

Positionierung und aktive Optik

des

Hexapod-Teleskops



Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
in der Fakultät für Physik und Astronomie
der Ruhr-Universität Bochum

von

Martin Paegert

aus Bochum

Bochum 2007

1. Gutachter: Prof. Dr. Rolf Chini (Institut für Astronomie, AIRUB)
2. Gutachter: Prof. Dr. emer. Theodor Schmidt-Kaler

Disputation: 21.09.2007

POINTING AND ACTIVE OPTICS
OF THE
HEXAPOD TELESCOPE



PhD Thesis

Faculty of Physics and Astronomy

Ruhr-University Bochum

Martin Paegert

from Bochum

Bochum 2007

First referee : Prof. Dr. Rolf Chini (Institut für Astronomie, AIRUB)
Second referee: Prof. Dr. emer. Theodor Schmidt-Kaler

Defense: 21 of September 2007

Meiner Familie

Der Sinn des Lebens

Da wo ich bin,
da ist der Sinn,
weil ich bin.

Da wo du bist
und mich vermisst,
da ist der Sinn,
weil ich nicht bin.

H. Wittemeier, 1976

Übersicht

Das Hexapod-Teleskop vereinigt zahlreiche innovative Ideen im Teleskopbau, die von industrieller Seite allerdings nie in einem astronomischen Betrieb getestet wurden. Obwohl die einzelnen Komponenten der Mechanik und Optik alle von höchster Präzision sind, wurde ihr Zusammenspiel weder im Labor noch am Himmel getestet. Die vorliegende Dissertation hat diese Arbeit geleistet und das Teleskop in die unmittelbare Nähe des astronomischen Betriebs gebracht. In Einzelnen wurde folgende Ergebnisse erzielt:

Erstmalig konnten mit dem Hexapod-Teleskop Sternaufnahmen gemacht werden. Die Auswertung von Pupillenaufnahmen erlauben Aussagen über die optischen Fehler des unkorrigierten Systems und geben damit die Eingangsparameter zur Korrektur des aktiven Hauptspiegels.

Die Instrumentenplattform, die sowohl die Wellenfront-Analyse als auch die Nachführungskorrektur bewerkstelligt, wurde im Labor getestet und kalibriert. Es hat sich gezeigt, dass das System zwar prinzipiell funktionsfähig ist, das Design aber sehr schwer kalibrierbar und anfällig für mechanische Verstellungen ist. Diese Erfahrungen werden Eingang in ein neues Konzept für die Plattform finden.

Die von der Industrie implementierte Steuerung des Teleskops erwies sich sowohl was die Positionierung als auch die Nachführung angeht als völlig unzureichend. Sie wurde daher wesentlich verbessert, in das Rahmenwerk der derzeit modernsten Teleskop-Steuerungssoftware der ESO (ACS) integriert und erheblich erweitert.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Pointingmodell für das weltweit einzigartige Hexapod-Teleskop wurde in Bochum und Chile an Sternen getestet. Es konnte bei unkorrigiertem Hauptspiegel auf Anhieb eine Genauigkeit von 3 Bogenminuten erreicht werden. Dies ist für den astronomischen Betrieb zwar noch nicht ausreichend, jedoch ist zu erwarten, dass unmittelbar nach der aktiven Korrektur des Hauptspiegels die Genauigkeit in den Bogensekundenbereich rücken wird. Die entscheidenden Experimente konnten wegen zu starkem Wind leider nicht mehr vor Abgabe der Arbeit realisiert werden.

Schließlich wurde auch noch eine Alternative zur Shack-Hartmann-Analyse — also zur Korrektur der Wellenfront — entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Teleskoptechnik	1
1.2	Montierungen	2
1.3	Status Quo zu Beginn der Arbeit	5
1.4	Ziel der Arbeit	5
2	Komponenten des HPT	7
2.1	Hauptspiegel (M1)	7
2.2	Sekundärspiegel (M2)	8
2.3	Umlenkspiegel (M3) und Instrumentenplattform	9
2.3.1	Optisches Konzept	9
2.3.2	Nachführungskorrektur	9
2.3.3	Shack-Hartmann-Analyse	10
2.4	Hexapod-Montierung	11
2.5	Steuerung	11
3	Experimente, Entwicklungen und Ergebnisse	15
3.1	Optische Parameter des HPT	15
3.2	Hauptspiegel (M1)	16
3.2.1	Klärung der Spiegelform	16
3.2.2	Test der Piezoaktuatoren	18
3.3	Sekundärspiegel (M2)	22
3.4	Umlenkspiegel (M3) und Instrumentenplattform	23
3.4.1	Kalibration der optischen Einheit	23
3.4.2	Ausrichtung der Blenden und der Shack-Hartmann-Kamera	28
3.4.3	Ausrichtung der Nachführungskamera	33
3.4.4	Zusammenstellung der Ergebnisse der Arbeit an der Instrumentenplattform	34
3.4.5	Bestimmung optischer Fehler aus Pupillenaufnahmen am HPT	35
3.4.5.1	Astigmatismus	41
3.4.5.2	Koma	45
3.4.5.3	Sphärische Aberration	47
3.5	Hexapod-Montierung	49
3.5.1	Inverse Kinematik des Hexapod	51
3.5.2	Pointingmodell	52
3.5.2.1	Pointingtests in Bochum	53
3.5.2.2	Pointingtests in Chile	56
3.5.2.3	Analytisches Pointingmodell	62
3.6	Steuerung	64
3.6.1	Steuerung des Sekundärspiegels (M2)	68

3.6.2	Shack-Hartmann-Analyse	71
4	Zusammenfassung	79
4.1	Ergebnisse	79
4.2	Ausblick	80
A	Bildfehlertheorie	83
A.1	Hamiltonfunktion und Seidelkoeffizienten	83
A.2	Zernike-Polynome	84
B	Bildanhang	87
C	Tabellenanhang	89
C.1	Geometrie und Positionsdaten der Kardanpunkte des HPT	89

Abbildungsverzeichnis

1.1	Parallaktische und azimutale Montierung	2
1.2	Das 3,6-m-Teleskop der ESO mit parallaktischer und das VLT mit azimutaler Montierung	3
1.3	Hexapod-Teleskop am Cerro Armazones	4
2.1	Spiegel, Aktuator und CFK-Zelle	8
2.2	Vorentwurf eines Piezoelements	8
2.3	Prinzip der Shack-Hartmann-Analyse	10
2.4	Hauptregelschleife des HPT während des Beobachtungsbetriebs	13
3.1	Differenz zwischen Parabel- und Hyperbelanpassung	17
3.2	Position und Index der Piezoaktuatoren	18
3.3	Pupillenaufnahmen (Negativdarstellung)	19
3.4	Pupillenaufnahme Piezo 25	20
3.5	Strahlengang auf der Instrumentenplattform	23
3.6	Hilfsaufbau zur Ausrichtung des SHA-Gitters und des Strahlteilers	25
3.7	Erster Labortest mit der SHA-Kamera	26
3.8	Erster Labortest mit der Nachführungskamera	26
3.9	Reflexion des SHA-Gitters um eine Laserquelle	29
3.10	Zentrierung der Beobachtungsblende auf das SHA-Gitter	30
3.11	Schema der Blendenbeleuchtung mit $f/8$ -Bündel	30
3.12	Referenzaufnahmen und $f/8$ -Strahlenbündel mit der SHA-Kamera	31
3.13	Prinzipzeichnung des Aufbaus mit Umlenkspiegel M3	32
3.14	Referenzaufnahmen und $f/8$ -Strahlenbündel mit M3	32
3.15	Referenzaufnahmen und $f/8$ -Strahlenbündel mit Nachführungskamera	34
3.16	Bildfehler bei fokussiertem Teleskop	36
3.17	Wirkung optischer Fehler in Pupillenaufnahmen	37
3.18	Pupillenaufnahmen mit dem HPT	38
3.19	Intrafokale Pupillenaufnahme von Polaris	39
3.20	Extrafokale Pupillenaufnahme von Polaris	41
3.21	Auswertbare intrafokale Pupillenaufnahme von Polaris	42
3.22	Äußerer Pupillendurchmesser entlang der Hauptachsen	43
3.23	Pupillenaufnahme von Polaris im Wissenschaftsfokus	44
3.24	Gamma Cepheus im mittleren Fokus	45
3.25	Messgrößen zur Komabestimmung aus Pupillenaufnahmen	46
3.26	Komamesswerte und Hilfskreise in Pupillenaufnahme	47
3.27	Ermittlung der sphärischen Aberration aus Pupillenaufnahmen	48
3.28	Koordinatensysteme des HPT	50
3.29	Vektoren in den HPT-Koordinatensystemen	50

3.30	Azimutabhängige Positionierungsfehler am HPT in Bochum	54
3.31	Elevationsabhängige Positionierungsfehler am HPT in Bochum	55
3.32	Verteilung der in Chile gemessenen Zielsterne	57
3.33	Positionierungsfehler in Elevation (Chile)	58
3.34	Azimutale Positionierungsfehler in Chile	60
3.35	Positionsabweichung in Abhängigkeit von der Elevation	61
3.36	Informationsfluss zwischen den Hauptmodulen	67
3.37	Grenzen der Shack-Hartmann-Analyse	71
3.38	Zusammenhang zwischen Punktversatz und Wellenfrontfehler	72
B.1	Instrumentenplattform in isometrischer Darstellung	87
B.2	Instrumentenplattform von der Seite gesehen	87
C.1	Geometrie und Positionen der Kardanpunkte (Hauptmontierung)	89
C.2	Geometrie und Positionen der Kardanpunkte (M2-Montierung)	90

Tabellenverzeichnis

3.1	Feste optische Parameter des HPT laut Hersteller	15
3.2	Variable optische Parameter des HPT	16
3.3	Gemessene Encoderwerte der M2-Motoren	22
3.4	Optische Parameter der Linsen, Blenden und Kameras auf der Instrumentenplattform	25
3.5	Differenzen zwischen Referenz- und Beobachtungsmuster	33
3.6	Mittenpositionen der Pupillen	40
3.7	Intrafokale Mittenpositionen der Pupillen	43
3.8	Mittenpositionen der Pupillen im Wissenschaftsfokus	45
3.9	Zentrale Module der HPT-Software	66
4.1	Astigmatismus, Koma und sphärische Aberration des HPT	80
A.1	Zernike-Polynome und klassische Bildfehler	85
A.2	Radialteil annularer Zernike-Polynome	86
C.1	Komponenten Kardanvektoren \vec{u}_i und \vec{o}_i	90
C.2	Komponenten der Kardanvektoren der Sekundärspiegelmontierung	90
C.3	Quellen und Messwerte für das Pointingmodell am OCA, Teil 1	91
C.4	Quellen und Messwerte für das Pointingmodell am OCA, Teil 2	92

Kapitel 1

Einleitung

Die Teleskoptechnik und der Einfluss der durch Teleskope gewonnenen Erkenntnisse auf das Weltbild der Menschen ist eines der interessantesten und philosophisch folgereichsten Kapitel der Technikgeschichte. Erst der Gebrauch von Instrumenten, die die Lichtsammelfähigkeit des Auges verstärken und - bei flächenhaften Objekten - die Auflösung von Details erhöhen, ermöglichte den Durchbruch des kopernikanischen Weltbildes, die Klärung der Natur der Sterne, die Vermessung der Entfernungen im Kosmos sowie die Entdeckung der Natur von Galaxien.

