaren Spiegel mit 177 Aktuatoren, einem separaten Spiegel zur Korrektur der Verkippungen und einem closed-loop mit maximaler Frequenzbandbreite von 1 kHz erreicht ALTAIR Strehlzahlen von 20% bis 40% im H- und K-Band. Zusammen mit dem *Near InfraRed Imager and Spectrometer (NIRI)* gelang es dem Gemini-North jupiterähnliche Exoplaneten in einer Entfernung von etwa 40 AU von deren Muttersternen zu beobachten (Christou et al. 2009). Für Aufsehen bezüglich der Exoplaneten Erforschung zusammen mit fortschrittlicher Adaptiver Optik sorgte jedoch das Gemini-South. Drei wesentliche Instrumente tragen zu diesem Erfolg bei: Das *Gemini Multi-Conjugate Adaptive Optics System (GeMS)*, der *Gemini South Adaptive Optics Imager (GSAOI)* und der *Gemini Planet Imager (GPI)*. Das von GeMS über ein Sichtfeld von mehr als $1'$ homogen korrigierte Bild erreicht beugungsbegrenzte Auflösung im nahen Infrarot. Diese Daten können von der GSAOI Kamera in einem möglichen Sichtfeld von $83''$ aufgenommen werden (Christou et al. 2009). Die Schlüsselkomponente auf der Suche nach extrasolaren Planeten stellt jedoch der XAO GPI dar (siehe Abschnitt 2.7.4 *Extreme Adaptive Optics (XAO)*). Durch die Verwendung eines MOEMS Spiegels mit 2000 Aktuatoren zur Korrektur hoher Ordnungen der Wellenfrontstörung und moderner Koronographen lassen sich mit dem GPI warme, selbstleuchtende, jupiterähnliche Planeten unter einem Kontrastverhältnis von bis zu 10^{-8} bezüglich deren Mutterstern direkt beobachten (Macintosh, Graham, Palmer, et al. 2006). Neben dem Nachweisen von Planeten ist das GPI-System zusätzlich im Stande durch polarimetrische Bildgebung den sternumgebenden Staub deutlich hervorzuheben. Das vom Staub gestreute Licht ist stark polarisiert und lässt sich somit dem unpolarisierten Sternenlicht gegenüber leichter ablichten.

Abbildung 23 stellt die *First Light*-Beobachtung des GPI dar. Dabei stellt das linke Bild eine Beobachtung im infraroten Licht dar, bei der die Staubscheibe nur schwach zu erkennen ist. Das rechte Bild hingegen zeigt nur polarisiertes Licht, weshalb das unpolarisierte Licht des Zentralsterns reduziert erscheint. Licht, welches an den Staubpartikeln

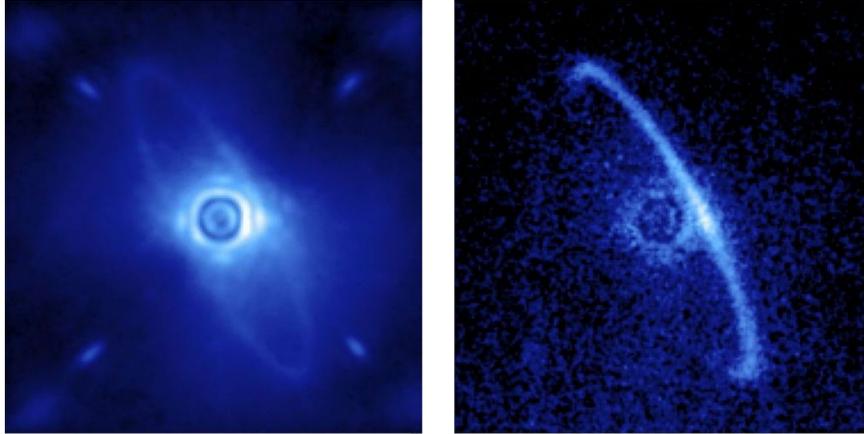


Abbildung 23: First Light des Gemini Planet Imager zeigt den junge Stern HR4796A und dessen Staubscheibe, das linke Bild zeigt den Stern im infraroten Licht im K-Band, das rechte Bild zeigt nur polarisiertes Licht [Macintosh, Graham, and Perrin 2014]

der Scheibe gestreut wird, ist stark polarisiert und erscheint somit heller. Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass der Staub aus Asteroiden und Kometen, die aus der Zeit der Planetenentstehung übrig geblieben sind, besteht (Macintosh, Graham, and Perrin 2014). Da das Licht vom hinteren Ende der Scheibe in unsere Richtung gestreut wird, ist dieses deutlich stärker polarisiert als das Licht, welches durch den uns näheren Staub gestreut wird (Macintosh, Graham, and Perrin 2014). Somit lässt sich zusätzlich eine Aussage über die Orientierung der Scheibe treffen. Aufnahmen wie diese verbessern unser Verständnis für die Entwicklung von Sternen und deren Planeten.

3.6 Large Binocular Telescope

Das *Large Binocular Telescope (LBT)* befindet sich auf dem Mount Graham in Arizona und arbeitet im Gegensatz zu den bisher erwähnten Teleskopen mit zwei Hauptspiegeln. Im interferometrischen Modus haben die Hauptspiegel einen gemeinsamen Durchmesser von 8,4 m. Der Vorteil dieser Konstruktion ist das erweiterte Auflösungsvermögen. Zusammen mit einer modernen Adaptiven Optik erreicht das LBT ein Auflösungsvermögen, das dem eines 22,65 m großen Teleskop entspricht. Die lichtsammelnde Fläche kommt der eines Teleskops mit 11,8 m großer Öffnung gleich (Hill 2010). Nachdem im Oktober 2005 zunächst ein Hauptspiegel in Betrieb genommen wurde, konnte im Jahre 2007 schließlich die erste binokulare Beobachtung unternommen werden (Hill 2010). Zu diesem Zeitpunkt war das LBT eines der größten Teleskope des optisch-infraroten Bereichs weltweit. Betrieben wird das LBT aus einer Kollaboration von Instituten aus der USA, Deutschland und Italien.

Mit der Inbetriebnahme der Adaptiven Optik namens *First Light Adaptive Optics (FLAO)* im Mai 2009 wurden mit nur einem der beiden Hauptspiegel bereits außerordentlich scharfe Bilder aufgenommen. Mit beiden Spiegeln zusammen versprach man sich eine Auflösung zu erreichen, die die des Hubble Space Telescopes um ein zehnfaches übertreffen sollte (Jäger and Herbst 2010). Der Direktor des LBT Richard Green bezeichnete den Erfolg als „[...] das Erreichen einer neuen Generation der Astronomie“ (Jäger and Herbst 2010). In der ersten Testphase der FLAO erreichte das Teleskop Strehlzahlen von 60% und 80%, womit alle Erwartungen übertroffen wurden (Jäger and Herbst 2010). Um diese und sogar noch bessere Korrekturen zu ermöglichen, arbeitet das LBT als erstes Großteleskop mit adaptiven Sekundärspiegeln. Beide Sekundärspiegel, bezeichnet als LBT672a und LBT672b, bestehen aus einer im Durchmesser 911 mm großen und nur 1,6 mm dicken Zerodur-Platte. Die Verformungen werden, wie in Abschnitt 2.5.4 *Adaptive Sekundärspiegel* beschrieben, von jeweils 672 elektromagnetischen voice coils Aktuatoren, die für eine Wellenfrontkorrektur mit einer Frequenz von 1 kHz angesteuert werden können, erzeugt (Esposito et al. 2010). Als Wellenfrontsensor verwendet das LBT einen Pyramidensensor, welcher zusammen mit einem natürlichen Leitstern, die Korrektur der Wellenfront in hohen Ordnungen ermöglicht. Nach den beiden nah-infrarot-Kameras LUCI1 und LUCI2, wurde im September 2013 eine weitere leistungsstarke PISCES nah-infrarot Kamera installiert, sodass das LBT nun in der Lage ist Bilder mit noch höherer Auflösung aufzunehmen. Darüber hinaus wird seit November 2015 das nah-infrarot-Spektroskopie-Instrument LINC-NIRVANA zur Realisierung von MCAO und interferometrischen Strahlenkombinationen installiert.

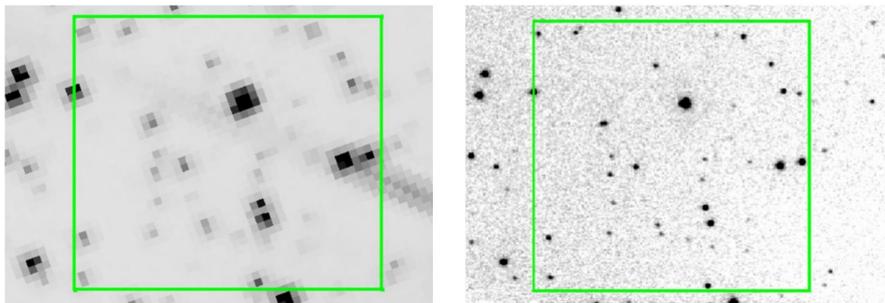


Abbildung 24: Vergleich der selben Himmelsregion, aufgenommen vom Hubble Space Telescope (links) und vom LBT (rechts)[Monelli et al. 2015]

Abbildung 24 zeigt zum Vergleich die selbe Himmelsregion, einmal vom Hubble Space Telescope (links) und einmal vom LBT (rechts) mit FLAO und PISCES aufgenommen (Monelli et al. 2015). Die durch das grüne Quadrat hervorgehobene Region entspricht der Größe von $5'' \times 5''$. Die Abbildung zeigt eindrucksvoll, wie die Steigerung des räumlichen Auflösungsvermögens von erdgebundenen Teleskopen das der ohne atmosphärischen Turbulenzen arbeitenden Weltraumteleskope übertrifft.

3.7 Very Large Telescope

Das *Very Large Telescope (VLT)* ist das leistungsstärkste erdgebundene Teleskop. Bestehend aus vier Einzelteleskopen mit einem Hauptspiegeldurchmesser von jeweils 8,2 m, die sowohl als unabhängige Teleskope als auch als Interferometer (VLTI) mit vier weiteren Hilfsteleskopen zusammengeschaltet betrieben werden können, war das VLT an etlichen wichtigen astronomischen Entdeckungen beteiligt und spielt auch weiterhin eine bedeutende Rolle in der erdgebundenen Astronomie. Das VLT befindet sich in 2635 m Höhe auf dem Cerro Paranal in der Atacama Wüste im Norden Chiles. Bei der Benutzung des VLTs als Interferometer werden vier zusätzliche, bewegliche, sogenannte *Auxiliary Telescopes (ATs)* (dt. Hilfsteleskope) mit 1,8 m Spiegeln verwendet. Das gesammelte Licht wird in unterirdischen Gängen zusammengeführt und an einem Punkt gebündelt. Die damit erreichte Winkelauflösung entspricht der eines 200 m-Teleskops. Sie befindet sich im Millibogensekunden-Bereich und ist somit die höchstmögliche Auflösung, die an einem Observatorium erreicht werden kann (ESO 1998). Zusammengeschaltet liefert das VLTI eine Lichtsammelleistung, die einem Einzelteleskop mit 16 m Hauptspiegel entspricht. Für die meisten Beobachtungen werden jedoch die VLT Einzelteleskope individuell verwendet. Das VLT ermöglicht die Beobachtungen im Wellenlängenbereich vom nahen Ultraviolett (300 nm) bis hin zum mittleren Infrarot ($25 \mu\text{m}$). Die 8,2 m Hauptspiegel der vier Teleskope bestehen aus Zerodur und sind 175 mm dick und werden durch eine aktive Optik mit 150 Aktuatoren gestützt (ESO 1998). Die Sekundärspiegel hingegen sind aus Beryllium, haben einen Durchmesser von 1,12 m, sind 50 mm dick und wiegen jeweils 51 kg. Durch diese leichte Bauweise lassen sich deformierbare Sekundärspiegel mit besonders vielen Aktuatoren realisieren, siehe Abschnitt 2.5.4 *Adaptive Sekundärspiegel*. Zusammen mit einem Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor und einem Echtzeit-Kontrollcomputer wird das sogenannte *Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS)* zur Beobachtung mit beugungsbegrenzter Auflösung gebildet. Die vom NAOS korrigierten Bilder werden anschließend von der *Coude Near Infrared Camera (CONICA)* aufgenommen. Diese beiden Instrumente (NAOS + CONICA) stellen das erste Adaptive Optik System, auch NACO genannt, des VLT dar. Seit 2001 im Einsatz trägt NACO zu einer Vielzahl von astronomischen Entdeckungen bei. Darunter befindet sich zum Beispiel die erste direkte Abbildung eines Exoplaneten (Chauvin et al. 2004), die erste Beobachtung der Bewegung eines Exoplaneten um seinen Mutterstern (Lagrange et al. 2010), die erste direkte Aufnahme eines Exoplaneten-Spektrums (Janson et al. 2010) und die Beobachtung von Sternen, die das Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße umkreisen (Gillessen et al. 2009).

Abbildung 25 zeigt das Bild eines Sterns mit einer Helligkeit von 8 mag, aufgenommen im infraroten K-Band einmal ohne Korrektur (links) und einmal nachdem die Adaptive Optik NACO eingeschaltet wurde (rechts). Die Abbildung in der Mitte zeigt eine dreidimensionale Intensitätsverteilung der beiden Bilder, wodurch die enorme Verbesserung der Auflösung verdeutlicht wird (Brandner et al. 2002).

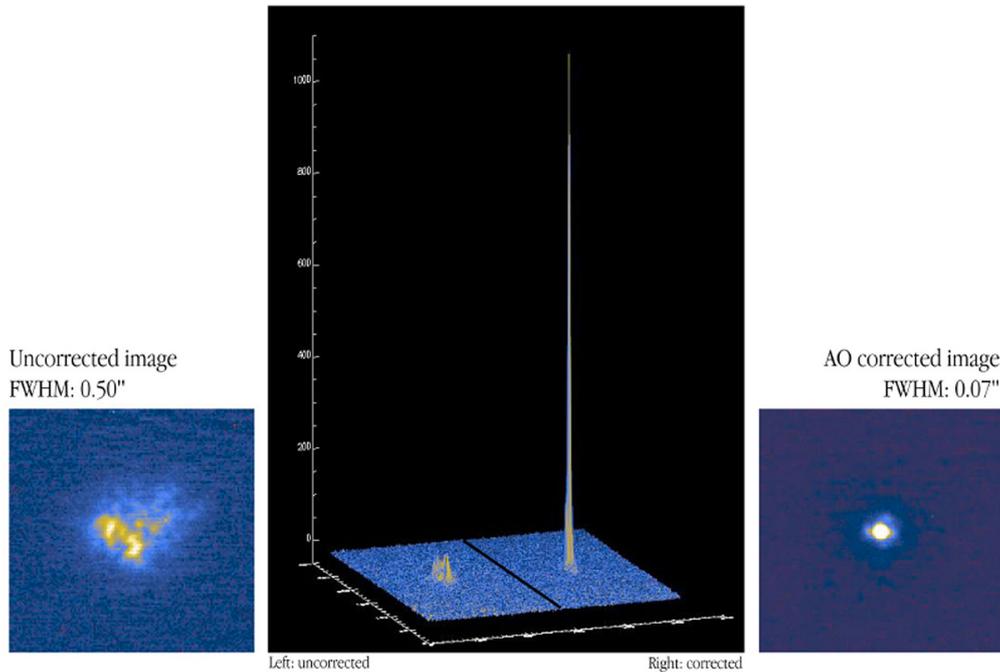


Abbildung 25: First Light-Beobachtung mit dem Adaptiven Optik-System NACO am VLT Yepun [ESO: eso0137a]

Doch die Instrumente des VLT wurde abermals durch verbesserte ausgewechselt. Im Mai 2014 fand die First Light Beobachtung eines neuen, hochentwickelten Systems statt. Das sogenannte *Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch (SPHERE)* Instrument wurde am Paranal Observatorium installiert und begibt sich damit auf die Suche nach Exoplaneten. Ähnlich wie der GPI ist auch SPHERE ein XAO-System, welches Planeten in der Entfernung von wenigen Astronomischen Einheiten und unter hohen Kontrastverhältnissen von bis zu 10^{-9} zu ihren Muttersternen direkt beobachtet und dabei Strehlzahlen von über 90% erreicht (Zurlo et al. 2014). SPHERE wurde über 12 Jahre von 12 verschiedenen Instituten in Europa entwickelt (Fusco, Sauvage, et al. 2014). Die Hauptkomponenten des Instruments sind: Ein 40×40 Subaperturen Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor zur Analyse der Wellenfrontstörung. Ein 41×41 Aktuator deformierbarer Spiegel mit extrem hoher räumlicher Auflösung und einem dynamischen Bereich von $10 \mu\text{m}$ zur Korrektur der Wellenfrontstörung. Schließlich werden die notwendigen Daten zur Steuerung des Systems von einem Echtzeit-Kontrollcomputer berechnet, der die Komponenten im closed-loop bei einer Frequenz von bis zu 1,2 kHz ansteuert (Fusco, Sauvage, et al. 2014).

Doch nicht nur die individuelle Verbesserung der Einzelteleskope wird weiter vorange-
trieben, auch die Adaptive Optik des VLTI wird immer weiter ausgebaut. So wurden über

die Jahre 2003 bis 2005 alle vier VLT Teleskope mit dem *Multi-Application Curvature Adaptive Optics (MACAO)* System ausgestattet (Robin Arsenault et al. 2004). Das Upgrade beinhaltete hauptsächlich einen Krümmungswellenfrontsensor mit 60 Elementen und einen 150 mm Bimorphen Spiegel mit ebenfalls 60 Elementen. Somit konnte das VLT im Einsatz als Interferometer trotz schlechten atmosphärischen Bedingungen Strehlzahlen von bis zu 65% und Aufnahmen mit beeindruckend hoher Auflösung erreichen (Robin Arsenault et al. 2004). Da beim Betreiben des VLT im Interferometer-Modus auch die kleineren Hilfsteleskope zu einer Verbesserung der Auflösung führen, werden diese aktuell auch mit einer Adaptiven Optik ausgestattet. Bis 2017 sollen alle vier Hilfsteleskope mit dem *New Adaptive Optics Module for Interferometry (NAOMI)* ausgestattet werden. Ziel des NAOMI-Systems ist die Ermöglichung der Himmelsbeobachtung auch bei schlechteren atmosphärischen Bedingungen mit den VLT Hilfsteleskopen (Dorn et al. 2014). Diese und eine Reihe anderer hochentwickelter moderner Instrumente machen das VLT zum einem der wichtigsten erdgebundenen Teleskope mit einem beachtlichen wissenschaftlichen Einfluss. Da die aktuelle Generation von Teleskopen jedoch nicht nur astronomische Fragen beantwortet, sondern auch immer wieder neue aufbringt, befinden sich momentan eine Reihe weitere Teleskope in Planung und Bau, die zusammen mit einer neuen Generation Adaptiver Optik die neue Generation der erdgebundenen Großteleskope bilden.