Auch fast 400 Jahre nachdem Galilei zum ersten Mal ein Teleskop in den Himmel richtete, revolutionieren neue Erkenntnisse immer noch unser Weltbild. Die Entdeckung der extra-solaren Planeten, der Quasare, der supermassiven Schwarzen Löcher im Zentrum von Galaxien und der beschleunigten Expansion des Universums haben erneut zu einem tiefgreifenden Wandel des Weltbildes geführt, der bis heute nicht abgeschlossen ist. Insbesondere auf dem Gebiet der Planetenforschung ist sicherlich noch mit mancher innovativer Erkenntnis zu rechnen. Die Suche nach Planetensystemen hat, historisch gesehen, gerade erst begonnen. Noch liegt kein Beobachtungsergebnis vor, das erdähnliche Planeten um andere Sterne nachweist, noch liegt kein harter Beweis für Leben außerhalb der Erde vor, aber die Jagd ist eröffnet. Großteleskope, die den harten Nachweis erbringen sollen, sind in Planung, Teleskope aller Größenordnungen werden für Voruntersuchungen eingesetzt und liefern vielleicht den einen oder anderen "Glückstreffer", wie so oft in der Geschichte der Astronomie. Auch das in dieser Arbeit vorgestellte Hexapod-Teleskop wird für die Suche nach Planeten sowie für die Klärung der Natur von Quasaren eingesetzt werden.

Für eine ausführlichere Behandlung des Zusammenhangs zwischen instrumenteller Technik und dem Wandel des Weltbildes sei auf die Dokumentation der Ausstellung "Wandel des Weltbildes" des Deutschen Museums München (Teichmann 1985) und das Buch "Das Auge Gottes" hingewiesen (Panek 2004).

1.1 Teleskoptechnik

Prinzipiell besteht die Aufgabe eines Teleskops darin, möglichst viel Licht zu sammeln und eine fehlerfreie Abbildung des betrachteten Objektes zu liefern. Die ersten, zwischen 1608 und 1610 in Holland und Italien gebauten Teleskope nutzten lichtbrechende Linsen zur Bilderzeugung. Bereits Galilei erkannte aber, dass die konvexe Objektivlinse (Sammellinse) prinzipiell durch einen konkaven Spiegel ersetzt werden kann. Führt bei Linsen die Lichtbrechung (Refraktion) zur Abbildung, so ist es bei Spiegeln die Reflexion an einer gekrümmten Oberfläche.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts setzten sich Spiegelteleskope gegenüber Linsenteleskopen durch. Zu den wichtigsten Gründen zählt:

- Spiegel sind frei von chromatischer Aberration (Farbfehlern),
- sie lassen sich erheblich größer auslegen, da sie von der Rückseite unterstützt werden können,
- mit der komafreien Anordnung zweier Spiegel (Ritchey-Chrétien-Optik) lässt sich ein weiterer Bildfehler eliminieren,
- anstatt eines massiven, steifen Glasblocks lassen sich leichtere, verformbare, dünne Glaselemente verwenden, die von aktiven Stullelementen in Form gehalten werden (aktive Optik).

Das in dieser Arbeit behandelte Hexapod-Teleskop (HPT) ist ein modernes Spiegelteleskop mit aktiver Ritchey-Chrétien-Optik auf einer weltweit erstmalig verwendeten Montierung mit 6 beweglichen Beinen (Hexapod-Montierung).

1.2 Montierungen

Mit dem Einsatz des Fernrohres in der Astronomie wurde sehr schnell klar, dass es nicht ausreicht, das Teleskop in den Händen haltend in den Himmel zu schauen. Die Instrumente mussten auf Halterungen montiert werden, um ein stabiles Bild zu erhalten. Die Halterungen mussten das sichere Auffinden der Beobachtungsobjekte ermöglichen (Pointing) und dem Objekt im Laufe der Nacht folgen können (Tracking). Bei modernen Großteleskopen ist eine Positioniergenauigkeit von einer und eine Tracking-Genauigkeit von unter einer Bogensekunde erforderlich.

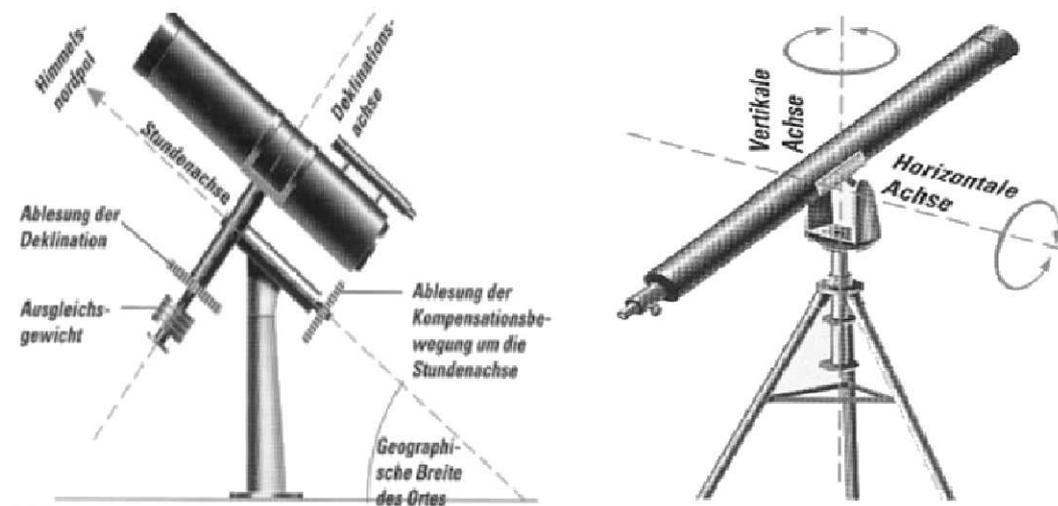


Abbildung 1.1: Parallaktische und azimutale Montierung

Alle bisher verwendeten Montierungen sind Variationen zweier Grundprinzipien (siehe Abbildung 1.1):

- azimutale Montierung
- parallaktische Montierung

Die azimutale Montierung entspricht einem einfachen Kamerastativ. Eine Achse erlaubt das Schwenken in der Horizontalen (Azimut), die andere erlaubt das Kippen in der Senkrechten (Elevation). Da sich Sterne im Laufe der Nacht auf Kreisbahnen am Himmel bewegen, ist das Teleskop

um beide Achsen mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit nachzuführen. Von Hand erfordert dies einige Übung, bei modernen Teleskopen übernimmt der Computer die Nachführung.

Die parallaktische Montierung ist astronomisch gesehen die einfachere. Eine Achse (Stundenachse) wird auf den Himmelpol ausgerichtet. Die dazu senkrechte Deklinationsachse erlaubt das Einstellen eines Objekts in beliebiger Höhe über dem Horizont. Ist das Objekt eingestellt, wird die Deklinationsachse arretiert und das Teleskop mit gleichförmiger Geschwindigkeit um die Stundenachse nachgeführt — eine auch von Hand leicht zu bewältigende Aufgabe.

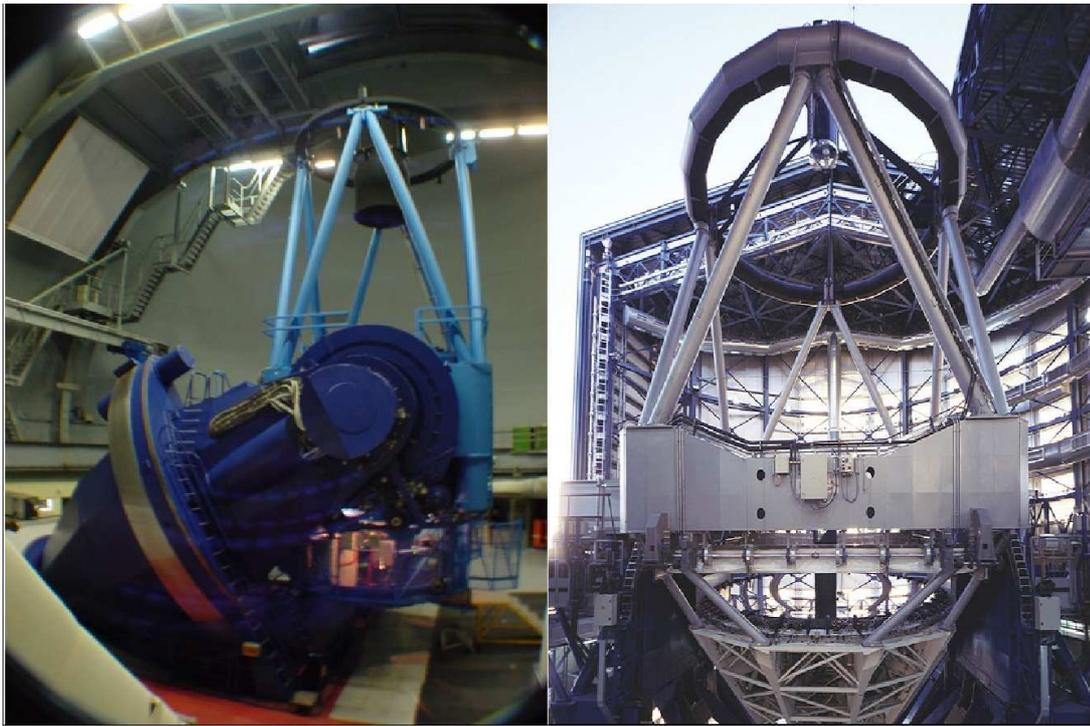


Abbildung 1.2: Das 3,6-m-Teleskop der ESO mit parallaktischer und das VLT mit azimuthaler Montierung

Insbesondere in der westlichen Welt war die parallaktische Montierung trotz computergestützter Steuerung lange Zeit sehr beliebt. Sie hat jedoch den Nachteil, dass die Achsen massiv ausgelegt werden müssen um Durchbiegungen und Positionierungsungenauigkeiten zu vermeiden. Abbildung 1.2 zeigt das 3,6 m Teleskop der ESO auf La Silla mit parallaktischer und das ESO Very Large Telescope (VLT) mit azimuthaler Montierung. Man beachte die schwere, massive Halterung, insbesondere bei der parallaktischen Montierung.

Anstatt ein Teleskop an Achsen zu hängen, die dann massiv ausgelegt werden müssen um mechanisch stabil zu sein, steht das Hexapod Teleskop (HPT) auf 6 Beinen. Die Montierung kann so bei gleicher Stabilität erheblich leichter ausfallen. Das HPT ist weltweit das erste und bisher einzige optische Teleskop, das eine Hexapod-Montierung verwendet, siehe Abbildung 1.3.

Beim HPT wird der Sekundärspiegel ebenfalls von einem Hexapod getragen. Es gibt zwar einige Teleskope, bei denen in eine starre Sekundärspiegelhalterung ein "hängendes" Hexapod eingebaut wird, das es erlaubt, den Sekundärspiegel um seinen Krümmungsmittelpunkt zu rotieren, weltweit ist das HPT aber das einzige Teleskop, bei dem die Sekundärspiegelmontierung selbst wieder ein ("stehendes") Hexapod ist, das eine viel weitergehende Bewegung des Sekundärspiegels erlaubt. Genutzt wird dies beim HPT um gravitativ bedingte Abweichungen von der Idealposition des Se-

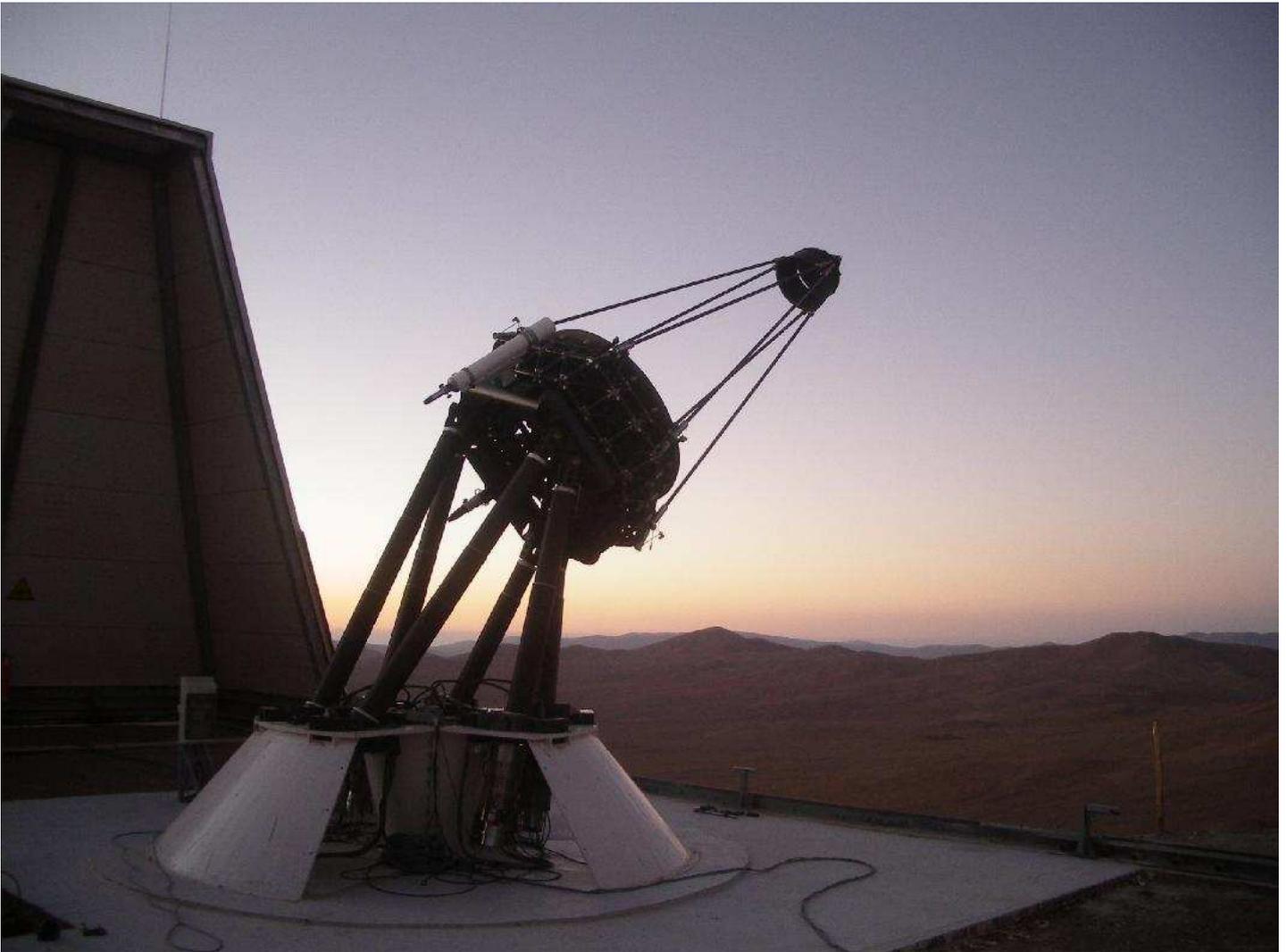


Abbildung 1.3: Hexapod-Teleskop am Cerro Armazones (Aufnahme: März 2007) Man beachte, dass auch der Sekundärspiegel von einem Hexapod gehalten wird.

kundärspiegels zu kompensieren. Auf Grund der leichten Bauweise des HPT fällt diese gravitative Wanderung stärker aus als bei herkömmlichen, steif konstruierten Sekundärspiegelmontierungen.

Hexapoden sind an sich nichts Neues und werden in der Industrie an vielen Stellen eingesetzt, etwa als Montierung für Flug- und Fahr simulatoren. Ihr Vorteil liegt in der leichteren Bauweise bei Erhalt aller 6 Freiheitsgrade (3 Raumkoordinaten für die Position, 3 Richtungswinkel). Zur astronomischen Beobachtung werden nicht alle Freiheitsgrade benötigt, dennoch verspricht diese Montierung einen Gewichts- und damit einen Kostenvorteil — wenn sich die in der Astronomie erforderliche Positioniergenauigkeit erreichen lässt.

Etwa zeitgleich mit dem optischen Hexapod-Projekt laufen auch in der Radioastronomie Versuche, eine Hexapod-Montierung zu verwenden. Das AMIBA-Projekt dient der Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit Mikrowellenantennen (siehe Raffin et al. (2004)).

Das HPT wurde konsequent auf Gewichtsersparnis und Mobilität entworfen, es wiegt insgesamt nur rund 1,5 Tonnen bei einem Hauptspiegeldurchmesser von 1,5 m. Wesentliche Merkmale der Konstruktion sind

1. Hexapod-Montierung

2. leichter, meniskusförmiger Hauptspiegel mit aktiver Optik
3. Verwendung eines weiteren Hexapods für den Sekundärspiegel
4. komafreie Abbildung durch Ritchey-Chrétien-Optik ($f = 12$ m, Öffnungsverhältnis $f/8$)
5. Messung optischer Fehler durch Shack-Hartmann-Analyse (SHA) und Beseitigung der Fehler durch eine aktive Regelung des Haupt- und Sekundärspiegels

1.3 Status Quo zu Beginn der Arbeit

Im Sommer 2003 stand das HPT auf dem Gelände der Ruhr-Universität Bochum und befand sich noch im experimentellen Stadium. Dank der Vorarbeiten in der Promotion von Düsterlohe (2002) ließ sich das Teleskop zwar bewegen, aber die gezielte Positionierung auf ein Objekt und die Nachführung funktionierten nicht.

In ihren Diplomarbeiten haben Bleul (2001) den Hauptspiegel und Kimmel (2003) den für die Regelung der aktiven Optik notwendigen Shack-Hartmann-Analysator berechnet und geprüft.

Motoren für den Sekundärspiegel gab es nicht und die aktive Optik war nicht an das Teleskop angeschlossen, da es noch keine Instrumentenplattform für die Shack-Hartmann-Analyse und eine Nachführungskamera ("Guiding") gab.

Die Bewegung des HPT erfolgte nach direkter Eingabe von Koordinaten in ein Computerprogramm zur Ansteuerung der einzelnen Beine.

1.4 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit besteht

1. in der Klärung der Hauptspiegelform
2. im Test der Piezoaktuatoren des Hauptspiegels
3. im Test und der Kalibration der Motoren des Sekundärspiegels sowie die Entwicklung einer Sekundärspiegelsteuerung
4. im Test und der Kalibration der Instrumentenplattform samt ihrer optischen Komponenten für die Nachführungskorrektur und die Shack-Hartmann-Analyse
5. in der Vermessung der optischen Fehler des unkorrigierten Systems
6. in der Erstellung eines Positionierungsmodells ("Pointingmodells")

Die Form des Hauptspiegels hat einen wesentlichen Einfluss auf die optischen Eigenschaften eines Teleskops. Es war zu klären, ob das HPT einen parabolisch oder hyperbolisch geschliffenen Spiegel hat. Diese Frage wird in Kapitel 3.2.1 behandelt und geklärt.

Die Funktion der Aktuatoren des Hauptspiegels war zu testen. Zu Beginn der Arbeit war unbekannt, ob sie einwandfrei funktionieren. Dies ist Gegenstand von Kapitel 3.2.2.

Die Motoren für die Steuerung des Sekundärspiegels wurden im Laufe der Arbeit erst geliefert. Sie waren zu testen und zu kalibrieren. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.3 zu finden. Darüber hinaus

war eine Sekundärspiegelsteuerung zu entwickeln. Die Besonderheit der Sekundärspiegelmontierung des HPT — Montierung auf einem weiteren Hexapod — ist dabei zu berücksichtigen. Dies wird ausführlich in Kapitel 3.6.1 behandelt.

Der Hauptspiegel des HPT muss in jeder Position aktiv geregelt werden, um eine Abbildung mit optimaler Qualität zu liefern. Dies erfolgt durch eine Shack-Hartmann-Analyse. Das optische Prinzip ist in Kapitel 2.3.3, die numerische Analyse in Kapitel 3.6.2 dargestellt. In Kapitel 3.4 findet sich der Test und die Kalibration der dafür benötigten Instrumentenplattform und der optischen Aufbauten.

Zu Beginn der Arbeit war es unbekannt, welche Fehler das ungestellte Teleskop aufweist und wie groß diese Fehler sind. Sie sollten bestimmt und vermessen werden um zu klären, ob die Korrekturmöglichkeiten durch die Hauptspiegelaktuatoren ausreichen. Eine ausführliche Behandlung findet sich in Kapitel 3.4.5.

Zur Erstellung eines Positionierungsmodells ist zunächst der Versatz gegenüber der als astronomische Referenz gewählten Südrichtung zu bestimmen. Ist er bekannt, ist eine eventuelle Verkippung des Systems zu messen. Beides liefert Abweichungen der realen von der idealen Position in Form von einfachen harmonischen Funktionen. Ein verfeinertes Modell berücksichtigt die individuellen Fehlstellung der unteren Kardane des HPT. Solche Fehlstellungen führen nicht mehr zu einfachen harmonischen Funktionen, sondern zeigen ein komplexeres Verhalten. Das Thema wird ausführlich in Kapitel 3.5 behandelt.

Kapitel 2

Komponenten des HPT

In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Hexapod-Teleskops kurz vorgestellt und in ihrer Funktion beschrieben.

2.1 Hauptspiegel (M1)

Der Hauptspiegel (M1)¹ des HPT ist ein dünner Meniskus aus Zerodur. Diese spezielle Glasart wird wegen ihres geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten häufig im Teleskopbau eingesetzt. Der Hauptspiegel wiegt bei 1,5 m Durchmesser nur 230 kg, dies ergibt eine Massenbelegung von 16 kg/m^2 — zum Vergleich: die Hauptspiegel des VLT haben eine Massenbelegung von 54 kg/m^2 . Der Spiegel ist an 36 Punkten an Halter geklebt, die ihrerseits mit Piezo-Aktuatoren verbunden sind. Diese Aktuatoren haben einen maximalen Hub von $20 \text{ }\mu\text{m}$ und erlauben es, Verbiegungen des Spiegels auszugleichen. Diese Art der Halterung ist ebenfalls eine Novität. Die Spiegel bisheriger Teleskope werden "schwimmend" gelagert, das heißt, sie liegen lose auf einer Tragstruktur, die Aktuatoren können nur entgegen der Gravitation drücken, nicht aber am Spiegel ziehen, weil sie nicht fest mit dem Spiegel verbunden sind. Erst die Möglichkeit, am Spiegel nicht nur zu drücken, sondern auch zu ziehen erlaubt es, ihn in die ideale Form zu bringen. Daher werden für das HPT bisher unerreichte optische Qualitäten vorhergesagt.