3.8 Giant Magellan Telescope

Das *Giant Magellan Telescope (GMT)* befindet sich momentan im Bau und soll voraussichtlich 2024 zum Einsatz kommen. Mit einer Konstruktion aus sieben 8,4 m Spiegeln soll das GMT ein Auflösungsvermögen erreichen, das dem eines 24,5 m-Teleskops gleich kommt. Damit erhoffen sich die Forscher ein zehnmal größeres Auflösungsvermögen als das Hubble Space Telescope zu erreichen. Ziel dieser immer größer werdenden Bauten ist die damit verbundene Steigerung des Lichtsammelvermögens, des Auflösungsvermögens und nicht zuletzt auch die Klärung der Frage nach der Stellung der Menschheit im Universum. Die Suche nach fremdem Leben auf fernen Welten fasziniert die Menschen seit der ersten Stunde der Exoplaneten-Forschung. Mit ausgeklügelten Methoden lassen sich etwa die Größe, Masse, Mittlere Dichte und Umlaufbahn der Exoplaneten bestimmen, jedoch bringt die direkte Beobachtung und Abbildung im sichtbaren Spektralbereich die Exoplaneten-Forschung auf ein ganz neues Level.

Ähnlich der modernen Adaptiven Optik-Systeme des Subaru, Gemini oder VLT soll auch das GMT mit einer extremen Adaptiven Optik ausgestattet werden, welche nicht nur sehr hohe Strehlzahlen erreichen, sondern auch extrem hohe Kontrastverhältnisse bewältigen kann (Lloyd-Hart et al. 2006). Korrekturen hoher Ordnungen der Wellenfrontstörungen werden, wie bereits erwähnt, durch eine hohe Dichte an Korrektur-elementen in einem deformierbaren Spiegel realisiert. Dies geschieht beim GMT durch sieben 1,05 m

adaptive Sekundärspiegel mit jeweils 672 voice coil Aktuatoren. Die Aktuatoren sollen die 2 mm dicken Zerodur Spiegel mit einer Genauigkeit von etwa 10 nm und einer Frequenz von bis zu 2 kHz verbiegen (Bouchez et al. 2014). Die Kombination aus natürlichen Leitsternen und künstlichen Natrium-Laserleitsternen ermöglicht sowohl die Verwendung der Adaptiven Optik im klassischen Sinne, als auch die Verwendung modernerer Techniken wie der GLAO, der LTAO und der MCAO. Die Messung der Wellenfrontstörung bei Beobachtungen mit natürlichen Leitsternen bewerkstelligt ein Pyramiden-Wellenfrontsensor. Um die Wellenfrontstörungen ausreichend hoch auflösen zu können, sollen Kameras mit 92×92 Subaperturen zum Einsatz kommen (Bouchez et al. 2014). Bei der Vermessung verschiedener atmosphärischer Schichten mit den sechs künstlichen Laserleitsternen kommen sechs Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren mit jeweils 60×60 Subaperturen zum Einsatz. Die 20 W Laser bilden am Himmel einen Kreis mit einem Durchmesser von etwa $20''$ (Bouchez et al. 2014). Damit soll das GMT Strehlzahlen von 30% für eine Himmelsabdeckung von 79% an den galaktischen Polen im H-Band erreichen (Bouchez et al. 2014). Mit diesen Fähigkeiten soll das GMT nach seiner Fertigstellung die aktuell verwendeten Adaptiven Optik Systeme in ihrer Leistung übertreffen und somit Beobachtungen mit nie dagewesener Auflösung ermöglichen (Lloyd-Hart et al. 2006).

3.9 Thirty Meter Telescope

Die optische Leistung eines Teleskops definiert sich bekannterweise hauptsächlich über dessen Hauptspiegeldurchmesser. Um immer leistungsfähigere Teleskope mit größeren Spiegeln bauen zu können, werden zwangsweise auch immer größere Manufakturen benötigt, die auf den Herstellungsprozess solcher Spiegel spezialisiert sind. Durch das Gießen auf einen rotierenden Tisch und aufwendige Politurverfahren erreichen diese Manufakturen Spiegel, die aus einem Stück bestehen und eine extrem hohe Präzision im Nanometer-Bereich erreichen (Dierickx et al. 1997). Die Größe dieser am Stück gegossenen Spiegel ist jedoch durch den Fertigungsprozess limitiert, sodass die nächste Generation der erdgebundenen Großteleskope, die sogenannten *Extremely Large Telescopes (ELT)*, ihre Hauptspiegel durch das Zusammensetzen von sechseckigen Spiegelementen realisiert. Auf diese Weise lassen sich riesige, optische Teleskope mit Spiegeldurchmesser von 30 m und mehr bauen.

Eines dieser Teleskope der nächsten Generation wird von einer Kooperation aus der Association of Canadian Universities for Research in Astronomy, der University of California und dem California Institut of Technology geleitet und unter dem Namen *Thirty Meter Telescope (TMT)* gebaut. Der 30 m große Hauptspiegel des TMT wird aus 492 Spiegelsegmenten mit 1,42 m Durchmesser bestehen (Ellerbroek et al. 2005). Neben vielen anderen wissenschaftlichen Forschungsgebieten wird das Charakterisieren von Exoplaneten durch die direkte Beobachtung und Spektroskopie ein zentraler Forschungszeitweig am TMT sein (Ellerbroek et al. 2005). Um für diese und andere Aufgaben gewappnet

zu sein, befindet sich eine umfangreiche Adaptive Optik für das TMT in Planung. Darunter befindet sich eine Auswahl an First Light Instrumenten wie das Wide Field Optical Spectrometer (WFOS), das Infrared Imaging Spectrometer (IRIS) und das Infrared Multi-object Spectrometer (IRMS), aber auch modernere Adaptive Optik Instrumente zur Umsetzung von weiterentwickelten Konzepten wie der GLAO, MCAO, MOAO und XAO werden entwickelt (Ellerbroek et al. 2005).

Die First Light-Instrumente sollen teils mit Seeing- aber auch mit beugungsbegrenzter Auflösung in unterschiedlichen Wellenlängen arbeiten. Das WFOS arbeitet im nahen ultravioletten und optischen Bereich ($0,3\ \mu\text{m}$ bis $1,0\ \mu\text{m}$). Es ermöglicht die gleichzeitige Beobachtung von hunderten verschiedenen Objekten über ein weites Sichtfeld von $40' \times 40'$, jedoch nur mit unkorrigierten Bildern (Ellerbroek et al. 2005). Im nahen infraroten Bereich ($1,0\ \mu\text{m}$ bis $2,5\ \mu\text{m}$) arbeiten IRIS und IRMS. Beide sind Teil des *Narrow Field Infrared Adaptive Optics System (NFIRAOS)*, welches beugungsbegrenztes Auflösungsvermögen für ein schmales Sichtfeld von $30''$ im Durchmesser erreichen soll (Herriot et al. 2006). Die für die Korrektur notwendigen Referenzsterne werden beim NFIRAOS von sechs Natrium Lasern, die über ein Sichtfeld von $70''$ verteilt sind, gestellt. Aus der Kombination von natürlichen und künstlichen Referenzsternen soll die Himmelsabdeckung des TMT etwa 50% in der Nähe der galaktischen Pole erreichen (Herriot et al. 2006). Zur Zeit der Inbetriebnahme des TMT wird das NFIRAOS Korrekturen mit zwei unabhängigen deformierbaren Spiegeln vornehmen. Die Aktuatoren werden dabei in einem Abstand von nur 5 mm zueinander positioniert sein. Ein Spiegel korrigiert die bodennahen Störungen (GLAO) mit 63×63 Aktuatoren und ein zweiter Spiegel korrigiert die Störungen in 12 km Höhe mit 75×75 Aktuatoren (Macintosh and Troy 2006). Damit fungiert das First Light Instrument NFIRAOS bereits als MCAO. Fällt der Einsatz des ersten Adaptiven Optik Systems des TMT positiv aus, sind bereits folgende Verbesserungen vorgesehen: Der deformierbare Spiegel zur Korrektur der bodennahen Störungen wird durch einen neuen Spiegel mit doppelt so vielen Aktuatoren ausgetauscht. Die Aktuatoren werden zwar eine geringere Reichweite (3 statt $9\ \mu\text{m}$) haben, jedoch wird zusätzlich der starre Sekundärspiegel durch einen adaptiven Sekundärspiegel ersetzt, welcher die niedrigen Moden korrigieren soll (Herriot et al. 2006). Durch den Einsatz von 25 W starken Lasern und leistungsstarken Echtzeitcomputern, die die Befehle für beide Korrekturspiegel und eine Verkippsungsplattform mit einer Frequenz von 800 Hz berechnen, bildet das NFIRAOS eine wichtige Voraussetzung für Leistungsfähigkeit des TMT (Macintosh and Troy 2006).

Um schließlich mit modernen Adaptiven Optik Systemen mithalten und diese auch übertreffen zu können, befindet sich auch für das TMT eine Extreme Adaptive Optik namens *Planet Formation Imager (PFI)* in der Planung. Folgende Komponenten sollen den PFI bei der Suche nach extrasolaren Planeten, deren spektralen Charakterisierung und bei der Erforschung der Planetenentstehung unterstützen (Macintosh, Troy, et al. 2006): Ein Pyramid-Wellenfrontsensor, der eine besonders große Anzahl an Moden atmosphä-

rischer Turbulenzen abdeckt. Zwei deformierbare MEMS Spiegel mit jeweils 128×128 Aktuatoren auf einem Durchmesser von 24 cm und ein leistungsstarker Rechner, der für diese Komponenten die richtigen Interaktionen berechnet. Die Anforderungen an solche Rechner sind immens. Dennoch sind die Forscher optimistisch und setzen sich eine Verarbeitungsrate von 4 kHz zum Ziel (Macintosh, Troy, et al. 2006). In einem Sichtfeld von $2'' \times 2''$ und einer minimalen Helligkeit des natürlichen Referenzsterns von 10 mag im H-Band soll der PFI Strehlzahlen von über 90% erreichen. Die zusätzliche Verwendung von Koronographen soll es dem TMT ermöglichen Planeten in einem Abstand von 5-10 AU zum Mutterstern beobachten zu können (Macintosh, Troy, et al. 2006). Mit dem sogenannten *Second-Earth Imager for TMT (SEIT)* soll es dem TMT als erstem Teleskop sogar gelingen erdähnliche Planeten in der habitablen Zone abzubilden. Um dies zu ermöglichen, planen die Forscher Kontrastverhältnisse von 10^{-8} im Abstand von $0,01''$ zu erreichen (Kotani et al. 2012). Mit der voraussichtlichen Fertigstellung im Jahr 2022 wird das TMT das größte optische Teleskop der Erde werden und zusammen mit der hochentwickelten Adaptiven Optik zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen beitragen.

3.10 European-Extremely Large Telescope

Das letzte in diesem Kapitel zu erwähnende Teleskop ist das *European-Extremely Large Telescope (E-ELT)*. Mit dem Erhalt der Baugenehmigung im Jahr 2014 steht der ESO nichts mehr im Weg, die Pläne für das größte Teleskop für Beobachtungen im optischen und infraroten Licht in die Tat umzusetzen (ESO 2014). Mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 39 m übertrifft das E-ELT alle bisherigen Teleskope und soll im Jahr 2024 als eines der wichtigsten astronomischen Forschungsinstrumente zum Einsatz kommen. Als Standort wurde der 3064 m Cerro Armazones in der chilenischen Atacamawüste, etwa 20 km südlich des Paranal Observatoriums, ausgewählt (ESO 2014). Von der besonderen Lage in der Wüste soll das E-ELT profitieren. Die Trockenheit und die Höhe sorgen für hervorragende atmosphärische Bedingungen. Dennoch ist die Beobachtung mit dem größten Teleskop der Welt ohne eine Adaptive Optik unvorstellbar. Der Einsatz von vielen bereits im Betrieb befindlichen Instrumenten trug unter anderem zur Klärung der Frage, ob und wie ein Adaptives Optik System für die nächste Generation der Großteleskope realisierbar ist, bei.

Folgende Adaptive Optik-Instrumente sollen dem E-ELT dabei helfen seine maximale Leistung auszuschöpfen: Das Beobachten mit beugungsbegrenzter Auflösung gilt als Stand der Technik und soll deshalb bereits von dem First Light-Instrument ELT-CAM erreicht werden (Liske 2015). Die ELT-CAM besteht aus dem MCAO-Instrument *Multi-conjugate Adaptive Optics RelaY (MAORY)* und der *Multi-AO Imaging Camera for Deep Observations (MICADO)*. Damit verbindet die ELT-CAM zwei Phase A Instrumente und bedient die Modi SCAO und MCAO mit beugungsbegrenzter Auflösung. Abhängig von den unterschiedlichen wissenschaftlichen Bereichen ändern sich die Anforderungen

an das Instrument. Für das Erforschen des galaktischen Zentrums beispielsweise strebt die ESO mit Hilfe der Adaptiven Optik neben der beugungsbegrenzten Auflösung auch hohe Strehlzahlen und eine astrometrische Genauigkeit (Auflösung unter optimalen Bedingungen) von $10 \mu''$ in den Wellenlängenbereichen J, H und K über einem Sichtfeld von $20''$ an (Liske 2015). Im Bereich des direkten Abbildens von Exoplaneten spielt die ELT-CAM eine ähnliche Rolle für das E-ELT wie NACO für das VLT (Liske 2015). Dank der höheren Winkelauflösung sind bei ähnlichen Kontrastverhältnissen mit der ELT-CAM Planeten im Bereich von etwa 2 AU auffindbar. Bei nahen Objekten (< 50 pc) sollen bereits bessere Ergebnisse erzielt werden als mit SPHERE (Liske 2015).

Ähnlich dem in Abschnitt 2.7.3 *Multi-Objects Adaptive Optics (MOAO)* erwähnten CANARY Instrument wird am E-ELT ein MOAO System namens EAGLE zum Einsatz im nahen infraroten Wellenlängenbereich kommen (Morris 2012). Das Ziel der MOAO ist es in einem großen Sichtfeld (etwa $5'$) mehrere ausgewählte kleine Bereiche mit jeweils einem individuellen deformierbaren Spiegel zu korrigieren. Um die atmosphärischen Schwankungen für mehrere verschiedene Objekte messen zu können, ist der Einsatz von künstlichen Laser Leitsternen zusätzlich zu den natürlichen Leitsternen notwendig. Am E-ELT werden sechs Natrium Laser für die verschiedenen Adaptive Optik Instrumente zur Verfügung stehen (Diolaiti et al. 2010). Im Rahmen des LTAO Instruments namens *Advanced Tomography with Laser for AO system (ATLAS)* sollen die Laser Leitsterne Licht für mehrere Wellenfrontsensoren liefern (Fusco, Clénet, et al. 2010). Aus der Kombination von sechs künstlichen und zwei natürlichen Referenzsternen soll das ATLAS beugungsbegrenzte Auflösung und Strehlzahlen von etwa 50% im K-Band und eine Himmelsabdeckung von mehr als 60% ermöglichen (Fusco, Clénet, et al. 2010).

Darüber hinaus befindet sich der *Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph (METIS)* in Planung (Bernhard Brandl et al. 2014). Der Einsatzbereich von METIS wird der Wellenlängenbereich von 3 - 14 μm sein (B Brandl et al. 2012). Instrumente, die im mittleren Infrarot arbeiten, müssen aufgrund der hohen thermischen Strahlung spezielle Anforderungen erfüllen. Zusätzlich erschwert die Absorption der Atmosphäre die Beobachtungen im mittleren Infrarot, sodass die Beobachtungen auf die spezifischen Wellenlängen Fenster L (3,45 μm), M (4,7 μm) und N (10 μm) beschränkt werden. Diese erschwerten Bedingungen führten in der Vergangenheit dazu, dass die erdgebundenen Teleskope bei Beobachtungen im mittleren Infrarot nicht mit den Weltraumteleskopen mithalten konnten (Bernhard Brandl et al. 2014). Die großen Erfolge des Spitzer Space Telescope führen zu hohen Erwartungen an den Einsatz des James Webb Space Telescope. Dennoch wird das E-ELT mit seiner Fertigstellung in der Lage sein diese Ungleichheit durch seine extreme Größe und der daraus resultierenden Vorteile gegenüber der Weltraumastronomie aufzuheben. Die relevanten Unterschiede, die die erdgebundene Infrarot Astronomie auszeichnen, sind: Deutlich höhere Winkelaufösungen, sehr hohe spektrale Auflösung und die vergleichsweise kostengünstige Implementierung von neu entwickelten

Instrumenten (Bernhard Brandl et al. 2014). Wie im Abschnitt 2.2.3 *Kolmogorov-Modell für atmosphärische Turbulenzen* beschrieben, sinkt der Einfluss der Atmosphärischen Turbulenzen mit wachsender Wellenlänge, sodass es für METIS deutlich einfacher sein sollte, beugungsbegrenzte Auflösung zu erreichen. Der wissenschaftliche Arbeitsbereich von METIS erstreckt sich von der Erforschung von Exoplaneten, Protoplanetarischen Scheiben über das Untersuchen von aktiven Galaxienkernen und Objekten im Sonnensystem bis hin zur Beobachtung von Galaxien mit starker Rotverschiebung (B Brandl et al. 2012).

Neben den bisher erwähnten Adaptiven Optik-Instrumenten wird ein weiteres Instrument am E-ELT zum Einsatz kommen, welches die herkömmliche Funktionsweise der Adaptiven Optik auf die Spitze treiben wird. Das sogenannte *Exo-Planet Imaging Camera and Spectrograph (EPICS)* Instrument kommt als XAO zum Einsatz (Kasper et al. 2008). Optimiert für die Beobachtungen im sichtbaren und nahen infrarot Bereich dient EPICS der direkten Abbildung und der spektralen Charakterisierung von extrasolaren Planeten. Die Messung der gestörten Wellenfront geschieht durch zwei Wellenfrontsensoren mit 80×80 und 200×200 Subaperturen (Kasper et al. 2008). Verkippungen und niedrige Ordnungen der Wellenfrontstörung werden durch die Spiegel M4 und M5 korrigiert. Die übrigen höheren Ordnungen werden schließlich durch einen 20 cm großen deformierbaren Spiegel mit 210×210 Aktuatoren ausgeglichen. Diese Schlüsselinstrumente sollen es EPICS ermöglichen, Kontrastverhältnisse von 10^{-8} bei einem Abstand von $0,3''$ und 10^{-9} bei Abständen von $0,1''$ und $0,3''$ bei Sternhelligkeiten von 7 mag im I-Band zu erreichen (Kasper et al. 2008). Mit dem Erfüllen dieser Ziele würden sich neue Möglichkeiten für den Forschungsbereich der Exoplaneten ergeben: Die Detektion von Gasriesen mit einem Orbit von 5 – 10 AU in der Nachbarschaft des Sonnensystems (< 20 pc). Das Abbilden und die spektrale Charakterisierung von warmen oder jungen jupiterähnlichen Planeten. Und die Detektion von nahen (< 10 pc) neptunähnlichen und Gesteinsplaneten. Schließlich soll das E-ELT mit EPICS auch in der Lage sein, Exoplaneten in der habitablen Zone aufspüren zu können (Kasper et al. 2008).