Die feste Verbindung zwischen Spiegel und Aktuatoren erfordert eine besondere Konstruktion der Spiegelhalterung, da diese sich bei Temperaturschwankungen exakt mit dem Zerodurspiegel ausdehnen muss. Täte sie dies nicht, würden thermische Spannungen zum Abreißen von Aktuatoren oder zum Bruch des Hauptspiegels führen.

Das thermisch gleiche Verhalten von Spiegel und Spiegelzelle wird durch eine besondere Geometrie und entsprechende Werkstoffe erreicht. Die Zelle besteht aus einer aus Pyramiden zusammengesetzten Wabenstruktur. Jeder Knoten besteht aus Invarstahl, die Knoten sind untereinander durch Röhren aus kohleverstärktem Kunststoff (CFK) verbunden.

Abbildung 2.1 zeigt die Kante des Hauptspiegels mit einem darunterliegenden Piezoaktuator und eine der Pyramidenstrukturen, aus denen die Spiegelzelle besteht. Abbildung 2.2 gibt das Funktionsprinzip eines Piezoelementes wieder: da der Piezo selbst keine Zugkräfte ausüben kann, wird das Element durch eine Feder mit 1500 N vorgespannt. Weil sich der Invarknoten als zu klein erwies um die Feder aufzunehmen, wurde der Entwurf dahingehend geändert, dass die Feder in einer Hülse unterhalb des Invarknotens untergebracht wurde.

¹Ich folge hier der englischen Konvention, die Spiegel (engl: mirror) in der Reihenfolge des Strahlengangs zu bezeichnen: M1, M2, M3 usw.



Abbildung 2.1: Spiegel, Aktuator und CFK-Zelle

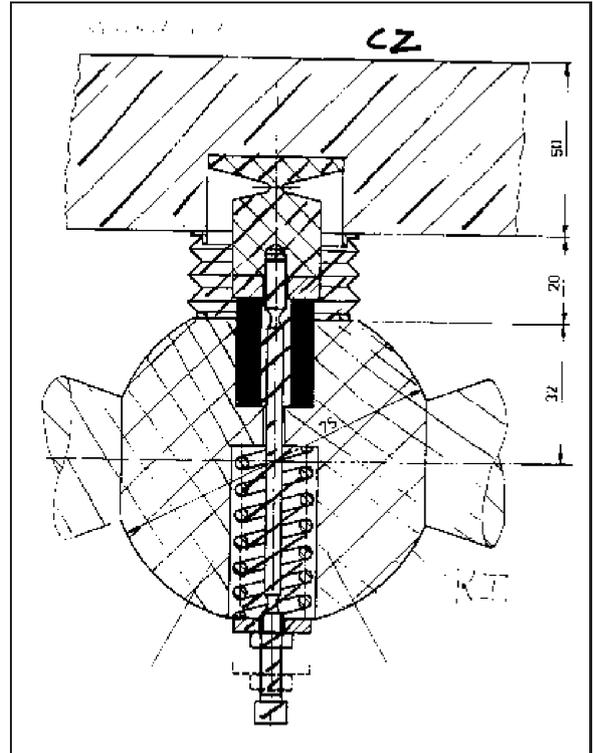


Abbildung 2.2: Vorentwurf eines Piezoaktuators mit Feder zur Vorspannung

Das HPT wurde in Zusammenarbeit des Astronomischen Instituts der Ruhr-Universität Bochum mit Krupp Industrietechnik - später Vertex Antennentechnik - entworfen. Der Entwurf der Spiegelzelle stammt von K. Pausch (1992), der Spiegel selbst wurde bei Carl Zeiss Jena hergestellt und getestet. Die Prüfergebnisse finden sich zusammen mit den Prüfergebnissen der restlichen Komponenten im Endsachbericht der federführenden Firma Vertex (früher Krupp Antennentechnik), siehe Vertex (1993). Die wichtigsten optischen Parameter sind auf Seite 15 angegeben.

Bleul (2001) erwähnt in seiner Diplomarbeit einen zweiten Prüfbericht, der von Carl Zeiss Jena erstellt wurde und der den Angaben zum Hauptspiegel der Firma Vertex widerspricht. Durch indirekte Vermessung des Hauptspiegels kommt er zu dem Schluss, dass seine Form durch eine Parabel besser wiedergegeben wird als durch eine Hyperbel. Das HPT wäre dann allerdings kein Ritchie-Chrétien-, sondern ein Cassegrain-System. Auf dieses Thema gehe ich in Kapitel 3.2.1 näher ein.

2.2 Sekundärspiegel (M2)

Der Sekundärspiegel des HPT besteht aus einem steifen, nicht verformbaren Zerodurspiegel, der ebenfalls durch eine Hexapod-Montierung gehalten wird (siehe Abbildung 1.3). Im Unterschied zur Hauptmontierung verfügt sie aber nur über eine eingeschränkte Beweglichkeit. An den Enden sind keine Kardangelenke montiert, sondern eine Kugelgelenkstruktur (unten) beziehungsweise eine Wippe (oben). Um den Sekundärspiegel "in Position" zu halten, genügt es, das Teleskop durch Änderung des Scheitelabstandes zu fokussieren und die gravitative Verformung der M2-Montierung bei niedrigen Elevationen auszugleichen. Die auftretenden Korrekturen sind klein, daher wird eine volle Beweglichkeit durch Kardangelenke nicht benötigt.

2.3 Umlenkspiegel (M3) und Instrumentenplattform

Die Instrumentenplattform trägt einerseits die wissenschaftlichen Beobachtungsinstrumente — eine optische Weitfeldkamera für die wissenschaftlichen Himmelsaufnahmen oder die Einkopplung für den "Bochumer Echelle-Spektrographen für das Observatorio Cerro Armazones" (BESO). Andererseits trägt sie notwendige, technisch-optische Aufbauten: die Kamera für die Ermittlung der Nachführungskorrekturen des Teleskops (Guiding) und die Kamera für die Shack-Hartmann-Analyse (SHA) zur Ermittlung der optischen Form des Hauptspiegels. Eine isometrische Darstellung und eine Seitenansicht befinden sich im Anhang (Abbildung B.1 und B.2).

Anders als etwa der Spiegel des NTT der ESO auf La Silla, hat der Hauptspiegel des HPT keine Grundstellung — etwa bei Ausrichtung in den Zenit —, in der er ohne aktive Steuerung ein fehlerfreies Bild liefert. Der Hauptspiegel muss in jeder Stellung des Teleskops aktiv geregelt werden. In den folgenden Abschnitten werden die notwendigen Vorrichtungen kurz beschrieben.

2.3.1 Optisches Konzept

Über einen planen Umlenkspiegel (M3) wird ein Teil des Teleskopbildfeldes ausgeblendet und durch eine im Brennpunkt des umgelenkten Strahls sitzende Blende auf eine Linse gelenkt, die den Strahl parallelisiert. Der parallelisierte Strahl fällt auf einen Strahlteiler, der die Hälfte des Lichts nach unten reflektiert. Dort fällt es auf eine Linse, die es auf die Nachführungskamera abbildet. Der Teil des Lichtes, der den Strahlteiler passiert, fällt auf ein Shack-Hartmann-Gitter, hinter dem eine weitere Kamera montiert ist.

Der Umlenkspiegel ist samt Einheit für das Guiding und die Shack-Hartmann-Analyse auf einen x-y-Schlitten montiert, der es erlaubt, die Hälfte des Bildfeldes zu erreichen. Insbesondere kann der Schlitten das Zentrum des Teleskopbildfeldes erreichen. Weil dort üblicherweise die zu beobachtenden Objekte platziert werden, kann die initiale Optimierung der Hauptspiegelform auf dem zu beobachtenden Objekt erfolgen.

Zu Beginn der eigentlichen Beobachtung wird der M3 aus dem Bildfeld der Wissenschaftskamera bzw. der Spektrographeneinkopplung gefahren und auf einen Hilfsstern platziert, der zur weiteren Nachführungskorrektur und zum Nachjustieren der Form des Hauptspiegels genutzt werden kann. Sind die optischen Fehler außerhalb des wissenschaftlichen Bildfeldes bekannt, ist die initiale Positionierung auf das Beobachtungsobjekt nicht mehr nötig, es kann direkt ein Hilfsstern außerhalb des wissenschaftlichen Bildfeldes angefahren werden.

2.3.2 Nachführungskorrektur

Kleine mechanische Ungenauigkeiten in der Teleskopnachführung, zum Teil auch thermische und gravitative Verformungen der Mechanik und anderer Teleskopteile sorgen dafür, dass ein anvisiertes Objekt nicht beliebig lange "in Position" gehalten wird, sondern sich im Laufe einiger Minuten leicht von seiner ursprünglichen Position auf der Kamera-CCD entfernt. Dem kann man entgegenwirken, indem man mit einer zweiten Kamera einen hellen, als Referenz dienenden Stern fortlaufend beobachtet. Wandert das Sternscheibchen aus der Referenzposition, so errechnet man Korrekturwerte für die Teleskopnachführung, die das Sternscheibchen in Position halten.

Abweichungen von der gemessenen Position können 2 Gründe haben:

- ungenaue Lageregelung
- Bildfelddrehung

Optimal für eine Nachführungskorrektur ist es, die Bilder der Kamera möglichst schnell in äquidistanten Zeitschritten auszulesen und fortlaufend festzustellen, ob die Position des gewählten Sterns sich schnell aufgrund des Seeings ändert oder ob eine Tendenz in eine bestimmte Richtung feststellbar ist, die dann bereits zu umsetzbaren Korrekturwerten führt. Am VLT etwa erfolgt das Auslesen mit 10 Hertz. Die beim HPT verwendete FLI-Kamera wird über den USB-Bus ausgelesen, was die Ausleserate auf ein Bild alle 2 Sekunden begrenzt.

Eine Besonderheit der Hexapod-Montierung ist es, die Bildfelddrehung ausgleichen zu können, indem die Beine paarweise gegeneinander verkürzt und verlängert werden. Gemessene Abweichungen müssen auf diese beiden Komponenten aufgeteilt werden, es sind also getrennte Korrekturwerte für die Lageregelung (Azimut, Elevation) und die Kompensation der Bildfelddrehung zu berechnen. Durch Beobachtung nur eines Sterns lassen sich beide Korrekturen nicht voneinander trennen. Befinden sich hingegen 2 Sterne im Bildfeld der Nachführungskamera, so lassen sich beide Komponenten voneinander trennen. Das Verfahren ist in der Diplomarbeit von Jürges (2004) ausführlich beschrieben.

2.3.3 Shack-Hartmann-Analyse

Das Prinzip der Shack-Hartmann-Analyse (SHA) sei kurz anhand von Abbildung 2.3 erläutert. Fällt eine ebene Wellenfront auf ein Linsengitter, so liefert jede der Linsen ein Abbild im Brennpunkt. Sind die Linsen in einem regelmäßigen Gitter angeordnet, so erhält man ein regelmäßiges Punktgitter, "Referenzgitter" genannt.

Fällt nun eine verzerrte Wellenfront auf das Linsengitter, so entsteht wieder ein Punktgitter, allerdings sind die Abstände zwischen den Punkten nicht mehr gleichmäßig. Die Störung der Wellenfront zeigt sich in Abweichungen des Punktmusters vom Referenzgitter. Aus den Verschiebungen der Punkte lassen sich optische Fehler der Wellenfront berechnen, aus denen dann wiederum Abweichungen in der Ausrichtung des Haupt- und Sekundärspiegels sowie Stellparameter für die Piezoaktuatoren des Hauptspiegels ableitbar sind.

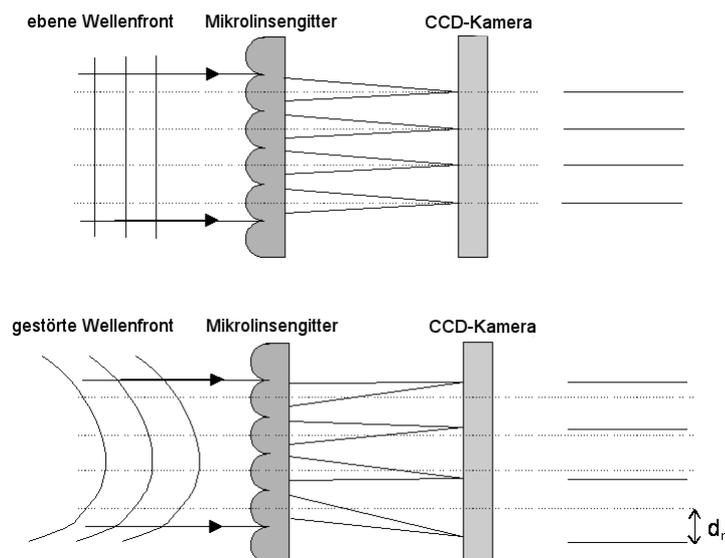


Abbildung 2.3: Prinzip der Shack-Hartmann-Analyse

oben: Ungestörte parallele Wellenfront fällt auf ein Mikrolinsengitter und erzeugt ein Punktgitter mit regelmäßigen Abständen

unten: Verzerrte Wellenfront fällt auf ein Mikrolinsengitter und erzeugt einen Versatz der Punkte um d_n

Jedem Punkt im Gitter entspricht eine bestimmte Stelle auf dem Hauptspiegel. Zusammenfassend gesagt sieht man sich mit Hilfe des Sekundärspiegels und eines Sterns als Lichtquelle die Oberfläche des Hauptspiegels an und verformt ihn dann mit Hilfe der Piezoaktuatoren so, dass er ein optimales Bild liefert.

2.4 Hexapod-Montierung

Die Hexapod-Montierung erlaubt die freie Positionierung der oberen Plattform ("Spiegelebene") im Raum. Sie besitzt im Gegensatz zu einer azimutalen oder parallaktischen Montierung alle 6 Freiheitsgrade: 3 Positionskordinaten für den Mittelpunkt der oberen Plattform plus 3 Winkelkoordinaten für ihre Ausrichtung.

Für astronomische Beobachtungen werden lediglich die 3 Winkelfreiheitsgrade benötigt. Zwei Winkel sind durch Azimut und Elevation des beobachteten Objekts festgelegt. Der dritte dient zur Ausrichtung der Umgebung des zu beobachtenden Objekts bzw. der Kompensation der Bildfeldrotation. Die 3 Raumkoordinaten für die Position des Mittelpunktes der Plattform werden zur Festlegung einer Zielposition am Himmel nicht benötigt, sie sind wahlfrei. Dies lässt sich leicht einsehen, wenn man sich das Teleskop in Zenitposition denkt. In welcher Höhe sich die Plattform befindet, spielt dann für die Beobachtung keine Rolle. Solange nur die Ausrichtung stimmt, kann man die Plattform entlang der optischen Achse beliebig verschieben.

Da es auf den ersten Blick aufwändig erscheint, 6 Freiheitsgrade zu kontrollieren, wenn für die Himmelsbeobachtung nur 3 Freiheitsgrade benötigt werden, stellt sich die Frage, worin die Vorteile der Hexapod-Montierung liegen. Sie liegen zum einen in der bereits erwähnten Gewichtsersparnis — die Beine einer Hexapod-Montierung können erheblich leichter ausfallen als die Achsen einer herkömmlichen Montierung. Zum anderen können die Getriebe der Hexapodbeine selbsthemmend konstruiert werden und so im Prinzip auch den Einsatz auf beweglichen Trägern, wie etwa einem Flugzeug zulassen, ohne dass man riskiert, dass die Mechanik beschädigt wird, wenn das Flugzeug durchsackt. Zum dritten ermöglicht die Montierung einen Ausgleich der Bildfeldrotation im Bereich von maximal 60 Grad bzw. 4 Stunden, ein eigener Bildfeldderrotator entfällt. Für den Beobachtungsbetrieb heißt dies, dass die instrumentelle Polarisation bis zu einer Beobachtungszeit von maximal 4 Stunden konstant gehalten werden kann. Diese Eigenschaft prädestiniert das HPT in einzigartiger Weise für polarimetrische Untersuchungen astronomischer Objekte wie zum Beispiel Reflexionsnebel oder Synchrotronjets.

Beim HPT wird die Bewegung des Mittelpunktes der Plattform auf eine Fläche eingeschränkt, die so gewählt ist, dass sich Druck- und Zugbelastungen möglichst gleichmäßig auf die 6 Beine verteilen, und dass die Motoren weder miteinander, noch mit der tragenden Struktur kollidieren können.

2.5 Steuerung

Die koordinierte Steuerung eines modernen Teleskops mit allen Instrumenten ist für sich genommen schon eine komplexe Aufgabe. Beim HPT kommen einige Besonderheiten hinzu, die zum Teil einzeln, insbesondere aber in Kombination weltweit einmalig sind:

- Hexapod-Montierung des Hauptspiegels
- Hexapod-Montierung des Sekundärspiegels

- der dünne Hauptspiegel erfordert in jeder Position eine aktive Regelung
- Ausgleich der gravitativen Verformung der Sekundärspiegelmontierung
- Ausgleich der Bildfeldrotation

Der Ablauf des Beobachtungsbetriebs gliedert sich in folgende Schritte:

- Eingabe der Zielkoordinaten, Anfahren des Ziels mit restlicher Positionsungenauigkeit
- SHA-Aufnahmen und initiale Korrektur der Spiegel auf dem Wissenschaftsobjekt
- Nachführungskorrektur starten
- neue Quelle für Shack-Hartmann-Analyse und Nachführungskorrektur außerhalb des wissenschaftlichen Bildfeldes eingeben
- neue Quelle mit dem Umlenkspiegel anfahren (das Teleskop bleibt auf dem Wissenschaftsobjekt, nur der Umlenkspiegel M3 wird neu positioniert)
- Aufnahme mit Nachführungskamera und SHA-Aufnahme
- Nachführungskorrektur und SHA-Überwachung starten
- wissenschaftliche Kamera freigeben
- Eintritt in die Hauptkontrollschleife des regulären Betriebs

Nach Eingabe der Koordinaten des wissenschaftlichen Beobachtungsobjektes und Erreichen der Zielkoordinaten wird zunächst eine Shack-Hartmann-Analyse gestartet und die Spiegel werden entsprechend korrigiert. Während dieses Vorgangs läuft bereits die automatische Nachführung des Teleskops, um das Wissenschaftsobjekt nicht zu verlieren. Nach Ende der Spiegelkorrektur wird die letzte Aufnahme als Referenz für die Nachführungskorrektur gespeichert und die Nachführungskorrektur selbst gestartet. Sie kann erst jetzt eingreifen, weil sich die Form des Objektes auf der Nachführungskamera verändert, wenn der Spiegel verstellt wird. Das Programm zur Ermittlung der Korrekturwerte würde dies als Drift auslegen und falsche Korrekturwerte melden. Nach Ende der Prozedur ist das Teleskop anhand des wissenschaftlichen Objektes initialisiert.

Als nächstes ist eine Quelle für die Nachführungskorrektur zu suchen, die außerhalb des wissenschaftlichen Bildfeldes liegt. Umlenkspiegel und SHA-Einheit werden mit Hilfe des x-y-Schlittens, auf dem sie montiert sind, in die entsprechende Position gefahren. Nach Erreichen der Position wird eine Aufnahme mit der SHA- und Nachführungskamera gemacht. Das Bildfeld der Nachführungskamera beträgt 2,6 Bogenminuten, die Positionierung des M3 muss auf $\pm 1,3$ Bogenminuten genau erfolgen. Die Belichtungszeit wird dabei automatisch so lange angepasst, bis das hellste Objekt im Gesichtsfeld der Nachführungskamera im Bereich der für die Kamera optimalen Helligkeit liegt.² Dieses Objekt wird automatisch zur Nachführungskorrektur verwendet. Parallel zum Abgleich der Belichtungszeit der Nachführungskamera wird die Belichtungszeit der SHA-Kamera angepasst und das letzte Foto sowie die gemeldeten Bildfehler zur Kontrolle gespeichert. Da ggf. weit außerhalb des wissenschaftlich nutzbaren Feldes des Teleskops gearbeitet wird, ist mit initialen Bildfehlern

²Die beim HPT verwendete FLI-Kamera stellt Helligkeitswerte in einem Bereich von 0 bis 65.535 dar. Ideal sind Werte zwischen 20.000 und 40.000, weil sie eine sichere Abgrenzung vom Hintergrund erlauben und weit genug unterhalb des Sättigungsbereichs von 60.000 liegen.

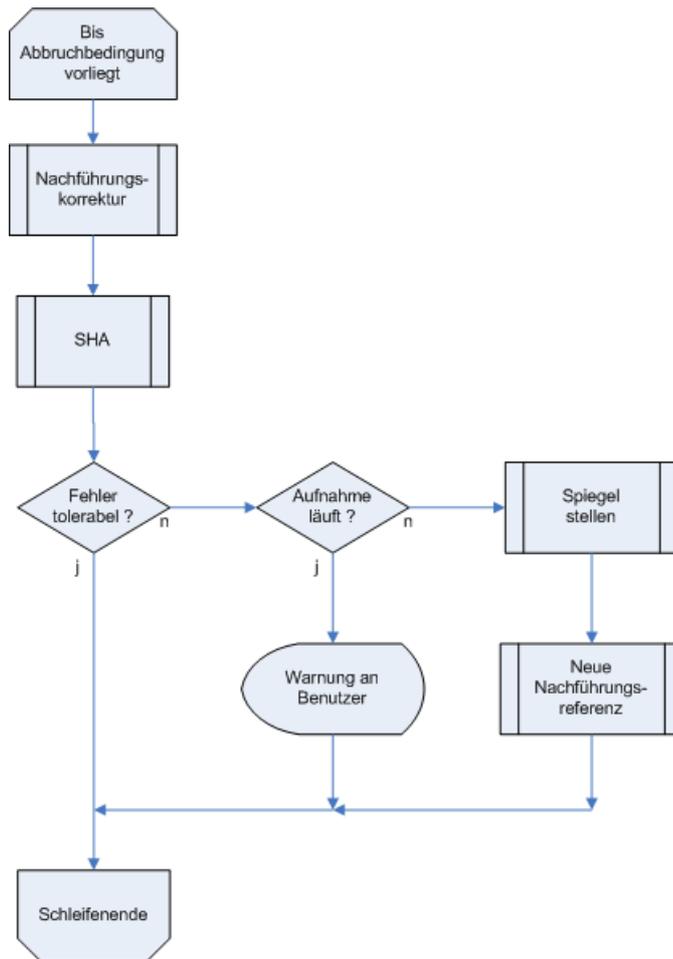


Abbildung 2.4: Hauptregelschleife des HPT während des Beobachtungsbetriebs

Zuerst wird eine eventuell notwendige Nachführungskorrektur vorgenommen, dann die SHA-Kamera ausgelesen und deren Bild auf optische Fehler analysiert. Sind die Fehler in einem festzulegenden Toleranzbereich, wird fortgefahren. Sind sie es nicht, wird im Falle einer laufenden wissenschaftlichen Aufnahme der Beobachter gewarnt, ansonsten wird der Spiegel neu eingestellt und anschließend eine neue Referenzaufnahme für die Nachführungskorrektur gemacht.

zu rechnen, die nicht korrigiert werden dürfen, da sich sonst das Bild des wissenschaftlichen Objektes verändern würde. Am Ende wird die Wissenschaftskamera für eine Aufnahme freigegeben. Das Teleskop läuft jetzt in der Hauptkontrollschleife für den Regelbetrieb.