Abbildung 26 zeigt eine Monte Carlo-Simulation der potentiell für das E-ELT sichtbaren Exoplaneten. Die Monte Carlo-Simulation basiert auf einer statistischen Analyse der bisher entdeckten Exoplaneten. Aus Messungen zur Verteilung von Masse und Periode der Exoplaneten lassen sich Hinweise zur Häufigkeit bestimmter Parameter ableiten (Bonavita et al. 2012). Mit dem angestrebten Kontrastverhältnis und der entsprechenden Auflösung lässt sich mit der Monte Carlo-Simulation eine Aussage darüber treffen, welche Planeten mit EPICS zu beobachten sind und welche nicht. Hierbei stehen Punkte für nicht zu beobachtende Planeten und Punkte, die von einem Kreis umschlossen sind, für zu beobachtende Planeten (Kasper et al. 2008). Unter den möglichen direkten Beobachtungen von Exoplaneten befinden sich laut dieser Simulation hunderte Riesenplaneten, dutzende Neptun ähnliche Planeten und letztlich auch eine geringe Anzahl an Gesteinsplaneten

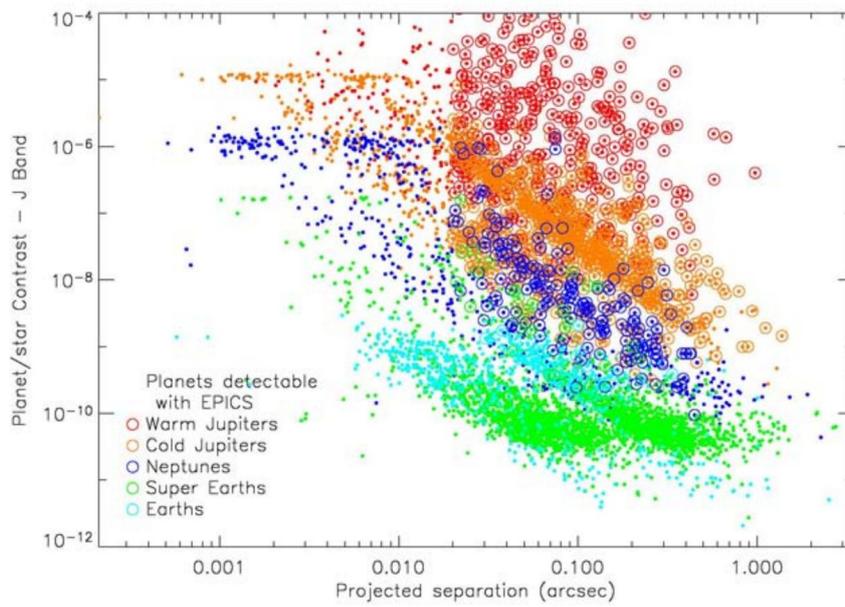


Abbildung 26: Monte Carlo-Simulation für die Detektion von Exoplaneten mit EPICS [Kasper et al. 2008]

(Kasper et al. 2008).

4 Die Adaptive Optik als Demonstrationsmodell

4.1 Motivation

Die Entwicklung eines didaktischen Modells dient in erster Linie der Veranschaulichung von etwas Größerem oder Komplexerem. „Wesentliche Teile eines physikalischen Systems werden im Rahmen eines Modells nachgebildet. Die Gestaltungselemente des Modells [...] machen die relevanten physikalischen Prinzipien leichter erfassbar als in komplexen, realen Systemen.“ (Kircher, Girwidz, and Häußler 2015, S.234)

Wie in Kapitel 2 *Die Funktionsweise der Adaptiven Optik* beschrieben, besteht die Adaptive Optik aus sehr unterschiedlichen Komponenten, deren Zusammenspiel ein sowohl wirkungsvolles als auch technisch anspruchsvolles astronomisches Instrument ergibt. Die Kombination aus geschicktem Erfindergeist und moderner Ingenieurskunst macht die Adaptive Optik zu einer Technik, die leicht begeistern kann. Betrachtet man die Erfindung der Adaptiven Optik als Antwort auf das Problem der „störenden Atmosphäre“ so scheint die Funktionsweise gleichermaßen bestechend wie wirkungsvoll. Durch das wiederholte Messen, Berechnen und Korrigieren in Echtzeit, gelingt es der Adaptiven Optik die störenden Einflüsse zu kompensieren. Festgehalten an dieser vereinfachten Funktionsweise lässt sich ein Modell realisieren, welches die Adaptive Optik treffend repräsentiert. Das Modell soll einerseits die Komplexität der Technik herunterbrechen, um die Funktionsweise verständlicher zu machen und andererseits für moderne Wissenschaft und Technik begeistern. Die Motivation für die Entwicklung eines solchen Demonstrationsmodells beruht somit in dem Ziel der Bildung. Als Veranschauungsmaterial soll es verwendet werden, um Interessierten aller Art eine Technik näher zu bringen, welche sonst meist nur an fernen Teleskopen zum Einsatz kommt.

4.2 Die Realisierung

Um die fundamentalen Merkmale hervorheben und die wesentliche Funktionsweise einer Adaptiven Optik verdeutlichen zu können, ist die Verwendung der elementaren Bestandteile wie Wellenfrontsensor, Kontrolleinheit und Wellenfrontkorrektor essentiell. Ebenfalls unumgänglich für den Bau des Demonstrationsmodell ist die Vereinfachung auf zwei Dimensionen. Dadurch wird ein übersichtlicher Aufbau gewährleistet, der flach auf einem Tisch liegend, vorgestellt werden kann. Der Aufbau orientiert sich stark an dem in Abbildung 2 dargestellten Funktionsprinzip. Abbildung 27 zeigt den Aufbau des Demonstrationsmodells mit allen integrierten Komponenten. Folgender Abschnitt erläutert die prinzipielle Arbeitsweise des Modells. Dabei sind die Komponenten, die in Abbildung 27 zu erkennen sind, hervorgehoben.

Da im Kern einer jeden Adaptiven Optik der deformierbare Spiegel für die notwendige Korrektur sorgt, bietet sich die Verwendung eines Spiegels als Korrekturlement an. Um jedoch die Bewegung des Spiegels und das Zustandekommen der Korrektur mit

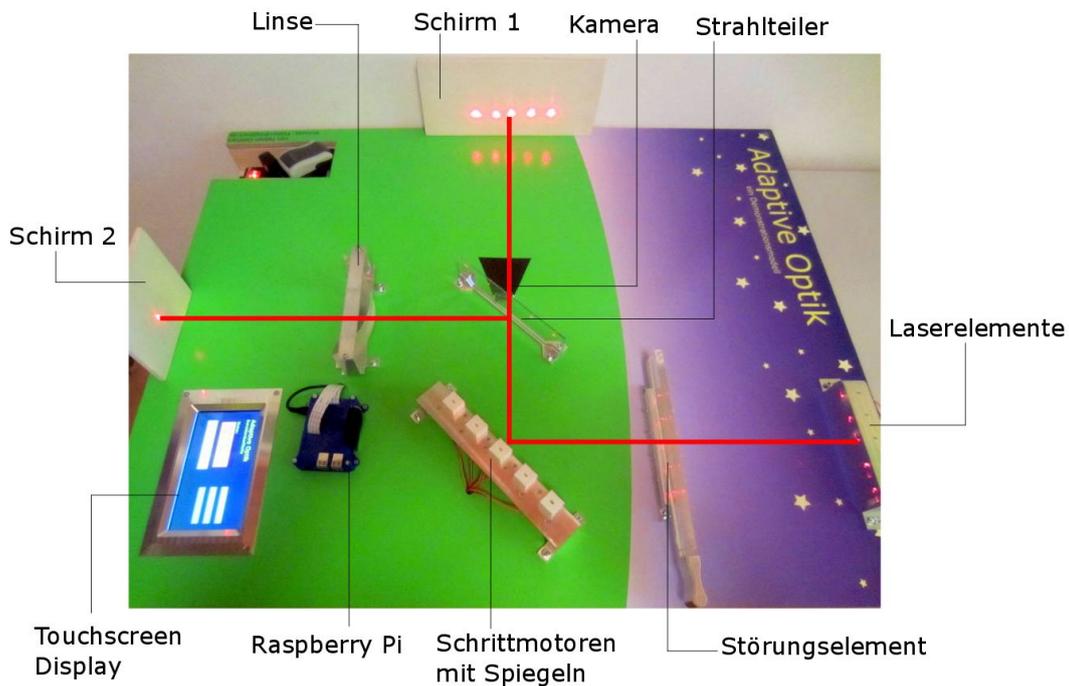


Abbildung 27: Der Aufbau des Demonstrationsmodells. Der Strahlengang des mittleren Lasers wurde rot eingezeichnet.

dem bloßen Auge wahrnehmen zu können, erscheint die Verwendung von mehreren kleinen, voneinander getrennten Spiegeln als geeigneter und einfacher umsetzbar als die Verwendung von nur einem (deformierbaren) Spiegel. Der Ausgleich der Störung erfolgt somit durch eine Rotation der einzelnen Spiegel (*Schrittmotoren mit Spiegel*). Dadurch realisiert das Modell folglich ausschließlich Korrekturen von sogenannten *tip tilt* Störungen, also Verkippungen in der Ausbreitungsrichtung. Diese Verkippungen spielen bei der Adaptiven Optik in der Realität eine wichtige Rolle und werden teils von separaten deformierbaren Spiegeln mit besonders großer dynamischer Reichweite korrigiert. Das zu korrigierende Bild stammt von fünf unabhängigen *Laserelementen*. Damit wird eine unendlich weit entfernte Punktquelle modelliert. Das Bild ist schließlich immer dann „scharf“ beziehungsweise erfolgreich korrigiert, wenn alle fünf Laserpunkte mit einer *Linse* auf einem *Schirm* (2) zu einem Punkt gebündelt werden können. Dies ist folglich immer dann der Fall, wenn die Laserstrahlen dank Korrektur parallel zueinander verlaufen. Um das „scharfe“ Bild darstellen zu können, wird ein *Strahlteiler* in den Strahlengang der Laser eingebracht, welcher ein Teil der Intensität zu einer entsprechenden Linse reflektiert. Treffen die Strahlen alle parallel (und somit auch im gleichen Abstand zueinander) auf die Linse, so werden diese zu einem Punkt gebündelt und das „scharfe“ Bild ist er-

kennbar. Um die Störung zu realisieren, wird ein Plexiglas mit unterschiedlich schräg geschliffener Austrittsfläche als *Störungselement* verwendet, welches die Laserstrahlen, ähnlich wie die unterschiedlich warmen beziehungsweise kalten Turbulenzzellen, durch unterschiedliche Brechungsindizes ablenkt. Durch hin- und herbewegen des Plexiglasses erfahren die Laserstrahlen eine Änderung der Ausbreitungsrichtung. Bereits kleine Ablenkungen reichen aus, um zu erkennen, dass die Laserstrahlen folglich nicht mehr zu einem Punkt gebündelt werden und das Bild somit „unscharf“ erscheint

Die Messung der Störung geschieht durch eine *Kamera*, die die Bewegung der Laserpunkte auf dem *Schirm* (1) beobachtet. Um die Störung analysieren und die entsprechende Korrektur berechnen zu können, wird der Mikrocontroller *Raspberry Pi* verwendet. Die Programmierung des Systems erfolgt in der Programmiersprache Python. Das Licht trifft nach dem Passieren der Störung zuerst auf das Korrekturlement und wird anschließend durch einen Strahlteiler auf zwei Schirme aufgeteilt. Ein Schirm dient der Messung der Störung durch die Kamera. Der zweite Schirm stellt das durch eine Linse gebündelte Bild des beobachteten Objekts dar. In Abbildung 27 ist der Strahlengang des mittleren Lasers eingezeichnet. Die anderen Laser verlaufen entsprechend parallel, bis hin zur Linse, an welcher alle Laser auf einen Punkt gebündelt werden. Um das Prinzip der Adaptiven Optik sozusagen in Echtzeit beobachten zu können, sollte der Computer die manuell erzeugten Störungen mit möglichst geringer Reaktionszeit korrigieren können.

4.3 Der Fertigungsprozess

Das Anfertigen des Demonstrationsmodells verlief über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Dabei wurden verschiedene Konfigurationen von Komponenten getestet, Ideen umgesetzt und Hürden gemeistert. Die dadurch gesammelten Erfahrungen und die Entwicklung des Modells werden in diesem Kapitel kurz dargestellt.

4.3.1 Die Komponenten

Der Einfachheit halber wurden die ersten Prototypen weitestgehend aus Holz gefertigt. Um eine höhere Präzision und detailreiche Komponenten zu erhalten, wurden später auch Bauelemente aus Aluminium gefräst und Kunststoffkonstruktionen aus dem 3D-Drucker verwendet. Außerdem verwendet wurden folgende Komponenten:

- Raspberry Pi 2 B+
- Raspberry Pi Kamera Module mit 1080p und 30 fps
- 5 × Laserelemente (1 mW, 3 V, $\lambda = 632$ nm)
- 5 × 5 V 28BYJ-48 Schrittmotor mit ULN2003 Driver Board
- 7 Zoll Touchscreen Display für Raspberry Pi

4.3.2 Version 1: Hardware und Bilderkennung

Die ersten beiden großen Aufgaben bestanden aus dem Vertraut machen mit der Hardware und dem Programmieren der Bilderkennungssoftware. Dank der mittlerweile weiten Verbreitung des Raspberry Pis, lassen sich im Internet jede Menge sehr ausführlicher Anleitungen und Hilfestellungen finden. Zu vielen Anwendungsbereichen existieren ausführliche Dokumentationen, welche von der Gemeinschaft aus Nutzern regelmäßig erweitert werden. Dadurch fiel der Einstieg in das Programmieren leichter als erwartet. Für die Programmierung der Bilderkennungssoftware wurde die *OpenCV (Open Source Computer Vision)* Library für Python verwendet. Mit den folgenden OpenCV Befehlen lassen sich die Koordinaten der Laserpunkte schließlich auslesen:

```
mask = cv2.inRange(image, lower_color, upper_color)
contours = cv2.findContours(mask)
coordinates = cv2.moments(contours)
```

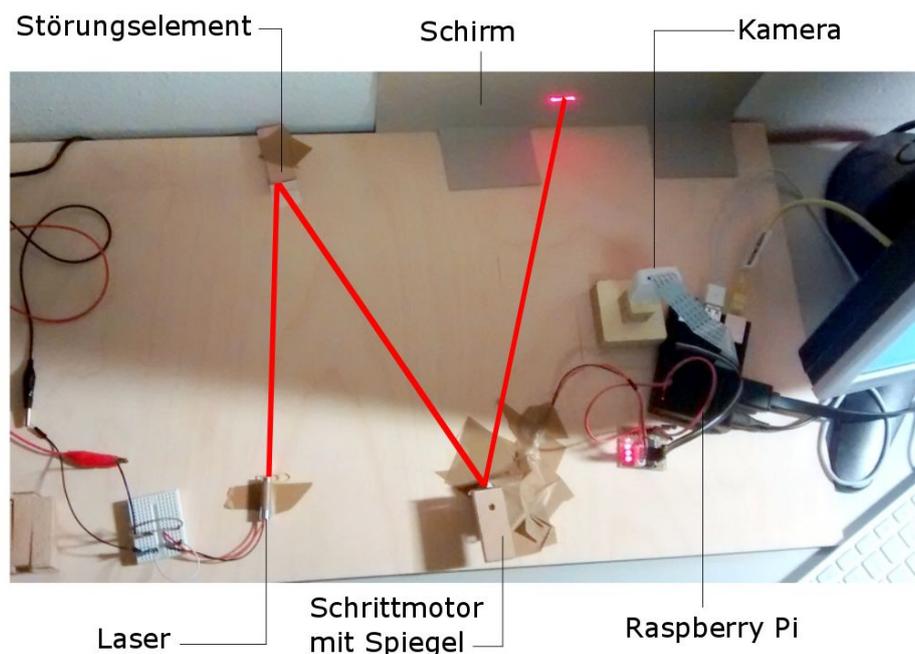


Abbildung 28: Modellversion 1: Mittels Bilderkennungssoftware erkennt die Kamera die Bewegung des Laserpunkts. Der Raspberry Pi berechnet den nötigen Weg, sodass der Laserpunkt immer wieder in der Mitte des Schirms ankommt.

Mit dem ersten Testaufbau, wie in Abbildung 28 dargestellt ist, wurde ein Programm geschrieben, welches den Laserpunkt immer in die Mitte des Bildes bringen sollte. Das

vom Laserpointer erzeugte Licht wird durch zwei kleine Spiegel abgelenkt und trifft anschließend auf einen Schirm, der von der Kamera beobachtet wird. Der erste Spiegel soll das „störende Element“ darstellen. Hier soll durch Wackeln eine manuelle Störung erzeugt werden können. Der zweite Spiegel ist auf einem Schrittmotor befestigt, welcher vom Raspberry Pi gesteuert werden kann. Ändert der Laserpunkt nun seine Position, berechnet der Computer aufgrund der neuen Koordinaten ein Signal für den Motor, um den Punkt wieder in die Bildmitte zu bewegen. Aus dem Aufbau wird deutlich, dass die Ablenkung des Laserstrahles durch das Bewegen des ersten Spiegels nur sehr klein sein darf, damit der Laserpunkt den zweiten Spiegel nicht verlässt. Die Rotation der verwendeten 28BYJ-48 Schrittmotoren basiert auf vier individuell ansteuerbaren Phasen und einem Getriebe mit einer Übersetzung von 1/64. Dadurch lassen sich Schrittwinkel von bis zu $0,09^\circ$ erreichen. Das bedeutet, dass der Schrittmotor für eine ganze Umdrehung 4096 Schritte benötigt. In dem Video „28BYJ-48 Stepper Motor and ULN2003 Driver Intro“³ von Bret Stateham wird die Funktionsweise des Schrittmotors in Kombination mit dem Driver Board sehr aufschlussreich beschrieben.

4.3.3 Version 2: Fünf Laser und deren Zuordnung

Während an der Programmierung des Systems gearbeitet wurde, wurde der Aufbau immer weiter entwickelt, sodass schließlich auch fünf Laserstrahlen gleichzeitig abgelenkt und korrigiert werden konnten, siehe Abbildung 29. Eine neue Herausforderung dabei war die Zuordnung der Laserpunkte zu den entsprechenden Spiegeln und Motoren.