Die Hauptregelschleife ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Falls notwendig wird zunächst eine Nachführungskorrektur vorgenommen. Steht ein neues Bild der Shack-Hartmann-Kamera zur Verfügung, wird es an die Shack-Hartmann-Analyse weitergereicht, die aus ihm die optischen Fehler berechnet. Es ist wichtig, die Nachführungskorrektur, auch während einer laufenden SHA-Aufnahme vorzunehmen, damit das Sternabbild in derselben Position liegt, wie bei vorherigen Aufnahmen, weil sonst eine Drift als optischer Fehler interpretiert werden würde. Weil die Belichtungszeit für eine Aufnahme mit der Nachführungskamera erheblich kleiner ist als die Belichtungszeit für eine Shack-Hartmann-Aufnahme, wird die Position des Sterns aus Sicht der SHA-Kamera konstant gehalten. Ist die Differenz der optischen Fehler von letzter Kontrollaufnahme und aktueller Aufnahme im Rahmen der während der Kommissionierung festzustellenden Grenzen tolerabel, wird die Schleife zwecks aktiver Nachführungskorrektur und Überwachung der optischen Qualität

wiederholt.

Sind die Abweichungen in den optischen Fehlern zu hoch, wird abgefragt, ob aktuell eine wissenschaftliche Aufnahme läuft. Falls nicht, wird der Spiegel nachgestellt, eine neue Kontrollaufnahme der SHA-Kamera gemacht und die Nachführungskontrolle angewiesen, eine neue Referenzaufnahme zu machen, die dann als neuer Startpunkt für die Nachführungskorrektur dient. Danach wird die Hauptregelschleife fortgesetzt.

Läuft eine wissenschaftliche Aufnahme, so wird sie nicht unterbrochen, sondern der Benutzer erhält eine Warnmeldung darüber, dass die Qualität der Spiegeleinstellung sich verschlechtert. Er muss dann selbst entscheiden, ob er die Aufnahme abbricht oder unterbricht und nach einer Spiegeloptimierung fortsetzt.

Kapitel 3

Experimente, Entwicklungen und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Aktivitäten und Ergebnisse beschrieben, die ich im Rahmen dieser Doktorarbeit durchgeführt bzw. erzielt habe. Daran beteiligt waren Rolf Chini, Thomas Jürges, Roland Lemke und Wolfhard Schlosser. Experimente am Teleskop waren bis Juni 2004 in Bochum möglich und ab Januar 2007 in Chile. In der Zwischenzeit wurden Tests im optischen Labor in Bochum durchgeführt und die Steuerungs- und Analysesoftware weiterentwickelt.

Die Instrumentenplattform wurde von Klaus Weißbauer (AIRUB) in Zusammenarbeit mit der ESO in Garching entworfen. Gebaut wurde sie von der Werkstatt der Fakultät für Physik und Astronomie.

3.1 Optische Parameter des HPT

Die grundlegenden optischen Parameter des Haupt- und Sekundärspiegels laut der Firma Vertex (1993) sind in Tabelle 3.1 wiedergegeben.

Spiegel	Parameter	Symbol	Wert
M1	Radius	r_{M1}	740 mm
	Krümmungsradius	r_{cM1}	-7500 mm
	asphärische Konstante	b_{sM1}	-1,07485
	Brennweite	$f_1 = 0,5 \cdot r_{cM1}$	-3750 mm
M2	Radius	r_{M2}	217,5 mm
	Krümmungsradius	r_{cM2}	-3009,84 mm
	asphärische Konstante	b_{sM2}	-4,48058
	Brennweite	$f_2 = 0,5 \cdot r_{cM2}$	-1504,92 mm
	mittlerer Scheitelabstand	d_1	-2715,19 mm
	Abschattungsrate	$\epsilon = r_{M2}/r_{M1}$	0,3

Tabelle 3.1: Feste optische Parameter des HPT laut Hersteller

Das HPT hat keinen festen, sondern einen beweglichen Sekundärspiegel. Am unteren Ende der Beine der Sekundärspiegelhalterung sind Motoren montiert, mit denen sich die jeweilige Beinlänge um ± 20 mm verändern lässt. Die weiteren, vom Scheitelabstand abhängigen optischen Parameter sind also variabel. Der jeweils für den minimalen und maximalen Scheitelabstand gültige Wert ist in Tabelle 3.2 angegeben.

Name	Formel	d_{1min}	d_{1max}	
Scheitelabstand	d_1	-2695.19	-2735.19	mm
Abbildungsmaßstab M2	$m_2 = \frac{f_2}{f_1 - f_2 - d_1}$	-3,3434	-3.0706	
Gesamtbrennweite	$f = m_2 \cdot f_1$	12538	11515	mm
Öffnungszahl	$N = \frac{f}{2 \cdot r_{M1}}$	8,47	7,78	
Baulänge	$L = (m_2 + 1) \cdot f_2$	3521	3116	mm
Skalenfaktor	$S = 206265/f$	16,45	17,91	arcsec / mm

Tabelle 3.2: Variable optische Parameter des HPT

3.2 Hauptspiegel (M1)

3.2.1 Klärung der Spiegelform

Eine der wichtigsten Fragen betrifft die Klärung der Form des Hauptspiegels. Sollte Bleul (2001) mit seiner Analyse recht haben und der Hauptspiegel in Wirklichkeit parabolisch geschliffen und der von ihm als optimale Anpassung angegebenen Gleichung

$$z = 0.000688x^2 + 0.000671y^2 + 13.6100 \quad (3.1)$$

genügen, so wäre das optische System keine Ritchey-Chrétien-, sondern eine Cassegrain-Optik. Hinzu kommt, dass die in der Gleichung angegebene Spiegelform kein Rotationsellipsoid ist, sondern 2 Achsen mit unterschiedlichem Krümmungsradius besitzt.

Die von Bleul verwendete Messmethode erschließt die Spiegelform nur indirekt. Gemessen wurde nicht die Spiegeloberfläche, sondern der Abstand zwischen der Oberkante des Invarknötens und der Spiegelunterseite. Die Fehlertoleranz der Messungen ist mit $5 \cdot 10^{-5}$ m angegeben. Die Ermittlung der tatsächlichen Form der Oberfläche ist bei diesem Verfahren an zwei Voraussetzungen gebunden:

- die Oberkanten aller Invarknötens bilden eine Referenzfläche, die genauer als $5 \cdot 10^{-5}$ m ist
- die Spiegelform ist ein Hoeghscher Meniskus (Ober- und Unterseite haben denselben Krümmungsradius)

Beide Voraussetzungen erscheinen in der erforderlichen Genauigkeit als fraglich. Trotzdem wurden die Messungen erneut analysiert. Die Anpassung eines zweiachsigen bzw. einachsigen Hyperboloiden liefert das Ergebnis:

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{0.007539 * (x^2 + y^2) + 10.03} \\ z_2 &= \sqrt{0.007529 * x^2 + 0.007548 * y^2 + 10.03} \end{aligned}$$

Die maximale Abweichung $z_1 - z_2$ beträgt $4 \cdot 10^{-5}$ m und liegt unterhalb der Messgenauigkeit. Ob es sich um einen zweiachsigen oder um einen Rotationshyperboloiden handelt, lässt sich anhand der Messdaten nicht entscheiden.

Die Anpassung eines Paraboloiden liefert das Ergebnis:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0.0006611 * (x^2 + y^2) + 3.607 \\ z_2 &= 0.0006596 * x^2 + 0.0006625 * y^2 + 3.607 \end{aligned}$$

Die Maximalabweichung $z_1 - z_2$ liegt in diesem Fall bei $8 \cdot 10^{-5}$ m. Das ist etwas höher als die Messgenauigkeit, allerdings so wenig (etwa 2σ), dass eine sichere Entscheidung nicht getroffen werden kann.

Die Fertigungstoleranzen für Teleskopspiegel liegen bei $\lambda/4$, also bei rund 100 nm. Es erscheint als extrem unwahrscheinlich, dass sich trotz dieser Oberflächengenauigkeit Abweichungen von einer Rotationsform vorliegen, die 40.000 bis 80.000 nm betragen. Die Abweichungen in den Anpassungen dürften auf Messfehler zurückzuführen sein.

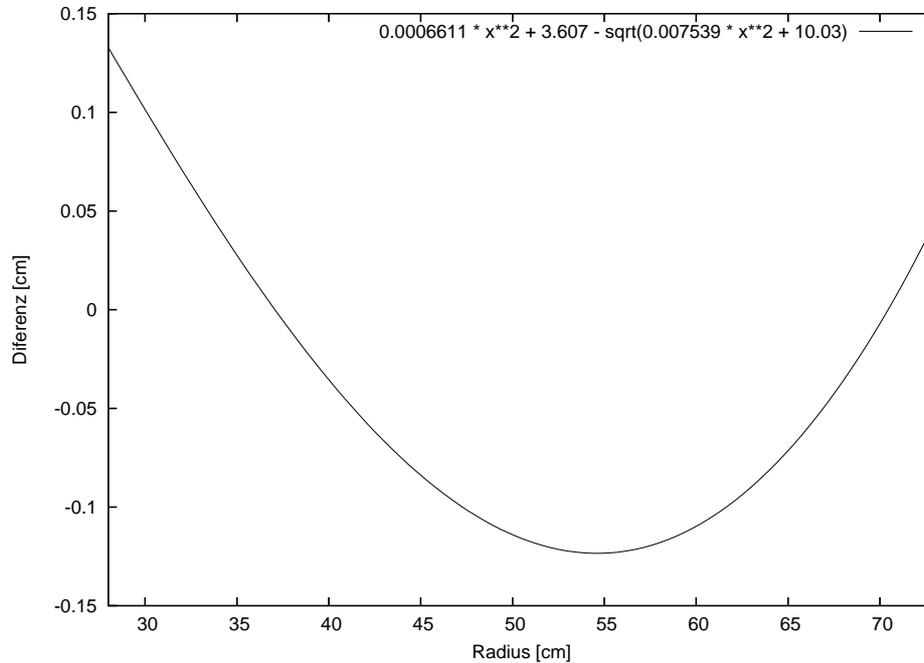


Abbildung 3.1: Differenz zwischen Parabel- und Hyperbelanpassung
Abweichung zwischen der von Bleul (2001) ermittelten Anpassung einer Parabel- und Hyperbelfunktion an die gemessene Spiegelform

Der Unterschied zwischen Hyperbel- und Parabelanpassung ist mit teils über 1 mm erheblich und durch Messung unterscheidbar (siehe Abbildung 3.1). Sollten die genannten Voraussetzungen zutreffen, wäre die Spiegelform durch indirekte Messung zu ermitteln. Eine Entscheidung ist nur durch Messungen am Teleskop möglich. Dazu müssen die Konsequenzen einer parabolischen Spiegelform bekannt sein.