Zuerst wurden die Laserpunkte anhand ihrer Koordinaten sortiert, sodass ihnen von links nach rechts die Zahlen 1 bis 5 zugeordnet wurden. Der Videostream der Kamera ist durch die Verwendung einer *while*-Schleife realisiert. Ein neues Programm zur Zuordnung und Ausrichtung der Laserpunkte auf dem Schirm wurde entwickelt. Es sollte die Laserpunkte den entsprechenden Schrittmotoren erfolgreich zuordnen und diese aus jeder beliebigen Stellung soweit drehen, dass die Laserstrahlen am Ende des Programms alle parallel und in der richtigen Reihenfolge auf dem Schirm erscheinen. Dies wurde folgendermaßen umgesetzt: Das Programm wartet unabhängig davon, welches Bild die Kamera zuerst sieht, auf die Bewegung eines Laserpunkts. Führt nun ein Motor eine Bewegung in eine Richtung aus und passiert dabei der entsprechende Laserpunkt das Sichtfeld der Kamera, so kann der Computer dem gerade bewegten Motor die gefundenen Koordinaten zuordnen. Findet die Kamera keine Bewegung, wird der Motor automatisch solange weiter bewegt, bis der Laserpunkt schließlich (spätestens nach einer ganzen Umdrehung) den Schirm passiert. Nach dieser Methode werden alle fünf Motoren nacheinander ihrem entsprechenden Motor zugeordnet. Das beschriebene Prinzip soll durch den folgenden Pseudo-Code veranschaulicht werden, wobei ein Durchlauf immer als ein Bild betrachtet werden kann:

³<https://www.youtube.com/watch?v=B86nqDRskVU>

```

while laserpointsmatched is False:
    loadimage(image)
    findnewcoordinates(image)
    movement = oldcoordinates - newcoordinates
    findmovementonscreen(image):
        if movement > threshold:
            assign currentstepper to laser(newcoordinates)
            currentstepper = stepper +1
    movestepper(currentstepper)
    newcoordinates = oldcoordinates
if laststepper is assigned:
    laserpointsmatched = True

```

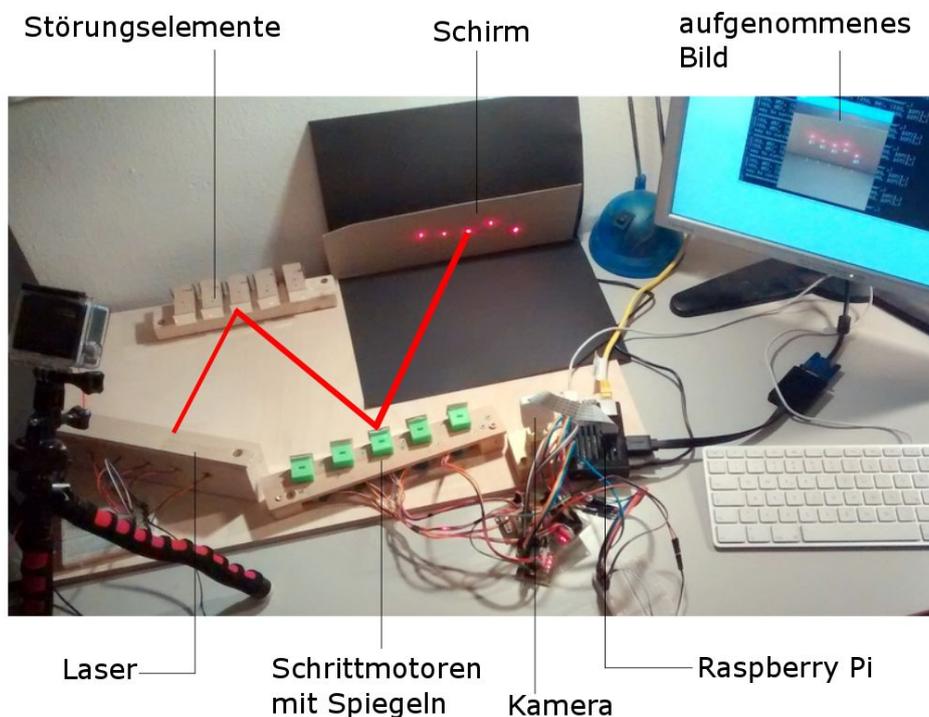


Abbildung 29: Modellversion 2: Neue Holzkomponenten und gleichzeitige Verwendung von fünf Lasern

Bei dem Modell in Abbildung 29 wurden alle wichtigen Komponenten aus Holz gefertigt und auf einer Platte befestigt, um den Aufbau stabiler zu gestalten. Die ersten fünf Spiegel (in Abbildung 29 als Störungselement gekennzeichnet) stellen die *Störung*

dar. Ihre Position lässt sich durch Drehen minimal verändern, sodass die Laserstrahlen abgelenkt werden. Die fünf nächsten Spiegel (im Bild grün) sind über Kunststoffwürfel mit den Schrittmotoren verbunden und befinden sich im gleichen Abstand zueinander wie die Laserstrahlen. Um mit verschiedenen Kontrastverhältnissen arbeiten zu können, wurde das Sichtfeld der Kamera abgedunkelt. Somit ließen sich Farbgrößen ableiten, welche für die Erkennung der Laserpunkte auf dem Schirm notwendig waren. Aufgrund der hohen Intensität der Laser erreicht die Kamera allerdings ihre Sättigung und die Punkte erscheinen eher weiß statt rot. Als Farbgrößen verwendet OpenCV den *RBG-Farbraum*. Die Reihenfolge ist als Standardeinstellung jedoch *GBR*. Bei den allermeisten Lichtverhältnissen werden die vermeintlich roten Laserpunkte mit folgenden Farbgrößen problemlos erkannt:

```
lower_color = (150, 150, 180)
upper_color = (255, 255, 255)
```

4.3.4 Version 3: Präzision und Didaktik

Das Modell wies trotz der neuen Holzbefestigung einige gravierende Mängel auf. Obwohl die Bohrungen für die Halterung der Laserelemente mit einer Standbohrmaschine vorgenommen wurden, verliefen die Laserstrahlen nicht parallel. Auf Distanzen von mehr als 3 m überkreuzten sich diese sogar. Des Weiteren berührte die Achse eines Motors die Holzhalterung, sodass durch die entstehende Reibung keine exakten Bewegungen durchgeführt werden konnten. Das manuelle Einbringen einer Störung durch das Drehen der Spiegel schien prinzipiell zu funktionieren, war jedoch aus didaktischer Sicht nicht sehr sinnvoll (siehe Abschnitt 4.5 *Didaktik*). Darüber hinaus sollten sichtbare Kabelverbindungen versteckt werden, um das Modell überschaubarer zu gestalten. Um diese Probleme zu lösen, wurden die wichtigsten Komponenten durch Aluminiumteile ersetzt. Das dafür essentielle Erstellen von 3D-Modellen mit der Software *Autodesk Inventor 2016* konnte dank integrierter Tutorials schnell erlernt werden. Eine Auswahl der erstellten 3D-Modelle wird durch Abbildung 30 gegeben. Das Fertigen der 3D-Modelle wurde freundlicherweise von der Feinmechanikwerkstatt des Max-Planck-Instituts für Astronomie Heidelberg übernommen. Das Fräsen der konstruierten 3D-Modelle stellte für die vollautomatisierten 5-Achsen CNC Fräsen keine sonderlich schwierige Aufgabe dar, sodass das Erstellen der einzelnen Komponenten nicht viel Zeit beanspruchte. Dank dieser neuen Bauelemente konnte schließlich die gewünschte Präzision erreicht werden.

Eine Auswahl der gefertigten Aluminiumkomponenten ist in Abbildung 30 dargestellt. Abbildung 31 zeigt die Modellversion 3 mit den neuen Komponenten. Die Laserstrahlen sind durch die neue Halterung ausreichend parallel. Die Schrittmotoren laufen frei und ohne Reibung. Die Spiegel als Störungselement wurden durch ein Plexiglas ersetzt, welches auf einer Schiene befestigt ist. Das Glas wurde als erstes Element in den



Abbildung 30: Auswahl der aus Aluminium bzw. Plexiglas gefrästen 3D-Modelle

Lauf der Laserstrahlen gebracht. Beim Durchqueren des Glases erfahren die Laserstrahlen aufgrund leichter Verkippungen in der Austrittsfläche kleine Bewegungsänderungen. Gemäß des Snellius'schen Brechungsgesetzes aus Gleichung 2.2 werden die Lichtstrahlen beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium vom Lot weg gebrochen. Mit dieser Umsetzung kann eine Störung realisiert werden, welche den maximalen Ablenkwinkel begrenzt und somit gewährleistet, dass die Laserstrahlen nie zu weit abgelenkt werden und die nachfolgenden Spiegel nicht verlassen. Der maximale Verkippungswinkel lässt sich über trigonometrische Beziehungen berechnen und beträgt für diesen Aufbau maximal $\phi = 1,2^\circ$. Die Verkippungen sind mit dem bloßen Auge nur schwer zu erkennen. Durch diese Art des Aufbaus kommt das Modell der Realität deutlich näher. Das transparente Plexiglas steht dabei für die turbulente Atmosphäre. Das Bewegen der Schiene verursacht, ähnlich zu den sich bewegenden atmosphärischen Schichten, Änderungen des Brechungsindizes und somit eine Richtungsänderung der Lichtstrahlen. Da die Laserstrahlen beim Durchqueren des Glases jedoch auch immer auf die Kanten der Verkippungen treffen, dehnen die Laserpunkte dadurch aus. Dieser unerwünschte Effekt sollte durch das wiederholte Schleifen des Glases reduziert werden. (Da sich das Glas zum Zeitpunkt der Aufnahme des Bildes gerade in der Werkstatt befand, ist in Abbildung 31 nur die Halterung für das Glas zu sehen.)

Zusätzlich wurde ein Touchscreen Display an den Raspberry Pi angeschlossen, um die Bedienung des Modells zu vereinfachen. Durch die Verwendung von zwei gleich großen

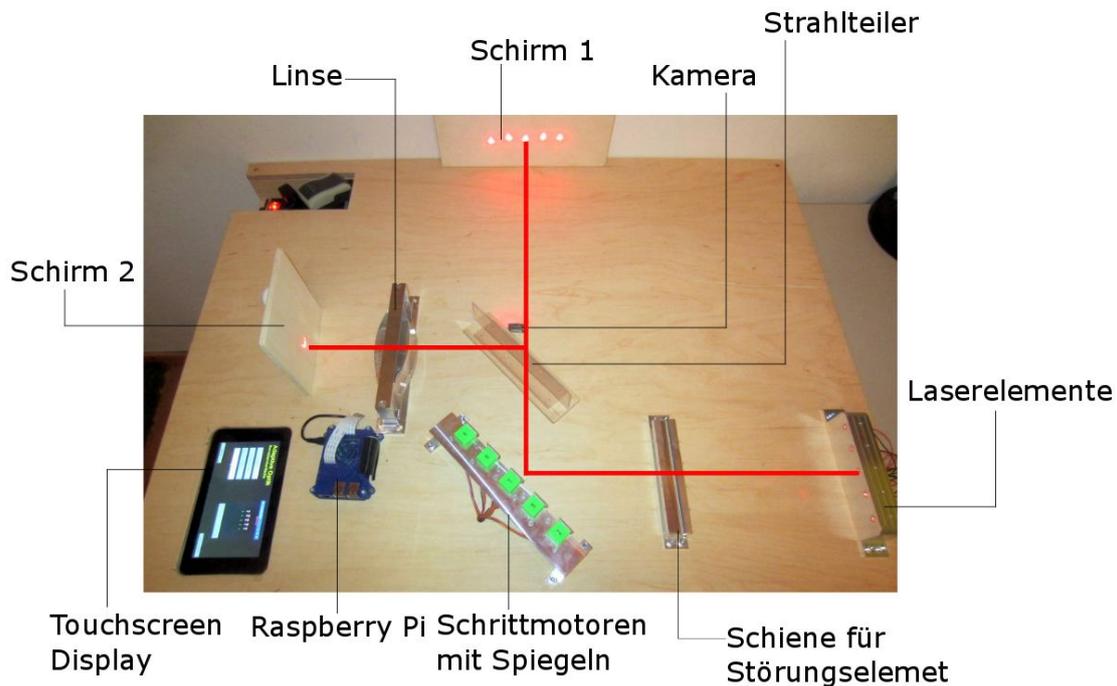


Abbildung 31: Modellversion 3: Verbesserte Präzision durch die Verwendung von Aluminiumkomponenten und geänderte Anordnung dank neuem Störungselement

Holzplatten wurde ein Zwischenraum geschaffen, in dem alle Kabelverbindungen und die fünf ULN2003 Driver Boards verstaut werden konnten. Darüber hinaus kommt zum ersten Mal ein Strahlteiler zum Einsatz. Der Strahlteiler soll der Aufteilung des Lichtes auf zwei unabhängige Schirme dienen. Für den Strahlteiler eignen sich herkömmliche Kunststofffolien wie man sie zum Beispiel zur Abdeckung von Spiralbindungen verwendet, aber auch dünne Plexiglasplatten aus dem Baumarkt. Die Wahl fiel für dieses Modell auf die Plexiglasplatte, da diese aufgrund ihrer Festigkeit die Laserstrahlen nicht unerwünscht ablenkt. Jedoch ist zu beachten, dass das Licht der Laserstrahlen sowohl an der Vorder- als auch an der Rückseite der Platte reflektiert wird. Um der Entstehung von zwei reflektierten Bildern entgegenzuwirken, empfiehlt es sich möglichst dünne Plexiglasplatten als Strahlteiler zu verwenden. Das Licht, welches den Strahlteiler durchquert wird von der Kamera erfasst. Der andere Teil, welcher vom Strahlteiler reflektiert wird, wird durch eine Linse auf einem zweiten Schirm zu einem Punkt gebündelt. Dadurch wird das zu untersuchende Objekt als „scharfes“ Bild dargestellt.

4.3.5 Version 4: Das finale Modell

Die in der Modellversion 3 verwendete Linse wurde anhand des Linsengesetzes konstruiert und aus Plexiglas gefertigt. Da große, symmetrische Sammellinsen wie diese jedoch Abbildungsfehler erzeugen, war das Bündeln der fünf Laserpunkte zu einem Fokus mit dieser Linse nicht möglich. Achsenferne Strahlen wurden deutlich stärker gebrochen als achsennahe Strahlen. Um das Darstellen des reflektierten Bildes als auf einen Punkt fokussiertes, „scharfes“ Bild schließlich doch zu erreichen, musste eine neue Linse konstruiert werden, welche die erwähnten Abbildungsfehler berücksichtigt. Unterstützung bei der Simulation einer solchen Linse bietet die Software *Zemax OpticStudio*. Mit ihr konnten die gewünschten Parameter wie Fokus, Breite und Material eingegeben und die entsprechenden gesuchten Radien berechnet werden. Die neue Linse ist in Abbildung 32 dargestellt. Durch asphärische Radien und unterschiedlich stark gekrümmte Oberflächen lässt sich schließlich eine Linse simulieren, die den gewünschten Anforderungen gerecht wird. Die Simulation zeigt deutlich, dass selbst die äußersten Lichtstrahlen erfolgreich zum Fokus gebündelt werden.

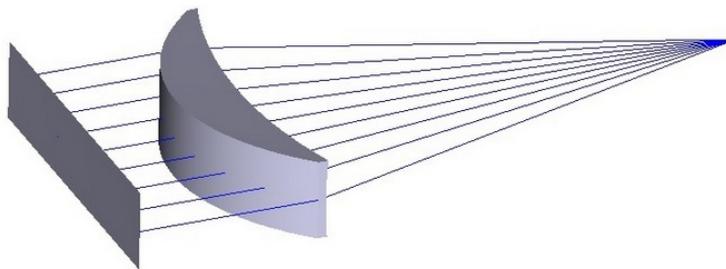


Abbildung 32: Simulation einer asphärischen Linse zum Bündeln der Laserstrahlen zu einem Punkt

Ebenfalls neu designt wurde der Hintergrund des Modells. Mit dem Vektorgrafikprogramm *Inkscape* wurde ein Poster erstellt, welches die Positionierung der Adaptiven Optik auf der Erde und unter dem Sternenhimmel verdeutlicht. Durch die Kenntlichmachung des Horizonts und der Positionierung der Laserelemente im Umfeld von Sternen, wird dem Beobachter der prinzipielle Ablauf verdeutlicht. Abbildung 33 zeigt den finalen Aufbau des Demonstrationsmodells. Das Bild entspricht der am Anfang des Kapitels 4 *Die Adaptive Optik als Demonstrationsmodell* gezeigten Abbildung 27. Im Vergleich zu Version 3 wurden mehrere Verbesserungen vorgenommen. Die asphärische Linse wurde installiert. Somit lässt sich das Fokussieren der fünf Laserstrahlen auf einen Punkt deutlich besser erreichen. Die Schiene mit dem Plexiglas zur Modellierung der atmosphärischen Störungen wurde installiert. Die Kamera wird durch ein schwarzes „Objektiv“

aus Papier hervorgehoben. Dadurch lassen sich zusätzliche störende Reflexionen, welche bei eher dunklen Lichtverhältnissen zu weiteren fälschlicherweise erkannten Laserpunkten führen, vermeiden. Durch neue Kunststoffwürfel aus dem 3D-Drucker ließ sich ein stabileres Verbindungsstück zwischen Spiegel und Motorenachse herstellen, sodass sich die Laserstrahlen schließlich alle in der gleichen Ebene bewegten.

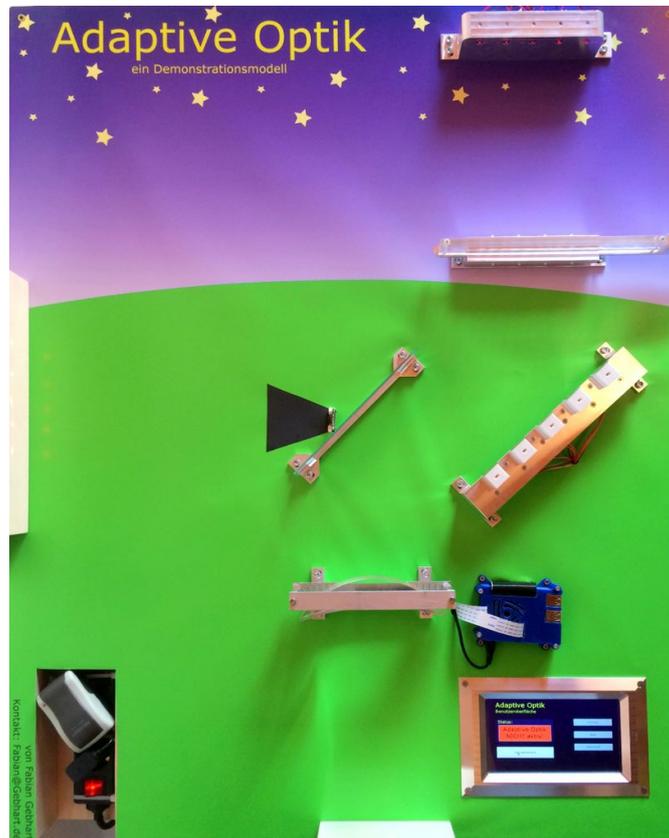
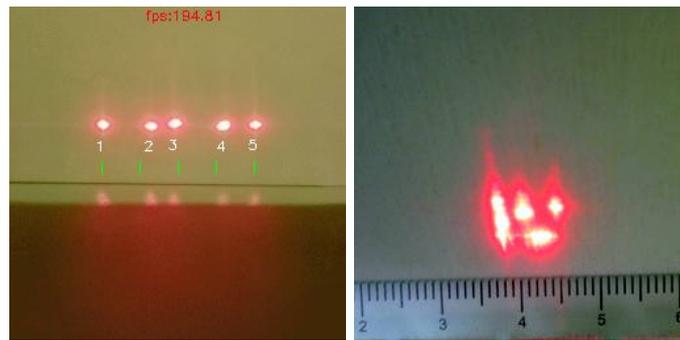


Abbildung 33: Modellversion 4: Grafische Gestaltung des Hintergrunds, Verwendung der neuen Linse und der neuen Plexiglasplatte

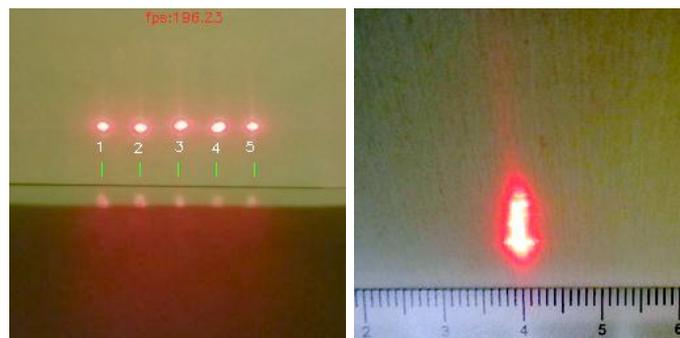
Da das wiederholte Schleifen des Plexiglases auf das Ausdehnen der Laserpunkte leider keinen erkennbaren Effekt erzielte, wurde für die letzte Version des Modells eine neue Plexiglasplatte konstruiert. Dabei wurden die Kanten der Verkippungen in der Austrittsfläche möglichst rund gestaltet. Durch das Verwenden von quadratischen Funktionen als Verlauf der Austrittsfläche konnten scharfe Kanten vermieden und dennoch Verkippungswinkel von bis zu $1,2^\circ$ gegenüber der Eintrittsfläche realisiert werden. Der Effekt ließ sich dadurch zwar verringern, jedoch nicht vollkommen umgehen. Das Ausdehnen der Laserstrahlen wurde somit von etwa 2 cm auf 1,5 cm reduziert.

Um die Sichtbarkeit der optischen Störung zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 34 vier

Aufnahmen von den beiden, im Modell installierten, Schirmen. Abbildung 34 (a) und (c) zeigen die Aufnahmen der Raspberry Pi Kamera von den fünf Laserpunkten auf Schirm 1. Hier lässt sich die Abdunkelung durch das schwarze Papier erkennen. Am oberen Bildrand kann die Anzahl der Bilder pro Sekunde (fps) abgelesen werden, welche bei der Verbesserung der Programmierung als wichtiger Indikator für eine flüssige Durchführung stets zu beobachten war.



(a) Schirm 1: unkorrigiertes Bild der fünf Laserpunkte (b) Schirm 2: unkorrigiertes Bild der gebündelten Laserpunkte



(c) Schirm 1: korrigiertes Bild der fünf Laserpunkte (d) Schirm 2: korrigiertes Bild der gebündelten Laserpunkte

Abbildung 34: Aufnahmen der unterschiedlichen Positionen der Laserpunkte auf den beiden Schirmen. Ohne Korrektur (oben) und mit Korrektur (unten)

Ebenfalls zu erkennen sind die grünen Referenzlinien. Sie befinden sich an jenen x -Koordinaten, zu welchen die entsprechenden Laserpunkte bei der Korrektur bewegt werden müssen. Da das aufgenommene Bild der Kamera das Format 256×256 Pixel hat, wurden die Referenzpunkte im Programm entsprechend festgelegt:

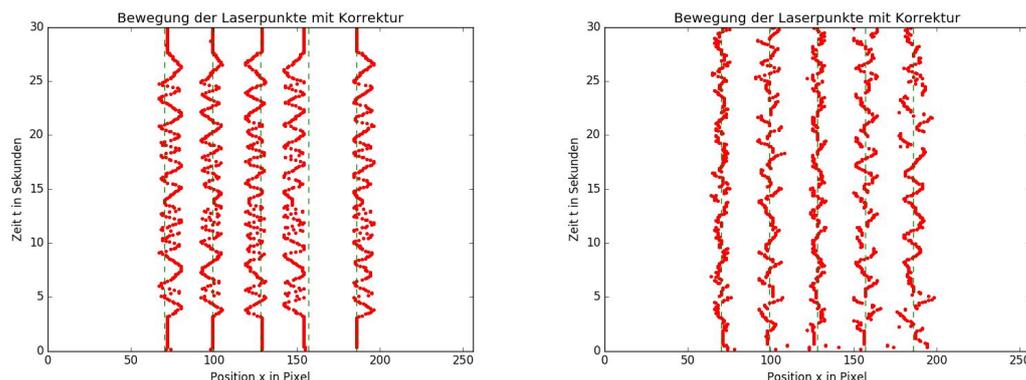
```
goal_position = [70, 99, 128, 157, 186]
```

Somit kann gewährleistet werden, dass die Laserpunkte auf Schirm 1 den gleichen Ab-

stand zueinander haben wie an deren Ursprung, in der Laserhalterung. Die oberen beiden Bilder in Abbildung 34 sind jeweils ohne Korrektur und die unteren beiden mit Korrektur aufgenommen. Abbildung 34 (b) und (d) wurden mit einer unabhängigen Kamera aufgenommen und zeigen Bilder von Schirm 2. Dabei wird der Unterschied zwischen Aufnahme mit und ohne Korrektur deutlich. Ist die Adaptive Optik eingeschaltet, so werden die Laserstrahlen auf einen Punkt gebündelt, welcher eine Ausdehnung von etwa 4 mm aufweist. Ohne Korrektur dehnen sich die Laserpunkte durch die Störung auf einen Bereich von bis zu 10 mm aus. Dank der neuen Linse lässt sich somit die Wirkung der Korrektur auf das fokussierte Bild deutlich sichtbar machen.

4.4 Zeitlicher Verlauf der Korrekturen

Um den zeitlichen Verlauf der Korrekturen nachvollziehen zu können, wurden die Daten der Kamera ausgelesen und in einem Diagramm dargestellt. Da die Bilderkennungssoftware zu jedem Bild die Koordinaten der erkannten Laserpunkte ermittelt, lassen sich diese auch abspeichern und als Funktion der Zeit auftragen. Aufgrund der Zweidimensionalität des Modells sind dabei nur die x-Koordinaten interessant.



(a) Koordinaten der Laserpunkte bei Störungen ohne Korrektur (b) Koordinaten der Laserpunkte bei Störungen mit Korrektur

Abbildung 35: Plots der ausgegebenen x-Koordinaten der Laserpunkte aufgetragen gegen die Zeit

Abbildung 35 zeigt die beiden Diagramme der aufgezeichneten Daten. Zum Erzeugen der Daten wurde das Störungselement über einen Zeitraum von etwa 30 s einmal vollständig hin- und herbewegt. Der Umkehrpunkt befindet sich bei etwa 15 s. Mit diesen Daten ließen sich zwei Diagramme erstellen, welche einen qualitativen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der beiden Modi ermöglichen. Zu sehen sind die rot eingetragenen x-Koordinaten der Laserpunkte im zeitlichen Verlauf. Ebenfalls eingetragen sind die grünen Referenzlinien, hier gestrichelt dargestellt. Abbildung 35 (a) zeigt die Bewegung der Punkte ohne

Korrekturen. Abhängig von der Ausgangsposition der jeweiligen Laserstrahlen auf dem Störungselement schwanken die Werte der Positionen mehr oder weniger um die Referenzlinien. Hierbei wird deutlich, inwieweit die Verkippungen in der Austrittsfläche des Störungselements die Position der Laserpunkte beeinflussen. Im Vergleich dazu werden die Schwankungen der Werte um die Referenzlinien in Abbildung 35 (b) regelmäßig unterbrochen. Die aktivierte Korrektur richtet die Schrittmotoren immer wieder neu aus und bringt die Laserpunkte somit wieder zurück auf die gewünschte Position. Dadurch befinden sich die Laserpunkte deutlich häufiger auf ihren Referenzpositionen. Dennoch werden die Laserstrahlen kontinuierlich abgelenkt, sodass die Korrektur aufgrund der Reaktionszeit des Systems der Störung immer etwas hinterherhinkt.

Bewegt man die Schiene mit dem Störungselement nicht kontinuierlich mit konstanter Geschwindigkeit, sondern in kurzen Intervallen mit kleinen Pausen, so bekommt das System etwas mehr Zeit für die Durchführung der Korrektur und der zeitliche Verlauf wird um so deutlicher. Abbildung 36 lässt eine genauere Abschätzung der Reaktionszeit und der Genauigkeit des Systems zu.

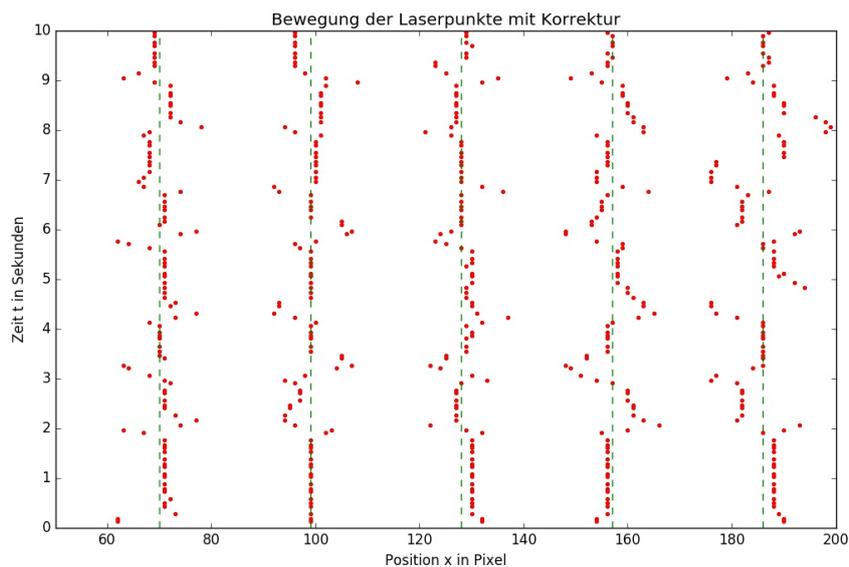


Abbildung 36: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Korrekturen durch das Bewegen des Störungselements in Intervallen

Die Ausgabe der Daten wurde bei dieser Messung über einen Zeitraum von 10s durchgeführt. Wie deutlich zu erkennen ist, wurde das Störungselement dabei sieben mal bewegt und wieder abgestoppt. Das Bewegen der Störung ist durch ein Abweichen der Laserpunkte von der Referenzlinie erkennbar. Bereits nach einem Bruchteil einer Sekunde setzt die Korrektur ein und die Laserpunkte werden zurück auf die Referenzpositionen

bewegt. Darüber hinaus ist im Diagramm zu erkennen, dass die Laserpunkte nicht immer exakt auf die Referenzposition bewegt werden, sondern auch in einem Bereich von ± 2 Pixel um die Referenzposition herum, als erfolgreich korrigiert, platziert werden. Durch das Einfügen dieser Zone wird das Oszillieren der Laserpunkte um den Referenzwert vermieden. In verschiedenen Ausführungen des Programms wurden Korrekturen erreicht, die die Laserpunkte sowohl auf eine Zone von ± 1 Pixel als auch exakt auf die Zielkoordinate bewegten. Jedoch führte diese scheinbare Verbesserung der Genauigkeit neben dem Oszillieren der Schrittmotoren zu keiner erkennbaren Verbesserung im fokussierten Bild auf Schirm 2. Da das Ausdehnen der Laserpunkte durch die Verkippungen im Störungselement auf Schirm 1 von 1,5 cm einer Breite von etwa 20 Pixel entspricht, wird deutlich, dass das Einführen eines Bereichs von ± 2 Pixel um die Zielkoordinate keine Auswirkung auf die optische Genauigkeit hat. Schließlich wurde durch das Abwägen der Größe der Zone und das Einfügen eines sogenannten *gain*-Faktors ein System realisiert, welches allen anfänglich erwähnten Ansprüchen gerecht wird. Der *gain*-Faktor liegt zwischen 0 und 1 und wirkt als Dämpfung bei der Annäherung der Laserpunkte an die Zielposition. Je weiter der Punkt vom Ziel entfernt ist desto größer sind die Schritte der Schrittmotoren. Je kleiner die Entfernung zum Ziel ist, desto kleiner werden auch die Schritte. Dadurch wird vermieden, dass die Laserpunkte über das Ziel hinaus oszillieren.

4.5 Bedienung

Um eine intuitive und einfache Bedienung zu ermöglichen, wurde der Programmablauf der grafischen Benutzeroberfläche möglichst selbsterklärend gestaltet. Große übersichtliche, prägnant betitelte Buttons ermöglichen eine benutzerfreundliche Bedienung. Ein in die Benutzeroberfläche integriertes Statusfeld gibt darüber hinaus Auskunft über den aktuellen Zustand des Systems. Abbildung 37 zeigt einen Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche. Dem Benutzer stehen folgende Wahlmöglichkeiten zur Auswahl: *Start Adaptive Optik*, *Anleitung*, *Reset* und *Sicht der Kamera*. Wird der Button *Start Adaptive Optik* betätigt, erscheint im Status Feld ein grünes Textfeld mit dem Hinweis „Aktiv“, aus dem *Start Adaptive Optik*-Button wird ein *Stop*-Button und das Hauptprogramm zur Korrektur der Störungen wird im Hintergrund ausgeführt. Das Programm läuft anschließend solange aktiv, bis der Benutzer es durch das Betätigen des *Stop*-Buttons beendet. Der Button *Anleitung* öffnet ein neues Fenster, welches eine kurze Erklärung zur Benutzung des Demonstrationsmodells zur Verfügung stellt. Mit dem Auswählen der *Reset*-Option werden alle Laserpunkte, nach der in Abschnitt 4.3.3. *Version 2: Fünf Laser und deren Zuordnung* beschriebenen Methode, den Schrittmotoren neu zugeordnet und auf die entsprechende Referenzposition bewegt. Nach dem erfolgreichen Ausrichten auf die gewünschte Position beendet sich das Programm selbstständig. Der Button mit der Aufschrift *Sicht der Kamera* zeigt das von der Kamera aufgenommene Bild an. Gleichzeitig erscheint im Statusfeld ein gelbes Textfeld mit der Aufschrift „Sicht der Kamera aktiv“.

Analog zum Hauptprogramm lässt sich der aktuelle Prozess durch den *Stop*-Button beenden, sodass im Statusfeld ein rotes Textfeld mit der Aufschrift „Deaktiviert“ erscheint.



Abbildung 37: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche zur Bedienung des Systems

Damit eine problemlose Benutzung des Demonstrationsmodells ermöglicht wird, bietet sich folgender Ablauf an: Nach dem Einschalten der Stromversorgung des Modells fährt der Raspberry Pi automatisch hoch und startet direkt nach dem Bootvorgang die Benutzeroberfläche. Als Erstes sollte die Anleitung angezeigt werden, welche einen groben Überblick vom Modell vermittelt. Mit dem Programm *Sicht der Kamera* lässt sich überprüfen, ob die Laserpunkte unter der aktuellen Umgebungshelligkeit erfolgreich erkannt werden können. Gegebenenfalls muss die Umgebungshelligkeit etwas abgedunkelt werden. Falls zusätzlich nicht alle Laserpunkte in der richtigen Reihenfolge auf dem Schirm zu sehen sind, empfiehlt es sich die *Sicht der Kamera* zu beenden und das *Reset*-Programm zu starten. In seltenen Fällen klappt die Zuordnung nicht beim Ersten Versuch, sodass das *Reset*-Programm wiederholt werden muss. Befinden sich schließlich alle Laserpunkte auf ihren entsprechenden Positionen, kann das Hauptprogramm ausgeführt werden. Bei der Ausführung des Hauptprogramms können folgende Probleme auftreten, die den reibungslosen Ablauf behindern. Das zu schnelle Bewegen der atmosphärischen Störungen kann dazu führen, dass zwei Laserpunkte aufeinander treffen. Das Programm erkennt die beiden Punkte folglich als nur einen Punkt. Um die Korrektur der fünf Laserpunkte wiederherzustellen reicht es aus, das Störungselement langsam etwas weiter zu bewegen, damit sich die beiden Laserpunkte wieder auseinander bewegen. Eine zu helle Umgebung kann dazu führen, dass auf dem Schirm weitere Farbwerte gefunden werden, die in den angegebenen Grenzen aus Abschnitt 4.3.3. *Version 2: Fünf Laser und deren Zuordnung* liegen. Da sich die Koordinaten der dadurch gefundenen, vermeintlichen Laserpunkte mehr oder weniger willkürlich über den Schirm verteilen, erscheint die darauf folgende Korrektur der Schrittmotoren folglich ebenso willkürlich. Die Störung lässt sich durch

das Abdunkeln des Raumes und der anschließenden Benutzung des *Reset*-Programms wieder beheben.

Nach der erfolgreichen Benutzung des Aufbaus kann der Raspberry Pi heruntergefahren und die Stromversorgung getrennt werden. Die grafische Benutzeroberfläche lässt sich beenden, indem nacheinander drei „unsichtbare Buttons“ gedrückt werden. Diese befinden sich in der rechten oberen, der rechten unteren und der linken unteren Ecke. Das Betätigen der Buttons in dieser Reihenfolge beendet die Benutzeroberfläche und bringt den Benutzer zurück in den Desktop des Betriebssystems Raspbian. Dort befindet sich im oberen rechten Eck eine Desktopverknüpfung, die den Raspberry Pi herunterfahren lässt.

4.6 Didaktik

Um das Lehren und Lernen mit dem Demonstrationsmodell im Sinne der Didaktik möglichst erfolgreich gestalten zu können, wird das Modell einigen wichtigen Ansprüchen gerecht. Dazu gehören unter anderem die Richtlinien aus der Wahrnehmungspsychologie (Kircher, Girwidz, and Häußler 2015, S.236). Für die Informationsaufnahme des Lernenden ist es von wesentlicher Bedeutung, dass folgende Richtlinien eingehalten werden. Zunächst sollte sich auf das Wesentliche beschränkt werden. Dadurch erweist sich der Sachverhalt als leichter nachvollziehbar. Das Verstecken von zu viel Elektronik, das Vermeiden von zu viel Information, das bewusste Hervorheben von wichtigen Elementen und ein klar strukturierter Aufbau tragen schließlich zu einem besseren Verständnis bei. Deshalb wurden alle Kabel in dem Zwischenraum versteckt. Der Hintergrund wurde bewusst schlicht und ohne viel Zusatzinformation gestaltet. Die verwendeten Komponenten wurden möglichst einfach gehalten. Selbst die Bedienung über das grafische Benutzer-Interface wurde auf die wesentlichen Funktionen beschränkt.

Die Bedienung beziehungsweise die Benutzung des Modells spielt im Rahmen der Handlungsorientierung ebenfalls eine wichtige Rolle beim Vermitteln von Informationen. Durch das Miteinbeziehen des Lernenden in das Geschehen erweitert sich deren Erfahrungsraum (Kircher, Girwidz, and Häußler 2015, S. 769). Durch das experimentelle Handeln werden die erfahrenen Momente bewusster erlebt. Abstrakte Prinzipien und komplexe Zusammenhänge können somit leichter zugänglich gemacht werden. Bei der Entwicklung des Demonstrationsmodells war der Aspekt der Handlungsorientierung stets ein wichtiger Parameter. Durch das Berühren und manuelle Erzeugen einer optischen Störung erreicht der Lernende eine Position der Selbstbestimmung, die ihn dazu befähigt die Funktionsweise der Adaptiven Optik selbst zu erproben. Das gleichzeitige Ansprechen mehrerer Sinnesorgane führt zu einer unmittelbaren Nähe, involviert den Lernenden in das Geschehen und regt schließlich zum selbstbestimmten Denken an.