Die Form eines Kegelschnittes wird in der Optik häufig durch folgende Gleichung angegeben ($c = 1/r_c$, $b_s =$ asphärische Konstante¹):

$$z = \frac{x^2}{r_c(1 + \sqrt{1 - (1 + b_s)\frac{x^2}{r_c^2}})} \quad (3.2)$$

Für eine Parabel ist $b_s = -1$ und man erhält:

$$z = \frac{x^2}{2r_c} \quad (3.3)$$

Für die Parabelanpassung folgt damit unter Einhaltung der optischen Vorzeichenkonvention sofort:

$$r_c = -7563\text{mm} \quad (3.4)$$

Eine Abweichung von 63 mm von den -7500 mm, die Vertex und Carl Zeiss, Jena angeben. Dieser Wert für den Krümmungsradius ergibt zusammen mit $b_s = -1$ eine um 97 cm verlängerte

¹oft auch konische oder Schwarzschild-Konstante genannt

Gesamtbrennweite von rund 13 m. Messungen am Teleskop bestätigen die aus den Vertex-Daten errechnete Gesamtbrennweite von 12 m. Ein parabolischer Schliff des Hauptspiegels wie er aus den Messungen von Bleul folgt, kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

3.2.2 Test der Piezoaktuatoren

Zu Beginn der Arbeit war unbekannt, ob die Piezoaktuatoren funktionieren. Um dies zu testen, wurde das Teleskop auf den Stern Polaris gestellt, der praktisch keine Nachführung erfordert, und stark defokussiert um ein Pupillennbild² zu erhalten. Alle Aktuatoren wurden auf ihre minimale Höhe gesetzt und anschließend einzeln auf Maximalausschlag gestellt. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe einer CCD-Kamera dokumentiert.

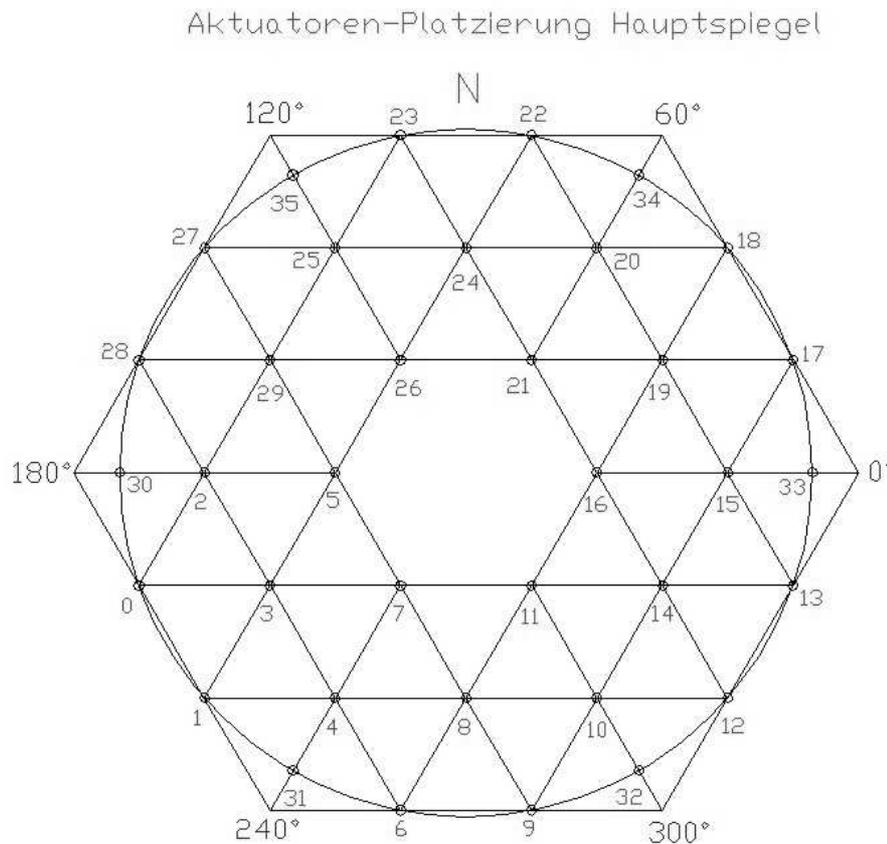


Abbildung 3.2: Position und Index der Piezoaktuatoren

Abbildung 3.2 zeigt die Position und Indexnummer der Piezoaktuatoren.

Abbildung 3.3 zeigt einige der Pupillenaufnahmen in Negativdarstellung³, die im folgenden kurz besprochen werden sollen.

²Defokussiert man das Bild eines Sterns, so vergrößert sich zunächst das Airy-Scheibchen und wird verschwommener. Defokussiert man weiter, wird aus dem Scheibchen ein Ring, der die Ausleuchtung des Hauptspiegels und die Abschattungen durch den Sekundärspiegel und dessen Halterung zeigt. Dies nennt man "Pupillenaufnahme".

³Im Druck werden Negativdarstellungen eines dunklen Hintergrundes mit wenigen helleren Objekten im allgemeinen besser dargestellt und erscheinen kontrastreicher als Positivdarstellungen. Aus diesem Grund werden alle am Teleskop gewonnenen Fotos in dieser Arbeit in Negativdarstellung wiedergegeben.

In Abbildung 3.3 a) stehen alle Aktuatoren auf Minimalposition. Auf Grund der starken Defokussierung ist nicht ein scharfes Abbild von Polaris, sondern ein großes, unscharfes Scheibchen zu erwarten. In der Mitte dieses Scheibchens sieht man die zentrale Abschattung durch den Sekundärspiegel sowie die 6 Beine des ihn tragenden Hexapods als radial verlaufende Schatten. Der zu erwartende Kreisring wird durch optische Fehler — hier Astigmatismus — zu einer Ellipse verzerrt. Das insgesamt ungleichmäßige und fleckige Aussehen des Kreisrings liegt an der überalterten Verspiegelung und ist nicht als Fehler deutbar. Zum Zeitpunkt der Aufnahme war die Verspiegelung bereits 4 Jahre alt. Die Größe des Bildes beträgt 5,1 mal 3,8 mm (Bildfeld auf allen Ausschnitten: 5,5 mal 4,0 mm bzw. 3,2 mal 2,3 Bogenminuten)

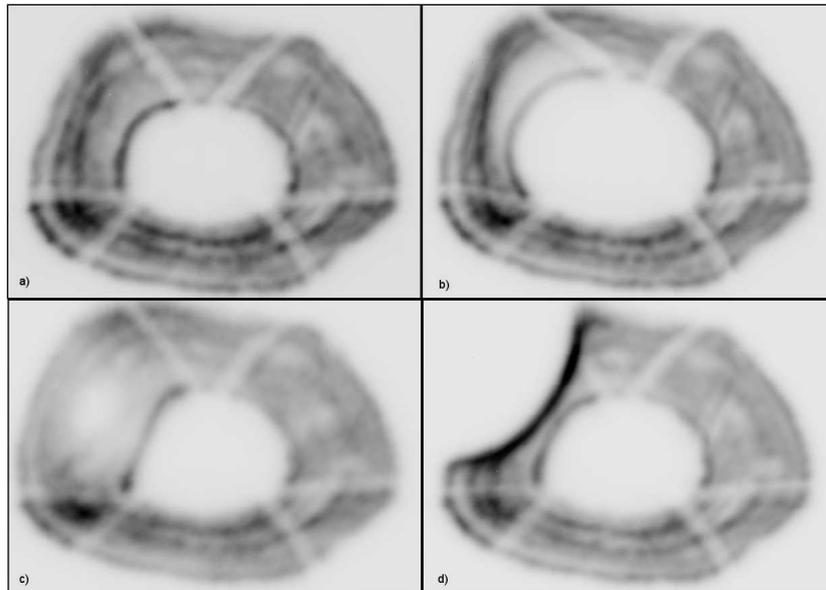


Abbildung 3.3: Pupillenaufnahmen (Negativdarstellung): stark defokussiertes Bild von Polaris, so dass die Ausleuchtung des Hauptspiegels sichtbar wird
a) alle Piezos in Minimalposition, b) Piezo 26 maximal, c) Piezo 29 maximal, d) Piezo 27 maximal

In 3.3 b) wurde Aktuator 26 des Innenringes auf Maximalposition gesetzt. Man erkennt deutlich, dass der Kreisring an der entsprechenden Stelle (links oben) verformt wird. Achtet man auf die Verformung der Schatten der umliegenden Beine, ist die Änderung der Spiegeloberfläche sehr gut zu sehen.

In 3.3 c) steht der Aktuator 29 des mittleren Ringes auf Maximalposition — Aktuator 26 wurde auf Minimalposition zurückgesetzt. Es entsteht ein deutliches "Loch" in der Mitte des Ringes, weil durch die vom Aktuator bewirkte Ausbuchtung Licht aus diesen Bereichen weggespiegelt wird.

In Abbildung 3.3 d) wurde Aktuator 27 des Außenringes auf Maximalposition gesetzt, alle anderen Aktuatoren sind in Minimalposition.

Im Laufe des Aktuatortests stellte sich heraus, dass 2 Piezos nicht richtig funktionierten (die Piezos mit den Nummern 2 und 25), weil ihre Wirkung bei Vollausschlag viel zu gering war. Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch das Ergebnis für Piezo 25. Vergleicht man beide Aufnahmen, so ist auf Bild a) rechts ein dunkler Punkt zu erkennen, der auf Bild b) fehlt. Verglichen mit der deutlichen Wirkung eines funktionierenden Aktuators in 3.3 c) fällt die Wirkung hier viel zu gering aus und erreicht nicht einmal die Hälfte des Abstandes zum nächsten Nachbarn. Es stellte sich heraus, dass der Fehler in beiden Fällen in einem durchgebrannten Widerstand der Verstärkerendstufe lag. Nach Ersatz des Widerstandes funktionierten auch Piezo Nummer 2 und 25 einwandfrei.

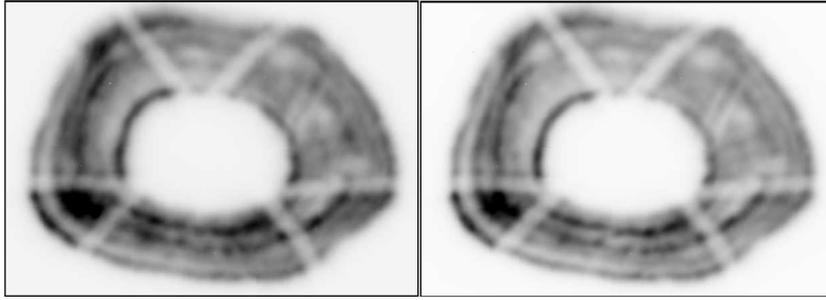


Abbildung 3.4: Pupillenaufnahme Piezo 25: links Minimal, rechts Maximalstellung; minimaler Unterschied auf der 3-Uhr-Position deutet auf einen nicht funktionierenden Piezoaktuator

Schaut man sich die Aufnahmen in 3.3 genauer an und vergleicht sie mit den Aktuatorpositionen in Abbildung 3.2, so sieht es so aus, als reiche der Einfluss eines Aktuators weiter als bis zum nächsten Nachbarn. Der Effekt ist bei allen Aktuatoren sichtbar, nicht nur bei den hier beispielhaft in Abbildung 3.3 gezeigten. Dieses zunächst überraschende Ergebnis wird durch den Endsachbericht von Vertex (1993) bestätigt. Dort findet sich ein Auszug aus dem Prüfbericht von Carl Zeiss Jena. In einem Prüfturm wurden dort die Aktuatoren auf Mittenposition gestellt, ein Aktuator um $1\mu\text{m}$ angehoben und die Spiegelform erneut vermessen. An den Orten der benachbarten Aktuatoren wurde eine Anhebung von rund $0,1\mu\text{m}$ gemessen. Mangels geeigneter Messeinrichtungen in der erforderlichen Größe und Genauigkeit konnte die Spiegelform beim Ansprechen eines Aktuators in Bochum nicht vermessen werden, die Pupillenbilder weisen jedoch deutlich auf einen Einflussbereich hin, der größer ist als der Abstand bis zum nächsten Nachbarn.