Die Umgestaltung des Störungselements war ein didaktisch wertvoller Schritt. Da das Licht in der Atmosphäre nicht reflektiert wird, sondern diese transmittiert, kommt

der neue Aufbau der Realität deutlich näher. Auch die Assoziation vom Verschieben des Plexiglasses zum turbulenten Vermischen der atmosphärischen Luftschichten entspricht eher der Realität als das abstrakte Drehen von mehreren kleinen Spiegeln. Durch diese Änderung war es letztlich erst möglich das finale Modell mit dem farblichen Hintergrund zu realisieren. Das Licht verläuft vom zu beobachteten Objekt durch die Atmosphäre und trifft in der Adaptiven Optik zuerst auf das korrigierende Element. Dieser Aufbau stellt somit ein closed-loop System dar, welches der prinzipiellen Funktionsweise der realen Adaptiven Optik entspricht.

Um jedem Interessierten den Zugang zum Demonstrationsmodell und dessen Funktionsweise zu ermöglichen, lädt der Raspberry Pi direkt nach dem Bootvorgang automatisch eine grafische Benutzeroberfläche. Die Kombination von Touchscreen-Display und grafischer Benutzeroberfläche gestaltet den Umgang mit dem Modell als äußerst benutzerfreundlich. Neben dem Hauptprogramm lässt sich hier auch eine knappe Anleitung zur Erläuterung der wesentlichen Schritte aufrufen. Dennoch sollte die Benutzeroberfläche nicht den Fokus auf sich lenken und wurde somit sehr schlicht gestaltet.

4.7 Gegenüberstellung: Modell – Realität

Betrachtet man das Demonstrationsmodell vor dem Hintergrund der realen Adaptiven Optik, so lassen sich einige wesentliche Analogien erkennen. Der für die Analyse der optischen Störung verantwortliche Wellenfrontsensor wird durch die Kamera und dem entsprechenden Schirm dargestellt. Die Korrekturen werden durch das Bewegen der kleinen Spiegel mit Schrittmotoren realisiert. Das letztliche Abbilden des fokussierten Bildes wird unter der Verwendung eines Strahlteiler und einer Linse, ähnlich der realen Adaptiven Optik, umgesetzt. Trotz dieser Analogien handelt es sich bei dem angefertigten Aufbau *nur* um ein Modell. Das Erreichen der Leistungsfähigkeit einer realen Adaptiven Optik ist schließlich mit einem enormem Arbeitsaufwand und der Zusammenarbeit vieler Arbeitsgruppen verbunden. Eine kleine Gegenüberstellung verdeutlicht diesen Unterschied.

Entscheidend für die Präzision des Systems sind der deformierbare Spiegel und die Auflösung des Wellenfrontsensors. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Komponenten erreichen nicht annähernd eine Präzision, die der im Einsatz befindlichen Adaptive Optik-Systeme gleich kommt. Ebenso ist die Ansteuer- und Reaktionszeit des Systems durch verschiedene Faktoren limitiert. Das Raspberry Pi Kameramodul liefert Bilder mit einer Frequenz von 30 Hz. Selbst die schnellstmögliche Bewegung der Schrittmotoren ist mit einer zeitlichen Verzögerung von 1 ms, zwischen jedem Schritt, verbunden (siehe Code Anhang: *delay*). Um den Ansteuersignalen der Driver-Boards folgen zu können, benötigt die Achse des Schrittmotors aufgrund ihrer Trägheit eine kurze Pause zwischen jedem Schritt. Diese Verzögerung wirkt sich unmittelbar auf die Reaktionszeit des Systems aus. Um eine Live-Korrektur zu ermöglichen, wird nach jedem durchgeführten Schritt ein

neues Bild geladen und analysiert. Durch diese Programmierung lässt sich ein System realisieren, welches im Korrekturmodus mit $87,5 \pm 5$ Bilder pro Sekunde verarbeitet. Schnellere Korrekturen ließen sich sicherlich durch die Verwendung von leistungstärkeren Computern und komplexeren Korrekturalgorithmen erreichen, jedoch würde dies sowohl den finanziellen als auch den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Um jedoch ein Demonstrationsmodell zur Veranschaulichung der Funktionsweise der Adaptiven Optik zu erstellen, bedarf es weder einer extrem hohen Präzision noch einer extrem kurzen Reaktionszeit. Viel wichtiger dafür sind dabei die im Abschnitt 4.6 *Didaktik* erläuterten Aspekte wie Verständlichkeit, Einfachheit und Anschaulichkeit.

4.8 Dokumentation

Das Demonstrationsmodell dient neben dem Näherbringen der Adaptiven Optik auch der Inspiration. Um ein Nachbau zu erleichtern oder ähnliche Projekte zu unterstützen, ist unter:

→ <http://www.haus-der-astronomie.de/de/bildungsmaterial/ao-modell>

eine kurze Beschreibung des Demonstrationsmodells zu finden. Darüber hinaus sind die erstellten Python Programme und die 3D-Modelle der verwendeten Komponenten unter folgendem *github Repository* verfügbar:

→ <https://github.com/fgebhart/adaptive-optics-model>

5 Fazit

Nach der eingängigen Betrachtung der Funktionsweise und des breiten Einsatzbereichs der Adaptiven Optik wird schnell deutlich, welche wichtige Rolle die Technik für die Leistungsfähigkeit der erdgebundenen Teleskope spielt. Bei der Planung neuer Teleskope darf die Entwicklung eines umfangreichen Adaptiven Optik-Systems somit nicht fehlen. Durch die ständige Verbesserung der einzelnen Komponenten trägt die Technik immer wieder zu neuen wissenschaftlichen Errungenschaften und beeindruckenden Bildern bei. Um diesen Trend beizubehalten oder unter Umständen sogar zu bestärken, braucht es Menschen, die sich für Technik, für Astronomie und für die Adaptive Optik begeistern. Die in dem Rahmen dieser Arbeit eingebundene Realisierung eines Demonstrationsmodells soll zu dieser Begeisterung beitragen.

Die sequentielle Arbeitsweise der Adaptiven Optik ermöglicht die Umsetzung eines besonders realitätsnahen Demonstrationsmodells. Dadurch konnten die anfänglich angestrebten Ziele nicht nur erreicht sondern auch verbessert umgesetzt werden. Der konkrete Aufbau des finalen Modells entwickelte sich stetig mit dem Verlauf des Fertigungsprozesses. Dadurch konnten immer wieder neue Ideen eingebracht werden, die zu einer positiven Entwicklung führten. Der ständige Austausch mit den Mitarbeitern und Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Astronomie und des Hauses der Astronomie führte zu einem angemessenen Einblick in die verschiedenen Arbeitsbereiche und schließlich zu einem tiefgründigen Verständnis der relevanten Themen. Der wesentliche, für die Motivation dieser Arbeit entscheidende Aspekt war jedoch die Gestaltungsfreiheit. Ohne zu viele Vorgaben und Bedingungen konnten Entscheidungen zur Wahl der relevanten Hardware, zur grafischen Gestaltung und zur didaktischen Umsetzung selbstständig getroffen werden. Damit verbunden war selbstverständlich auch die eigenverantwortliche Einarbeitung in verschiedene Anwendungsbereiche wie die Programmierung in Python, der Umgang mit dem Raspberry Pi und dem auf Debian basierenden Raspbian OS, die Bildverarbeitungsprogrammibibliothek *OpenCV*, das Planen und Konstruieren von dreidimensionalen Bauteilen mit *Autodesk Inventor*, der Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen mit *Tkinter* und dem Berechnen und Simulieren von optischen Instrumenten mit *Zemax OpticStudio*. Das Einarbeiten in diese neuen Arbeitsbereiche wurde allerdings immer als Chance verstanden, sodass es letztlich die Gestaltung des Demonstrationsmodells nach eigenen Vorstellungen ermöglichte.

Schließlich lässt sich festhalten, dass das Einarbeiten in das wissenschaftliche Gebiet der Adaptiven Optik sowohl zu einem umfangreichen Wissen über die Technik als auch zu einer großen Begeisterung für die Technik geführt und somit zur Realisierung eines angemessenen Demonstrationsmodells beigetragen hat. Mit dem Fertigstellen der letzten Modellversion wurde ein Aufbau entwickelt, welcher die eingangs gestellten Anforderungen erfüllt und somit die Funktionsweise der Adaptiven Optik auf anschauliche Art und Weise vermittelt.

Literatur

- Arsenault (2008). „ESO adaptive optics facility“. In: *Proc. SPIE* 7015, p. 701524. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.790359.
- Arsenault, Robin et al. (2004). „MACAO-VLTI Adaptive Optics Systems Performance“. In: *Advancements in Adaptive Optics*, pp. 47–58. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.552548. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=847418>.
- Arsenault, R. et al. (2013). „Delivery of the Second Generation VLT Secondary Mirror (M2) Unit to ESO“. In: 4.March, pp. 14–19. URL: <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.151-mar13/messenger-no151-14-19.pdf>.
- Avila, Remy (1974). „Optical Turbulence Profiles in the Atmosphere“. In: *Cdn. Intechopen. Com.* URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/26709/InTech-Optical_turbulence_profiles_in_the_atmosphere.pdf.
- Bonavita, M et al. (2012). „MESS (multi-purpose exoplanet simulation system). A Monte Carlo tool for the statistical analysis and prediction of exoplanet search results“. In: *Astronomy and Astrophysics* 537, p. 67. ISSN: 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201116852. URL: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2012/01/aa16852-11.pdf>.
- Bouchez, Antonin H. et al. (2014). „The Giant Magellan Telescope Adaptive Optics Program“. In: *Proceedings of the SPIE* 9148, 91480W. ISSN: 1996756X. DOI: 10.1117/12.2057613. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014SPIE.9148E..0WB>.
- Brandl, Bernhard et al. (2014). „METIS - the Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph“. In: *Spie . . .* 14.20, p. 15. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.789241.
- Brandl, B et al. (2012). „METIS - The thermal infrared instrument for the E-ELT“. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 8446.2010, p. 206462. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.926057.
- Brandner, W et al. (2002). „NAOS + CONICA at YEPUN : First VLT Adaptive Optics System Sees First Light“. In: *The Messenger* 107, pp. 1–48.
- Campbell, Mike (2009). „Atmospheric Turbulence and its Influence on Adaptive Optics“. In: March, p. 10. URL: http://www.roe.ac.uk/ifa/postgrad/pedagogy/2008_campbell.pdf.
- Carpentier, Emmanuel Aller (2011). „Extreme Adaptive Optics system optimization for High Contrast Imaging with the High Order Test bench“. PhD thesis.
- Chauvin, G et al. (2004). „A Giant Planet Candidate near a Young Brown Dwarf“. In: *Astronomy & Astrophysics* 222, p. 4. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361:200400056. URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0409323>.
- Cheng, Jingquan (2009). *The Principles of Astronomical Telescope Design*. ISBN: 978-0-387-88790-6. URL: <http://www.springer.com/de/book/9780387887906>.

- Christou, Julian et al. (2009). *Adaptive Optics Instrumentation and Capabilities Presented by Gemini AO Personnel System Support Associates*. Tech. rep.
- Dam, Marcos van, David Le Mignant, and Bruce Macintosh (2004). „Performance of the Keck Observatory adaptive-optics system.“ In: *Applied optics* 43.29, pp. 5458–5467. ISSN: 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.43.005458.
- Davidge, Tim and Stéphanie Côté (2014). *Gemini now and beyond 2014*. Tech. rep.
- Dierickx, Philippe et al. (1997). „VLT primary mirrors: mirror production and measured performance“. In: *Optical Telescopes of Today and Tomorrow*. Ed. by Arne L. Ardeberg. International Society for Optics and Photonics, pp. 385–392. DOI: 10.1117/12.269061. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1023526>.
- Diolaiti, E. et al. (2010). „Towards the phase A review of MAORY, the multi-conjugate adaptive optics module for the E-ELT“. In: *1st AO4ELT conference - Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes* 02007, p. 02007. DOI: 10.1051/ao4elt/201002007.
- Dorn, Reinhold J et al. (2014). „NAOMI – A New Adaptive Optics Module for Interferometry“. In: June, pp. 12–15. ISSN: 1996756X. DOI: 10.1117/12.2054730.
- Ellerbroek, Brent et al. (2005). „Adaptive optics for the Thirty Meter Telescope“. In: *Proceedings of SPIE* 5903.May. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.619915.
- ESO (1998). *The VLT White Book*. book_0004. ESO.
- (2014). *ESO webpage: The European Extremely Large Telescope*. URL: <http://www.eso.org/public/germany/teles-instr/e-elt/> (visited on 05/14/2016).
- (2015). *ESO webpage: AO Modes*. URL: https://www.eso.org/sci/facilities/develop/ao/ao_modes.html (visited on 05/17/2016).
- Esposito, Simone et al. (2010). „Laboratory characterization and performance of the high-order adaptive optics system for the Large Binocular Telescope“. In: *Applied optics* 49, pp. 174–89. ISSN: 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.49.00G174.
- Faller, J. et al. (1969). „Laser Beam Directed at the Lunar Retro-Reflector Array: Observations of the First Returns“. In: *SCIENE* 166.2, pp. 99–102.
- Femenia, B. and N. Devaney (2003). „Optimization with numerical simulations of the conjugate altitudes of deformable mirrors in an MCAO system“. In: *Astronomy & Astrophysics* 1176, p. 12. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361:20030538. URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0304221>.
- Fusco, T., Y. Clénet, et al. (2010). „ATLAS: the Laser Tomographic Adaptive Optics module for the E-ELT“. In: *1st AO4ELT conference - Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes* 02002. DOI: 10.1051/ao4elt/201002002.
- Fusco, T., J.-F. Sauvage, et al. (2014). „Final performance and lesson-learned of SAXO, the VLT-SPHERE extreme AO: from early design to on-sky results“. In: 9148, 91481U. DOI: 10.1117/12.2055423.

- Gavel, Donald et al. (2014). „ShaneAO : wide science spectrum adaptive optics system for the Lick Observatory“. In: *SPIE Proceedings* 9148, pp. 1–11. ISSN: 1996756X. DOI: 10.1117/12.2055256.
- Gendron, E et al. (2011). „MOAO first on-sky demonstration with CANARY“. In: *A&A* 529, pp. 2–5. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361/201116658.
- Gillessen, S et al. (2009). „Monitoring Stellar Orbits Around the Massive Black Hole in the Galactic Center“. In: *The Astrophysical Journal* 692.2, pp. 1075–1109. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.1088/0004-637X/692/2/1075.
- Glindemann, A et al. (1999). „Adaptive optics on large telescopes“. In: *Kluwer Academic Publishers*. Pp. 5–47. ISSN: 09226435.
- Gozdziewski, Krzysztof and Cezary Migaszewski (2013). „Multiple mean motion resonances in the HR 8799 planetary system“. In: *Arxiv* 29.March, pp. 1–26. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stu455.
- Herriot, Glen et al. (2006). „NFIRAOS: TMT narrow field, near-infrared facility adaptive optics“. In: *Proceedings of SPIE* 62720. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.672337.
- Hickson, Paul (2008). „Fundamentals of Atmospheric and Adaptive Optics“. In: *Ubc*.
- Hill, John M (2010). „The large binocular telescope“. In: *Applied optics* 49.16, pp. 115–22. ISSN: 1539-4522. DOI: 10.1364/AO.49.00D115. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20517352>.
- Hippler, Stefan and Markus Kasper (2004). „Dem Seeing ein Schnippchen schlagen“. In: *Sterne Und Weltraum* Oktober, pp. 32–42.
- Hippler, Stefan and Andrei Tokovinin (2008). *Adaptive Optik - Online Tutorial*. URL: http://www.mpia.de/homes/hippler/A0online/ao_online.html (visited on 03/07/2016).
- Hubin, N. et al. (1993). „First Technical Run of the COME-ON-PLUS at the ESO 3.6-m Telescope“. In: *The Messenger* 71.71, pp. 50–53.
- Jäger, K. and T. Herbst (2010). *Sharper than Hubble: Large Binocular Telescope achieves major breakthrough*. URL: <https://www.mpg.de/618842/pressRelease20100615>.
- Janson, M et al. (2010). „Spatially Resolved Spectroscopy of the Exoplanet HR 8799 c“. In: *The Astrophysical Journal Letters* 710, p. L35. ISSN: 20418205. DOI: 10.1088/2041-8205/710/1/L35.
- Jovanovic, Nemanja et al. (2013). „SCEXAO as a precursor to an ELT exoplanet direct imaging instrument“. In: p. 7. DOI: 10.12839/A04ELT3.13396. URL: <http://arxiv.org/abs/1310.0476>.
- Jovanovic, N. et al. (2015). „The Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics System: Enabling High-Contrast Imaging on Solar-System Scales“. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 127.955, pp. 890–910. ISSN: 00046280. DOI: 10.1086/682989. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015PASP..127..890J>.

- Karoji, Hiroshi et al. (2004). „Current Performance and On-Going Improvements of the 8.2 m Subaru Telescope“. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan*, pp. 381–397. ISSN: 00046264. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004PASJ...56..381I>.
- Kasper, Markus et al. (2008). „EPICS: the exoplanet imager for the E-ELT“. In: *Adaptive Optics Systems. Edited by Hubin* 7015. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1051/ao4elt/201002009.
- Kircher, Ernst, Raimund Girwidz, and Peter Häußler (2015). *Physikdidaktik Theorie und Praxis*. ISBN: 9783642417443. DOI: 10.1007/978-3-642-41745-0.
- Kolmogorov, A. N. (1991). „The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers“. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 434.1890, pp. 9–13. ISSN: 1364-5021. DOI: 10.1098/rspa.1991.0075.
- Kotani, Takayuki et al. (2012). „Second-Earth Imager for TMT (SEIT)“. In: *Proceedings of SPIE* 8446-56.
- Lagrange, A.- M. et al. (2010). „A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star Beta Pictoris“. In: *Science* 329.5987, pp. 57–59. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1187187.
- Lane, R G and M Tallon (1992). „Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor.“ In: *Applied optics* 31.32, pp. 6902–6908. ISSN: 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.31.006902.
- Lawrence, Andy (2014). *Astronomical Measurement A Concise Guide*. Springer, p. 192. ISBN: 9783642398346.
- Liske, Jochen (2015). „Top Level Requirements for ELT-CAM“. In: ESO-193104. URL: https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/docs/ESO-193104_2_Top_Level_Requirements_for_ELTCAM.pdf.
- Lloyd-Hart, M et al. (2006). „Design of the adaptive optics systems for GMT“. In: *SPIE Proc. 6272, Advances in Adaptive Optics II*. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.672444.
- Lühe, Oskar von der (1994). „Adaptive Optik an der Europäischen Südsternwarte“. In: *Spektrum der Wissenschaft* 8, p. 54. URL: <http://www.spektrum.de/magazin/adaptive-optik-an-der-europaeischen-suedsternwarte/821743>.
- Macintosh, Bruce, James Graham, David Palmer, et al. (2006). „The Gemini Planet Imager“. In: 6272.2006, pp. 1–12. DOI: 10.1117/12.672430.
- Macintosh, Bruce, James Graham, and Marshall Perrin (2014). *Gemini Planet Imager First Light!* URL: <http://www.gemini.edu/node/12113>.
- Macintosh, Bruce and Mitchell Troy (2006). „Adaptive optics for the Thirty Meter Telescope“. In: ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.672032. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1288738>.

- Macintosh, Bruce, Mitchell Troy, et al. (2006). „Extreme adaptive optics for the Thirty Meter Telescope“. In: *Advances in Adaptive Optics II. Edited by Ellerbroek* 6272, p. 20. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.672032.
- Madec, P.-Y. (2012). „Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy“. In: *Proc. SPIE* 8447.March, pp. 844705–844718. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.924892. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.924892>.
- Marois, C et al. (2010). „Images of a fourth planet orbiting HR 8799“. In: *Nature* 468.7327, p. 1080. ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/nature09684. URL: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2010Natur.468.1080M%7B%5C%7Dlink_type=ABSTRACT%7B%5C%7Dnpapers://0be24a46-325a-4116-a3c6-fd8a3b614472/Paper/p11049.
- McGurk, Rosalie et al. (2014). „Commissioning ShARCS : the Shane Adaptive optics infraRed Camera-Spectrograph for the Lick Observatory 3-m telescope“. In: *Proc. SPIE Telescopes and Instrumentation*, p. 923585. ISSN: 1996756X. DOI: 10.1117/12.2057027.
- Merkle, F. and F. Rigaut G. Rousset P. Kern J. C. Fontanella J. P. Gaffard (1991). „Adaptive optics on a 3.6-m telescope - Results and performance“. In: *Astronomy and Astrophysics* 240.1, pp. 280–290.
- Merkle, F., P. Kern, et al. (1989). „Successful tests of adaptive optics.“ In: *The Messenger* 58.58, pp. 1–4.
- Minowa, Yosuke et al. (2010). „Performance of Subaru adaptive optics system AO188“. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* 7736, 77363N. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.857818. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.857818>.
- Monelli, M. et al. (2015). „the Absolute Age of the Globular Cluster M15 Using Near-Infrared Adaptive Optics Images From Pisces/Lbt“. In: *The Astrophysical Journal* 812.1, p. 25. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1088/0004-637X/812/1/25. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/812/1/25/meta>.
- Morris, Simon L. (2012). „The EAGLE instrument for the E-ELT : developments since delivery of Phase A“. In: *Proc SPIE* 8446.March. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.925889.
- Olivier, Scot et al. (1995). „Performance of laser guide star adaptive optics at Lick Observatory“. In: *Lawrence Livermore National Laboratory*.
- Ragazzoni, Roberto (1996). „Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism“. In: *Journal of modern Optics*, pp. 1–5.
- Rousset, Gerard et al. (2011). „First star images corrected by multi-object adaptive optics“. In: *SPIE Newsroom*. ISSN: 18182259. DOI: 10.1117/2.1201109.003736. URL: <http://www.spie.org/x57046.xml>.

- Tamura, Motohide et al. (2007). *HiCIAO : High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics*. Tech. rep., pp. 106–107.
- Tatarski, V. I. (1961). „Wave Propagation in a Turbulent Medium“. In: *Physics Today* 14.12, p. 46. DOI: 10.1063/1.3057286.
- Tokovinin, Andrei (2001). *Adaptive Optics Tutorial at CTIO*. URL: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html> (visited on 03/08/2016).
- Tyson, Robert K. (2010). *Principles of Adaptive Optics, Third Edition*, p. 299. ISBN: 978-1-4398-0858-0. URL: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439808580>.
- Wallace, Brian P et al. (2006). „Evaluation of a MEMS deformable mirror for an adaptive optics test bench.“ In: *Optics express* 14.22, pp. 10132–10138. ISSN: 1094-4087. DOI: 10.1364/OE.14.010132.
- Wilson (2007). *Reflecting Telescope Optics I*. Springer, pp. 19–19. ISBN: 3540589643. DOI: 10.1007/978-3-662-08488-5. URL: <http://www.springer.com/de/book/9783540603566>.
- Wizinowich, Peter L. et al. (2006). „The W. M. Keck Observatory Laser Guide Star Adaptive Optics System: Overview“. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118.840, pp. 297–309. ISSN: 0004-6280. DOI: 10.1086/499290. URL: <http://www.jstor.org/stable/10.1086/499290>.
- Wizinowich, P. et al. (2000). „First Light Adaptive Optics Images from the Keck II Telescope: A New Era of High Angular Resolution Imagery“. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 112, pp. 315–319. ISSN: 0004-6280. DOI: 10.1086/316543.
- Zurlo, A. et al. (2014). „Performance of the VLT Planet Finder SPHERE“. en. In: *Astronomy & Astrophysics* 572, A85. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361/201424204. URL: http://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2014/12/aa24204-14/aa24204-14.html.

Anhang

```
1  __author__ = 'Fabian_Gebhart'
2
3  # This file "tk_ao.py" provides a GUI for controlling
4  # the Adaptive Optics Model. It mainly uses Tkinter
5  # and is able to run other programs in background.
6  # The design is chosen to fit to the RPI 7inch
7  # touchscreen. For more info see:
8  # https://github.com/fgebhart/adaptive-optics-model
9
10
11 # import the necessary packages
12 import Tkinter as tk
13 import os
14 import time
15
16
17 def delete_log():
18     """function checks if log file exists and removes it
19     if so. The log file is essential for closing active
20     programs in the background. All the camera based programs
21     create the log file each startup and then they are
22     checking each frame if the log file exists. By pressing
23     the "stop"-button the log file will be deleted and so
24     the programs stop."""
25     if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is True:
26         os.remove('/home/pi/close.log')
27
28 delete_log()
29
30 # initialize the total variable for the hidden buttons
31 total = []
32
33
34 class Mainpage:
35     # Starting page with all the relevant buttons and info on it
36     def __init__(self, master):
37         self.master = master
```

```

38     master.geometry("800x480+0+0")
39     # set background image:
40     background_image = tk.PhotoImage(file=
41         "/home/pi/background2.gif")
42     background_label = tk.Label(master,
43         image=background_image)
44     background_label.place(x=-1, y=-1)
45     background_label.image = background_image
46     background_label.image = background_image
47
48
49     # manage image for the hidden button, which is the same
50     # as the background color of the main background image
51     hidden_button_background_image = tk.PhotoImage(file=
52         "/home/pi/hidden_button_big.gif")
53
54     # set images for status label
55     status_image_on = tk.PhotoImage(file=
56         "/home/pi/aktiv.gif")
57     status_image_off = tk.PhotoImage(file=
58         "/home/pi/deaktiviert.gif")
59     status_image_camview = tk.PhotoImage(file=
60         "/home/pi/Sicht_der_Kamera_aktiv.gif")
61
62
63     # set label to fullscreen
64     master.attributes('-fullscreen', True)
65
66     # create new window which is used as 'instructions'
67     def new_window():
68         newwindow = tk.Toplevel()
69         app = Instructions(newwindow)
70
71     def start_ao():
72         """function to run, when 'start'-button is pressed.
73         Creates the 'stop'-button and runs the
74         'AO_just_stabi.py' file """
75         if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is False:
76             os.system('sudo_python_AO_just_stabi.py&')

```

```

77         time.sleep(1)
78         button7.place(x=61, y=390, anchor="sw")
79         status_label_off.place_forget()
80         status_label_on.place(x=74, y=180)
81
82
83     def reset():
84         if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is False:
85             button7.place(x=61, y=390, anchor="sw")
86             status_label_off.place_forget()
87             status_label_reset.place(x=74, y=180)
88             os.system('sudo_python_AO_reset.py&')
89             # time.sleep(2)
90
91         while os.path.isfile('/home/pi/close.log') is
92             ↪ True:
93             time.sleep(1)
94         else:
95             status_label_reset.place_forget()
96             status_label_off.place(x=74, y=180)
97             button7.place_forget()
98
99     def cam_view():
100         """function to run, when 'cam-view'-button is
101         pressed. Creates the 'stop'-button and runs
102         the 'just_cam.py' file """
103         if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is False:
104             os.system('sudo_python_just_cam.py&')
105             time.sleep(1)
106             button7.place(x=61, y=390, anchor="sw")
107             status_label_camview.place(x=74, y=180)
108             status_label_off.place_forget()
109
110
111     # manage the hidden buttons + function:
112     def hidden_button(count):
113         """There a three hidden buttons: 1 in upper
114         right corner, 2 in bottom right corner and 3

```

```

115         in bottom left corner. If you press them in
116         the order 1-2-3 the GUI quits. All other
117         combinations will lead to no action. To
118         shut down the RPI find a 'shutdown' shortcut
119         on the desktop """
120         global total
121         total.append(count)
122
123         # if length of list total is bigger than 3,
124         # empty the list total
125         if total[0] == 1 and len(total) == 1:
126             pass
127         elif total[0] == 1 and total[1] == 2\
128             and len(total) == 2:
129             pass
130         elif total[0] == 1 and total[1] == 2\
131             and total[2] == 3:
132             master.quit()
133         elif len(total) == 4:
134             total = []
135         else:
136             total = []
137
138     def stop_button():
139         """function to run, when 'stop'-button is pressed.
140         Creates the 'stop'-button and runs the
141         'AO_just_stabi.py' file """
142         delete_log()
143         button7.place_forget()
144         status_label_on.place_forget()
145         status_label_camview.place_forget()
146         status_label_reset.place_forget()
147         status_label_off.place(x=74, y=180)
148
149
150     # manage buttons:
151     button1 = tk.Button(text='Anleitung', width=25,
152                        height=2, command=lambda: new_window())
153     button1.place(relx=0.8, y=160, anchor="c")

```

```

154
155
156     button2 = tk.Button(text='Start_Adaptive_Optik',
157                        width=39, height=4,
158                        command=lambda: start_ao())
159     button2.place(x=61, y=390, anchor="sw")
160
161
162     button3 = tk.Button(text='Reset', width=25, height=2,
163                        command=lambda: reset())
164     button3.place(relx=0.8, y=240, anchor="c")
165
166
167     button4 = tk.Button(text='Sicht_der_Kamera', width=25,
168                        height=2, command=lambda: cam_view())
169     button4.place(relx=0.8, y=320, anchor="c")
170
171
172     # 3 hidden buttons (5, 8, 9):
173     button5 = tk.Button(text='', width=158, height=78,
174                        highlightthickness=0, bd=0,
175                        command=lambda: hidden_button(1),
176                        image=hidden_button_background_image)
177     button5.image = hidden_button_background_image
178     button5.place(relx=1, y=20, anchor="c")
179
180     button8 = tk.Button(text='', width=158, height=78,
181                        highlightthickness=0, bd=0,
182                        command=lambda: hidden_button(2),
183                        image=hidden_button_background_image)
184     button8.image = hidden_button_background_image
185     button8.place(relx=1, y=460, anchor="c")
186
187     button9 = tk.Button(text='', width=158, height=78,
188                        highlightthickness=0, bd=0,
189                        command=lambda: hidden_button(3),
190                        image=hidden_button_background_image)
191     button9.image = hidden_button_background_image
192     button9.place(relx=0, y=460, anchor="c")

```

```

193
194
195     # Stop Button:
196     button7 = tk.Button(text='Stop', width=39, height=4,
197                        fg="red", command=lambda: stop_button())
198
199
200
201     # status label = ON:
202     status_label_on = tk.Label(master, image=status_image_on
203                               ↪ )
204     status_label_on.image = status_image_on
205     # status label = OFF:
206     status_label_off = tk.Label(master, image=
207                                ↪ status_image_off)
208     status_label_off.image = status_image_off
209     # status label cam_view = ON:
210     status_label_camview = tk.Label(master, image=
211                                    ↪ status_image_camview)
212     status_label_camview.image = status_image_camview
213
214     # flexible close button, uncomment if needed:
215     closebutton = tk.Button(text='Close', width=25, height
216                             ↪ =2,
217                               command=lambda: master.quit())
218     # closebutton.place(relx=0.6, rely=0.9, anchor="c")
219
220 class Instructions:
221     def __init__(self, master):
222         self.master = master
223         master.geometry("400x400+405-110")
224         # set background image:
225         background_image = tk.PhotoImage(file=
226                                           ↪ "/home/pi/anleitung.gif")
227         background_label = tk.Label(master,
228                                     image=background_image)
229         background_label.place(x=-1, y=-1)

```

```
228         background_label.image = background_image
229
230         # manage close button:
231         self.button1 = tk.Button(self.master, text='Schliessen',
232                                 width=25, command=lambda: master.destroy())
233         self.button1.place(relx=0.5, y=370, anchor="c")
234
235
236     def main():
237         root = tk.Tk()
238         app = Mainpage(root)
239         root.mainloop()
240
241     if __name__ == '__main__':
242         main()
```

```

1  __author__ = 'Fabian_Gebhart'
2
3  # This file "AO_just_stabi.py" provides the main programm for
4  # the Adaptive Optics Model. It establishes the interface
5  # between camera input and stepper output. Each given error is
6  # transformed in a corresponding correction. This script
7  # realizes the live correction in closed-loop setup. For more
8  # info see: https://github.com/fgebhart/adaptive-optics-model
9
10
11 # import the necessary packages
12 import cv2
13 from picamera.array import PiRGBArray
14 from picamera import PiCamera
15 import time
16 import RPi.GPIO as GPIO
17 import os
18
19 # enable Pi-Camera and set resolution
20 camera = PiCamera()
21 camera.resolution = (256, 256)
22 rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(256, 256))
23
24 # Time delay for stepper motors 0.0008 is smallest working delay
25 # looks like 0.001 works better... stepper moving more smooth
26 delay = 0.001
27
28 # Movement pattern for "half-stepping" method, counter clockwise
29 # [1, 0, 0, 0], # 0
30 # [1, 1, 0, 0], # 1
31 # [0, 1, 0, 0], # 2
32 # [0, 1, 1, 0], # 3
33 # [0, 0, 1, 0], # 4
34 # [0, 0, 1, 1], # 5
35 # [0, 0, 0, 1], # 6
36 # [1, 0, 0, 1]] # 7
37
38 # same movement pattern, but only editing the different bits,
39 # leads to better performance (= smaller delay)

```

```

40 MOVE_PATTERN = [
41     (1, GPIO.HIGH), # to 1
42     (0, GPIO.LOW), # to 2
43     (2, GPIO.HIGH), # ...
44     (1, GPIO.LOW),
45     (3, GPIO.HIGH),
46     (2, GPIO.LOW),
47     (0, GPIO.HIGH),
48     (3, GPIO.LOW) # to 0
49 ]
50
51 # Set "GPIO-Mode" to BCM = Board Setup
52 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
53 GPIO.setwarnings(False)
54
55 number_of_steppers = 5
56
57 stepperPins = [
58 # ___0___1___2___3
59     [6, 13, 19, 26], # stepper 1
60     [12, 16, 20, 21], # stepper 2
61     [14, 15, 18, 23], # stepper 3
62     [7, 8, 25, 24], # stepper 4
63     [22, 27, 17, 4]] # stepper 5
64
65 # define the pins of the steppers as outputs
66 GPIO.setup(stepperPins[0], GPIO.OUT)
67 GPIO.setup(stepperPins[1], GPIO.OUT)
68 GPIO.setup(stepperPins[2], GPIO.OUT)
69 GPIO.setup(stepperPins[3], GPIO.OUT)
70 GPIO.setup(stepperPins[4], GPIO.OUT)
71
72 # initialize steppers to INIT_PATTERN, that is, the first part
73 # of the sequence
74 for stepper in stepperPins:
75     GPIO.output(stepper[0], 1)
76     GPIO.output(stepper[1], 0)
77     GPIO.output(stepper[2], 0)
78     GPIO.output(stepper[3], 0)

```

```

79
80 # Current position of the steppers in the move-sequence: relates
81 # to MOVE_PATTERN
82 stepperPositions = [0, 0, 0, 0, 0]
83
84 def get_laser_points(image):
85     """Return centers of laser-points found in the given image
86     as list of coordinate-tuples."""
87     # The color boundaries for red laser (appears white on
88     # → screen)
89     # are in GBR: green, blue, red
90     whiteLower = (150, 150, 180)
91     whiteUpper = (255, 255, 255)
92     # these boundaries should work fine for even bright rooms
93     # rooms with dimmed light should apply new lower
94     # boundaries: (190, 190, 190)
95     # get the contour areas for the steppers
96     mask = cv2.inRange(image, whiteLower, whiteUpper)
97     contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
98     cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
99     # compute the center of the contour areas
100     centroids = []
101     for contour in contours:
102         m = cv2.moments(contour)
103         # avoid division by zero error!
104         if m['m00'] != 0:
105             cx = int(m['m10'] / m['m00'])
106             cy = int(m['m01'] / m['m00'])
107             centroids.append((cx, cy))
108             # following line manages sorting the found contours
109             # from left to right (sorting first tuple value
110             # x coordinate) ascending
111             centroids = sorted(centroids)
112             centroids = centroids[:5]
113
114     return centroids
115
116

```

```

117 def move_steppers(steps_to_perform_per_stepper):
118     """Moves all steppers in parallel for the given movement
119     parameters. steps_to_perform_per_stepper is a list like:
120     [2, 400, 0, -20, -200]"""
121     absolute_list = [0, 0, 0, 0, 0]
122
123     for i in range(number_of_steppers):
124         absolute_list[i] = abs(steps_to_perform_per_stepper[i])
125     max_steps = max(absolute_list)
126     for step in range(max_steps):
127         for stepper in range(number_of_steppers):
128             if abs(steps_to_perform_per_stepper[stepper])\
129                 > step:
130                 if steps_to_perform_per_stepper[stepper] < 0:
131                     # CLOCK-WISE
132                     stepperPositions[stepper] -= 1
133                     move =\
134                         MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
135                                     % len(MOVE_PATTERN)]
136                     move = (move[0], not move[1])
137                 else: # COUNTER-CLOCK-WISE
138                     move =\
139                         MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
140                                     % len(MOVE_PATTERN)]
141                     stepperPositions[stepper] += 1
142                 pins = stepperPins[stepper]
143                 GPIO.output(pins[move[0]], move[1])
144             time.sleep(delay)
145
146
147 def log(*args):
148     """function to activate the 'print' commands. Just comment
149     or uncomment the following lines"""
150     #pass
151     print args
152
153
154 def find_movement_on_screen(last_laser_points,
155                             current_laser_points):

```

```

156     """Manages to find movement on screen. If coordinates move
157     more then 3 px the list with the found coordinates is
158     returned"""
159     threshold = 3
160     # creates a list with the x coordinates of the laserspots of
161     # the current and the last frame
162     difference_list = [a[0] - b[0] for a, b in
163                       zip(last_laser_points, current_laser_points)]
164     #log("difference_list: ", difference_list)
165     for i in range(0, len(difference_list)):
166         if abs(difference_list[i]) > threshold:
167             return current_laser_points[i]
168
169
170 def stabilize_laser(laser_points):
171     """function to stabilize the laser on their goal position.
172     Trying to keep them there."""
173     way_to_correct = [0, 0, 0, 0, 0]
174     for i in range(0, len(laser_points)):
175         way_to_correct[i] = \
176             int(((laser_points[i][0] - goal_position[i])
177                 * pixel_to_steps_coefficient)
178                 * gain_factor)
179     #log("way to correct: ", way_to_correct)
180     move_steppers(way_to_correct)
181
182
183 # initialize the variables:
184 lasers_matched = False
185 laser_positions_initialized = False
186 last_laser_points = None
187 matched_list = [(0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0)]
188 # original position: goal_position = [70, 99, 128, 157, 186]
189 goal_position = [70, 99, 128, 157, 186]
190 pixel_to_steps_coefficient = 0.55
191 # good results with 0.9
192 gain_factor = 0.8
193 # make sure the close.log file is existing in order to
194 # successfully run this file - see tk_ao.py

```

```

195 os.system('sudo_touch_/home/pi/close.log')
196
197
198 # While loop for loading, interpreting and showing frames
199 while True:
200     camera.capture(rawCapture, format="bgr",
201                   use_video_port=True)
202
203     # grab the rawCapture array representing the image
204     image = rawCapture.array
205
206     # find contours in the accumulated image
207     laser_points = get_laser_points(image)
208     # limit number of found centers to number of steppers
209     laser_points = laser_points[:number_of_steppers]
210
211     # figure out if all five lasers are on screen:
212     if len(laser_points) == 5:
213         laser_positions_reached = True
214     else:
215         laser_positions_reached = False
216
217     # if all lasers reached their goal position, stabilize them
218     if laser_positions_reached is True:
219         stabilize_laser(laser_points)
220
221     # set current laser points to last laser points to allow
222     # movement tracking for "find_movement_on_screen"
223     last_laser_points = laser_points
224
225     # clear the stream in preparation for the next frame
226     rawCapture.truncate(0)
227
228     # check if the close.log file exists. If it is deleted break
229     if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is True:
230         pass
231     else:
232         break
233

```

```
234     # if the 'q' key was pressed, break from the loop
235     key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
236     if key == ord("q"):
237         break
238
239 GPIO.cleanup()
```

```

1  __author__ = 'Fabian_Gebhart'
2
3  # This file "just_cam.py" simply displays the image captured by
4  # the camera to the user. It will also display the reference
5  # lines and the number of the found laser points. For more info
6  # see: https://github.com/fgebhart/adaptive-optics-model
7
8
9  # import the necessary packages
10 import cv2
11 from picamera.array import PiRGBArray
12 from picamera import PiCamera
13 import time
14 import RPi.GPIO as GPIO
15 import os
16
17 # enable Pi-Camera and set resolution
18 camera = PiCamera()
19 camera.resolution = (256, 256)
20 rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(256, 256))
21
22 def get_laser_points(image):
23     """Return centers of laser-points found in the given image
24     as list of coordinate-tuples."""
25     # The color boundaries for red laser (appears white on
26     # ↪ screen)
27     # boundaries are in GBR: green, blue, red
28     whiteLower = (150, 150, 180)
29     whiteUpper = (255, 255, 255)
30     # these boundaries should work fine for even bright rooms
31     # rooms with dimmed light should apply new lower
32     # boundaries: (190, 190, 190)
33     # get the contour areas for the steppers
34     mask = cv2.inRange(image, whiteLower, whiteUpper)
35     contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
36     cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
37     # compute the center of the contour areas
38     centroids = []
39     for contour in contours:

```

```

39     m = cv2.moments(contour)
40     # avoid division by zero error!
41     if m['m00'] != 0:
42         cx = int(m['m10'] / m['m00'])
43         cy = int(m['m01'] / m['m00'])
44         centroids.append((cx, cy))
45         # following line manages sorting the found contours
46         # from left to right, sorting
47         # first tuple value (x coordinate) ascending
48         centroids = sorted(centroids)
49         centroids = centroids[:5]
50
51     return centroids
52
53
54 def draw_laser_numbers(image, laser_points):
55     """Draw laser numbers on the image next to the given laser
56     points"""
57     for (i, c) in enumerate(laser_points):
58         cx, cy = c
59         cv2.putText(image, "{}".format(i + 1),
60                     (cx - 5, cy + 20),
61                     cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
62                     0.35, (255, 255, 255), 1)
63
64
65 def draw_reference_points_new2(image):
66     """Draw evenly distributed reference points on the given
67     image"""
68     image_height = image.shape[1]
69     reference_point_color = (0, 255, 0)
70     upper_y = image_height / 2
71     lower_y = image_height / 2 - 10
72     cv2.line(image, (70, upper_y), (70, lower_y),
73              reference_point_color, thickness=1, lineType=8, shift=0)
74     cv2.line(image, (99, upper_y), (99, lower_y),
75              reference_point_color, thickness=1, lineType=8, shift=0)
76     cv2.line(image, (128, upper_y), (128, lower_y),
77              reference_point_color, thickness=1, lineType=8, shift=0)

```

```

78     cv2.line(image, (157, upper_y), (157, lower_y),
79             reference_point_color, thickness=1, lineType=8, shift=0)
80     cv2.line(image, (186, upper_y), (186, lower_y),
81             reference_point_color, thickness=1, lineType=8, shift=0)
82
83
84     def draw_fps(image, start, end):
85         """Draw frame-rate information on given image"""
86         fps = round((1 / (end - start)), 2)
87         cv2.putText(image, "fps:{}".format(fps),
88                    (image.shape[1]/2 - 25, 10),
89                    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.35, (0, 0, 255), 1)
90
91
92     def log(*args):
93         """function to activate the 'print' commands. Just comment
94         or uncomment the following lines"""
95         # pass
96         print args
97
98
99     # initialize the variables:
100     lasers_matched = False
101     laser_positions_initialized = False
102     laser_positions_reached = False
103     last_laser_points = None
104     matched_list = [(0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0)]
105     goal_position = [70, 99, 128, 157, 186]
106     pixel_to_steps_coefficient = 0.55
107     # good results with 0.9
108     gain_factor = 0.8
109     # make sure the close.log file is existing in order to
110     # successfully run this file - see tk_ao.py
111     os.system('sudo_touch_/home/pi/close.log')
112
113
114     # While loop for loading, interpreting and showing frames
115     while True:
116         camera.capture(rawCapture, format="bgr",

```

```

117         use_video_port=True)
118
119     start = time.time()
120     # grab the rawCapture array representing the image
121     image = rawCapture.array
122
123     # find contours in the accumulated image
124     laser_points = get_laser_points(image)
125
126     # draw reference lines (green) and (unsorted) laser index
127     draw_reference_points_new2(image)
128     draw_laser_numbers(image, laser_points)
129
130     # clear the stream in preparation for the next frame
131     rawCapture.truncate(0)
132     end = time.time()
133     draw_fps(image, start, end)
134     # show the frame
135     cv2.imshow("Sicht_der_Kamera", image)
136     # move frame to given position
137     cv2.moveWindow("Sicht_der_Kamera", 500, 100)
138
139     # check if the close.log file exists. If it is deleted break
140     if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is True:
141         pass
142     else:
143         break
144
145     # if the 'q' key was pressed, break from the loop
146     key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
147     if key == ord("q"):
148         break
149
150
151 GPIO.cleanup()

```

```

1  __author__ = 'Fabian_Gebhart'
2
3  # This file "AO_reset.py" resets the Adaptive Optics Model, to
4  # start all over again. If, for any reason, the main program
5  # should be confused or # messed up. Just quit it and run this
6  # file. It iterates through all # steppers and assigns the
7  # found (moving) laser points. For more info see:
8  # https://github.com/fgebhart/adaptive-optics-model
9
10
11 # import the necessary packages
12 import cv2
13 from picamera.array import PiRGBArray
14 from picamera import PiCamera
15 import time
16 import RPi.GPIO as GPIO
17 import os
18
19 # make sure the close.log file is existing in order to
20 # successfully run this file - see tk_ao.py
21 os.system('sudo_touch_/home/pi/close.log')
22
23 # allow camera to wake up
24 # time.sleep(2)
25
26 # enable Pi-Camera and set resolution
27 camera = PiCamera()
28 camera.resolution = (256, 256)
29 rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(256, 256))
30
31 # Time delay for stepper motors 0.0008 is smallest working delay
32 # looks like 0.001 works better... stepper moving more smooth
33 delay = 0.001
34
35 # Movement pattern for "half-stepping" method, counter clockwise
36 # [1, 0, 0, 0], # 0
37 # [1, 1, 0, 0], # 1
38 # [0, 1, 0, 0], # 2
39 # [0, 1, 1, 0], # 3

```

```

40 # [0, 0, 1, 0], # 4
41 # [0, 0, 1, 1], # 5
42 # [0, 0, 0, 1], # 6
43 # [1, 0, 0, 1]] # 7
44
45 # same movement pattern, but only editing the different bits,
46 # leads to better performance (= smaller delay)
47 MOVE_PATTERN = [
48     (1, GPIO.HIGH), # to 1
49     (0, GPIO.LOW), # to 2
50     (2, GPIO.HIGH), # ...
51     (1, GPIO.LOW),
52     (3, GPIO.HIGH),
53     (2, GPIO.LOW),
54     (0, GPIO.HIGH),
55     (3, GPIO.LOW) # to 0
56 ]
57
58 # Set "GPIO-Mode" to BCM = Board Setup
59 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
60 GPIO.setwarnings(False)
61
62 number_of_steppers = 5
63
64 stepperPins = [
65 # ___0___1___2___3
66     [6, 13, 19, 26], # stepper 1
67     [12, 16, 20, 21], # stepper 2
68     [14, 15, 18, 23], # stepper 3
69     [7, 8, 25, 24], # stepper 4
70     [22, 27, 17, 4]] # stepper 5
71
72 # define the pins of the steppers as outputs
73 GPIO.setup(stepperPins[0], GPIO.OUT)
74 GPIO.setup(stepperPins[1], GPIO.OUT)
75 GPIO.setup(stepperPins[2], GPIO.OUT)
76 GPIO.setup(stepperPins[3], GPIO.OUT)
77 GPIO.setup(stepperPins[4], GPIO.OUT)
78

```

```

79 # initialize steppers to INIT_PATTERN, that is, the first part
80 # of the sequence
81 for stepper in stepperPins:
82     GPIO.output(stepper[0], 1)
83     GPIO.output(stepper[1], 0)
84     GPIO.output(stepper[2], 0)
85     GPIO.output(stepper[3], 0)
86
87 # Current position of the steppers in the move-sequence: relates
88 # to MOVE_PATTERN
89 stepperPositions = [0, 0, 0, 0, 0]
90
91
92 def get_laser_points(image):
93     """Return centers of laser-points found in the given image
94     as list of coordinate-tuples."""
95     # The color boundaries for red laser (appears white on
96     # → screen)
97     # boundaries are in GBR: green, blue, red
98     whiteLower = (150, 150, 180)
99     whiteUpper = (255, 255, 255)
100    # these boundaries should work fine for even bright rooms
101    # rooms with dimmed light should apply new lower
102    # boundaries: (190, 190, 190)
103    # get the contour areas for the steppers
104    mask = cv2.inRange(image, whiteLower, whiteUpper)
105    contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
106    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
107    # compute the center of the contour areas
108    centroids = []
109    for contour in contours:
110        m = cv2.moments(contour)
111        # avoid division by zero error!
112        if m['m00'] != 0:
113            cx = int(m['m10'] / m['m00'])
114            cy = int(m['m01'] / m['m00'])
115            centroids.append((cx, cy))
116    # following line manages sorting the found contours
117    # from left to right, sorting

```

```

117         # first tuple value (x coordinate) ascending
118         centroids = sorted(centroids)
119         centroids = centroids[:5]
120
121
122     return centroids
123
124
125 def move_stepper(stepper, steps_to_perform):
126     """Moves only one stepper. stepper = 0,1,2,3,4;
127     steps_to_perform = -4096...+4096"""
128     pins = stepperPins[stepper]
129     for step in range(abs(steps_to_perform)):
130         if steps_to_perform < 0: # CLOCK-WISE
131             stepperPositions[stepper] -= 1
132             move = MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
133                               % len(MOVE_PATTERN)]
134             move = (move[0], not move[1])
135         else: # > 0 COUNTER-CLOCK-WISE
136             move = MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
137                               % len(MOVE_PATTERN)]
138             stepperPositions[stepper] += 1
139         GPIO.output(pins[move[0]], move[1])
140         time.sleep(delay)
141
142
143 def move_steppers(steps_to_perform_per_stepper):
144     """Moves all steppers in parallel for the given movement
145     parameters. steps_to_perform_per_stepper is a list like:
146     [2, 400, 0, -20, -200]"""
147     absolute_list = [0, 0, 0, 0, 0]
148
149     for i in range(number_of_steppers):
150         absolute_list[i] = abs(steps_to_perform_per_stepper[i])
151     max_steps = max(absolute_list)
152     for step in range(max_steps):
153         for stepper in range(number_of_steppers):
154             if abs(steps_to_perform_per_stepper[stepper]) \
155                 > step:

```

```

156         if steps_to_perform_per_stepper[stepper] < 0:
157             # CLOCK-WISE
158             stepperPositions[stepper] -= 1
159             move = \
160                 MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
161                             % len(MOVE_PATTERN)]
162             move = (move[0], not move[1])
163         else: # COUNTER-CLOCK-WISE
164             move = \
165                 MOVE_PATTERN[stepperPositions[stepper]
166                             % len(MOVE_PATTERN)]
167             stepperPositions[stepper] += 1
168             pins = stepperPins[stepper]
169             GPIO.output(pins[move[0]], move[1])
170         time.sleep(delay)
171
172 def log(*args):
173     """function to activate the 'print' commands. Just comment
174         or uncomment the following lines"""
175     pass
176     # print args
177
178
179 def find_movement_on_screen(last_laser_points,
180                             current_laser_points):
181     """Manages to find movement on screen. If coordinates move
182         more then 3 px the list with the found coordinates is
183         returned"""
184     threshold = 3
185     # creates a list with the x coordinates of the laserspots of
186         # the current and the last frame
187     difference_list = [a[0] - b[0] for a, b in
188                       zip(last_laser_points, current_laser_points)]
189     log("difference_list:", difference_list)
190     for i in range(0, len(difference_list)):
191         if abs(difference_list[i]) > threshold:
192             return current_laser_points[i]
193
194

```

```

195 def match_laser_to_stepper(matched_list):
196     """moves the current stepper in order to find a movement on
197     the screen. If movement is found, the current stepper is
198     assigned to found coordinates of the laser"""
199     step_size = 2
200     current_stepper = 0
201
202     # find out which laser is not yet matched to determine the
203     # stepper to move
204     for i in range(0, number_of_steppers):
205         if matched_list[i] == (0, 0):
206             current_stepper = i
207             break
208
209     # check if last_laser_points is already fetched (here it
210     # needs to buffer at least one frame to avoid finding
211     # "movement in the first frame")
212     if last_laser_points is not None:
213         if len(last_laser_points) > len(laser_points):
214             # if laser left screen, we got to move it even more
215             # (8) backwards to enter screen again
216             move_stepper(current_stepper, (-1) * step_size * 20)
217         else:
218             # check out the value of the matched_list and find
219             # the relating lasers where value == 0
220             if matched_list[current_stepper] == (0, 0):
221                 # if there is no movement on the screen
222                 # -> keep turning the current stepper
223                 if find_movement_on_screen(last_laser_points,
224                                             laser_points) is None:
225                     move_stepper(current_stepper,
226                                   step_size * 16)
227                 # else: Movement is found, store it in the
228                 # matched_list at index "current_stepper"
229                 else:
230                     matched_list[current_stepper]\
231                     = find_movement_on_screen(last_laser_points,
232                                               laser_points)
233                 log("inserted_coordinates_in_matched_list",

```

```

234         "switching_to_next_stepper")
235         log("matched_list:", matched_list)
236         current_stepper += 1
237         return None
238     else:
239         log("All_lasers_are_matched_to_the_steppers")
240         log("matched_list:", matched_list)
241         return matched_list
242
243
244 def get_laser_on_position(matched_list):
245     """Move lasers to their starting (goal) position"""
246     # initialize lists
247     way_to_go_in_steps = [0, 0, 0, 0, 0]
248
249     log("goal_position:", goal_position)
250
251     # calculating the way from current position (matched_list)
252     # to start_position
253     for i in range(0, len(matched_list)):
254         way_to_go_in_steps[i] = int(((matched_list[i][0]
255             - goal_position[i]) * pixel_to_steps_coefficient)
256             # determine direction, whether laser is left or right of
257             # the starting position
258         log("way_to_go_in_steps:", way_to_go_in_steps)
259         log("Attention... Moving Steppers")
260         time.sleep(2)
261         move_steppers(way_to_go_in_steps)
262
263
264 def stabilize_laser(laser_points):
265     """function to stabilize the laser on their goal position.
266     Trying to keep them there."""
267     way_to_correct = [0, 0, 0, 0, 0]
268     for i in range(0, len(laser_points)):
269         way_to_correct[i] = int(((laser_points[i][0]
270             - goal_position[i]) * pixel_to_steps_coefficient)
271             * gain_factor)
272     log("way_to_correct:", way_to_correct)

```

```

273     move_steppers(way_to_correct)
274
275
276 # initialize the variables:
277 lasers_matched = False
278 laser_positions_initialized = False
279 laser_positions_reached = False
280 last_laser_points = None
281 matched_list = [(0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0), (0, 0)]
282 goal_position = [70, 99, 128, 157, 186]
283 # pixel_to_steps_coefficient = 0.55
284 pixel_to_steps_coefficient = 0.55
285 # good results with 0.9
286 gain_factor = 0.3
287 # counter for letting it run 5 more images to stabilize
288 # the lasers
289 counter = 0
290 # another counter for letting the camera warmup
291 # in order to avoid missing the first movement
292 warm_up_cocunter = 0
293
294
295 # While loop for loading, interpreting and showing frames
296 while True:
297     camera.capture(rawCapture, format="bgr",
298                   use_video_port=True)
299
300     # grab the raw NumPy array representing the image, then
301     # initialize the timestamp
302     # and occupied/unoccupied text
303     image = rawCapture.array
304
305     # find contours in the accumulated image
306     laser_points = get_laser_points(image)
307     # limit number of found centers to number of steppers
308     laser_points = laser_points[:number_of_steppers]
309
310     # if all lasers reached their goal position, stabilize them
311     # (move this code to the beginning, so it works with the

```

```

312     # new laser points and stabilizes them)
313     if laser_positions_reached is True:
314         stabilize_laser(laser_points)
315         # having 5 more frames to stabilize and then
316         # end program
317         if counter < 5:
318             counter += 1
319         else:
320             break
321
322     # if lasers are not matched, do so...
323     if not lasers_matched:
324         matched_lasers = match_laser_to_stepper(matched_list)
325         # if they are now matched, match_laser_to_stepper
326         # returns the list, no more "none"
327         if matched_lasers is not None:
328             lasers_matched = True
329
330     # if lasers are matched and laser_position_reached is False
331     # then run "get_laser_on_position" once (!)
332     if lasers_matched and not laser_positions_reached:
333         get_laser_on_position(matched_list)
334         laser_positions_reached = True
335
336
337     # set current laser points to last laser points to allow
338     # movement tracking for "find_movement_on_screen"
339     last_laser_points = laser_points
340
341     # clear the stream in preparation for the next frame
342     rawCapture.truncate(0)
343
344     # check if the close.log file exists. If it is deleted break
345     if os.path.isfile('/home/pi/close.log') is False:
346         break
347
348     # if the 'q' key was pressed, break from the loop
349     key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
350     if key == ord("q"):

```

```
351         break
352
353 GPIO.cleanup()
354 os.remove('/home/pi/close.log')
```

Schriftliche Versicherung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seite belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von 2 Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

Fabian Gebhart