Eine Situation wie in den Pupillenaufnahmen — ein Aktuator in Maximalposition, Nachbarn in Minimalposition — wird in der Praxis nicht vorkommen. Mit Hilfe der Aktuatoren sollen Bildfehler bis zur 3. Ordnung ausgeglichen werden. Diese sind proportional zu $\cos(\phi)$ (Koma) und $\cos(2\phi)$ (Astigmatismus). In der höchsten vorkommenden Ordnung liegen Maximum und Minimum der Korrekturfunktion 90 Grad auseinander. Schaut man sich die Aufnahmen an, so liegen sind die Einflussbereiche unterhalb von ± 90 Grad. Fehler 3. Ordnung lassen sich demnach auch dann noch korrigieren, wenn sie so stark sind, dass einzelne Aktuatoren auf ihr Minimum bzw. Maximum gestellt werden müssen.

Trotzdem ist damit zu rechnen, dass die Aktuatorstellungen sich gegenseitig beeinflussen, was die Ermittlung der korrekten Stellpositionen deutlich erschwert, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein auf 0 gestellter Aktuator den Spiegel in seiner Umgebung tatsächlich auf einer definierten Position hält. Denn laut Endsachbericht der Firma Vertex muß mit Abweichungen in der Größenordnung von 10 Prozent der Differenz zu seinen nächsten Nachbarn gerechnet werden.

Ist r der Abstand, α der Winkel und h der Stellhöhe eines Aktuators, so lässt sich dessen Wirkung prinzipiell durch eine Einflussfunktion $\Delta z = f_i(r, \alpha, h)$ beschreiben. Unter Ausnutzung der Symmetrie der Aktuatorpositionen wären theoretisch für ein Drittel der Aktuatoren Einflussfunktionen zu bestimmen. Schlimmstenfalls, etwa wenn lokale Vorspannungen durch den Einbau des Spiegels in die Spiegelzelle eine Rolle spielen, ist eine Einflussfunktion für jeden Aktuator zu bestimmen. Diese Einflussfunktion ist dann auf ein globales Koordinatensystem (x, y, z) zu transformieren, dessen Ursprung zum Beispiel im Scheitelpunkt der idealen Spiegelform liegt (hyperbolisch mit den in Tabelle 3.1 angegebenen Daten). Die tatsächliche Spiegelform berechnet sich dann aus einer Referenzposition $z_0(x, y, h_0)$ bei gegebener Gleichstellung aller Aktuatoren auf Mittenposition und der Summe über die Einflussfunktionen am Ort (x, y) :

$$z = z_0(x, y, h_0) + \sum_{i=1}^n f_i(x - x_i, y - y_i, h - h_0)$$

Dieser an sich vielversprechende Ansatz scheitert an der Realität: Piezoaktuatoren unterliegen einer thermischen Drift und Hysterese, zudem reagieren sie auf lokale Druck- und Zugbelastungen. Diese Einflüsse überschreiten den Wert von $1/4\lambda$. Die thermische Drift dürfte keine wesentliche Rolle spielen, weil sie die baugleichen Aktuatoren in gleicher Weise beeinflusst und die Konstruktion des HPT sowie der Kuppel so "offen" ist, dass sich keine lokalen thermischen Differenzen ausbilden können. Die thermische Drift ändert die Position des Hauptspiegels über die gesamte Fläche, was sich als Defokussierung bemerkbar macht, die durch eine analoge Anhebung oder Absenkung des Sekundärspiegels ausgeglichen werden kann. Die Funktion z_0 ist demnach um Azimut, Elevation und Polarisation (gravitative Vorbelastung), und die Funktionen f_i um vorherige Stellung des Aktuators ($h - h_{t-1}$ wegen Hysterese), Azimut (Az), Elevation (El) und Polarisation ϕ zu erweitern (gravitative Vorbelastung des Aktuators):

$$z = z_0(x, y, h_0, Az, El, \phi) + \sum_{i=1}^n f_i(x - x_i, y - y_i, h - h_0, Az, El, \phi, h - h_{t-1})$$

Die Funktionen z_0 haben einen 5-, die Funktionen f_i einen 7-dimensionalen Parameterraum. Diesen für ein reales Instrument - hier das HPT — etwa durch eine numerische Simulation mittels finiter Elemente — theoretisch ermitteln und beschreiben zu wollen ist mit vertretbarem Aufwand kaum zu realisieren. Weder existieren die Mittel, noch die Möglichkeiten, das System in seiner vollen Komplexität numerisch zu simulieren und zu zuverlässigen Aussagen zu kommen. Selbst wenn dies gelänge, wäre der Nutzen zweifelhaft, denn eigentlich benötigt man ein invertiertes Funktionensystem, das die Stellwerte h_i in Abhängigkeit vom Ort auf dem Spiegel sowie von Azimut, Elevation, Polarisation und vorheriger Stellung der Aktuatoren liefert, etwa:

$$h = \zeta(x, y, h_0, Az, El, \phi) + \sum_{i=1}^n g_i(x - x_i, y - y_i, h - h_0, Az, El, \phi, h - h_{t-1})$$

wenn das Funktionssystem in dieser Weise umkehrbar ist.

Ein solches Funktionssystem zu suchen erscheint reizvoll, aber es dürfte sinnvoller sein, das Ziel - astronomische Beobachtungen durchzuführen - nicht aus dem Auge zu verlieren und einen Paradigmenwechsel vorzunehmen. Anstatt das vorhandene System theoretisch bis ins Detail beschreiben zu wollen und aus der theoretischen Beschreibung auf das reale Verhalten zu schließen, ist das reale Verhalten zu untersuchen und das beschreibende Modell diesem Verhalten anzupassen.

Die Wirkung der einzelnen Aktuatoren ist dazu am Teleskop anhand von Aufnahmen zu messen. Geeignet erscheint ein Betrieb mit 3 Kameras: Nachführungs- und SHA-Kamera fokussiert, um die Wirkung auf ein Abbild und auf die Verteilung der SHA-Punkte messen zu können, sowie eine dritte Kamera im Wissenschaftsfokus — allerdings stark defokussiert, um den Bereich der Wirkung in Pupillenaufnahmen messen zu können. Wünschenswert wäre ein künstlicher Stern in einer fest definierten Position. Dies ist am OCA nicht erreichbar, also sind die Beobachtungsbedingungen so homogen wie möglich zu wählen, etwa Sterne, die im Bereich von 80 Grad oder höher kulminieren, um gravitative Verformungen zu minimieren.

Die SHA-Aufnahmen liefern quantitativ eine Aussage darüber, wie stark ein Aktuator auf welche Stelle des Spiegels wirkt, die Aufnahme der Nachführungskamera liefert eine Aussage wie sich dies auf ein fokussiertes Sternbild auswirkt, die Pupillenaufnahme verdeutlicht zusätzlich welcher

Bereich betroffen ist und ermöglicht die einfache Zuordnung von SHA-Punkten zu Punkten auf der Spiegeloberfläche. Die Pupillenaufnahme ist nicht wirklich nötig. Macht man sie jedoch einmal intra- und einmal extrafokal, lassen sich die von der Shack-Hartmann-Analyse gelieferten Fehler durch Ausmessen der Pupillenbilder stichprobenartig überprüfen.

Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren wird sein, zu beurteilen, wann das Sternbild auf der Nachführungskamera fokussiert ist, da das HPT einen sehr großen Astigmatismus aufweist. Hier hilft nur, den Sekundärspiegel so lange zu verfahren, bis das Sternscheibchen einen runden Durchmesser hat oder den sagittalen bzw. meridionalen Brennpunkt anzufahren.

3.3 Sekundärspiegel (M2)

Zu Beginn der Arbeit war die Montierung des Sekundärspiegels noch nicht mit Motoren ausgestattet. Sie waren bereits bestellt und wurden einige Monate später durch die Firma Haidenhein samt Anschlusskabeln geliefert. Sie erlauben es, die Beinlängen der M2-Montierung um 4 cm zu ändern. Die Schrittmotoren sind mit Absolutencodern und einem Feintrieb versehen. Motoren und Kabel waren samt Steuerungskarte zu testen. Dazu wurde ein Steuerprogramm in Labview geschrieben, mit dem es möglich war, Signale auf die Ausgänge der Steuerkarte zu legen und auf diese Weise die Motoren zu verfahren. Frequenz und Form der Signale sowie die Spannung von Permanentensignalen, etwa für die Drehrichtung der Motoren, wurden an allen Ausgängen mit einem Oszilloskop überprüft.

Nach diesen grundlegenden Arbeiten wurde aus der physikalischen Werkstatt ein Messtisch ausgeliehen, der es erlaubte, die Höhe der Motoren auf $\pm 5\mu\text{m}$ genau zu vermessen. Die ab Werk in Mittelstellung ausgelieferten Motoren waren jeweils um 2 cm nach oben und unten zu bewegen, die Encoderwerte zu notieren und ein Umrechnungsfaktor von Encodersignalen in Millimeter Stellweg zu bestimmen.

Das mit den Motoren gelieferte Windowsprogramm zeigte die Encoderwerte nicht direkt an, sondern rechnete sie mit einem unbekanntem Faktor in Anzeigewerte um. Die Antriebe enthalten keine Endabschalter, es war also Vorsicht bei der Annäherung an die Endpositionen geboten; Motor 3 fuhr gegen den unteren Anschlag. Tabelle 3.3 enthält die gemessenen Ergebnisse sowie die Differenzen zwischen den Endpositionen 2 cm oberhalb und unterhalb der Mitte.

Nr	Mitte	oben (+2 cm)	unten (-2 cm)	oben - unten
1	36302,00500	36507,02125	36097,29750	409,72375
2	34143,15376	34348,53125	33938,83000	409,70125
3	31499,97000	31704,42500	31294,95000 ⁴	409,47500
4	29382,64375	29587,52125	29177,55250	409,96875
5	36386,53750	36591,21125	36181,38250	409,82875
6	20154,77625	20359,66000	19949,87125	409,78875

Tabelle 3.3: Anzeigewerte des Ausleseprogramms der M2-Motoren Mittenposition, 2 cm nach oben und unten verfahren, Differenz. Motor 3 erreichte den unteren Anschlag. Die Einheit der Anzeigewerte ist unbekannt.

Mittelwert und Standardabweichung der Anzeigewerte betragen $409,80 \pm 0,11$. Zusammen mit der Ablesegenauigkeit beträgt der Umrechnungsfaktor $(9.76324 \pm 0,00006) \cdot 10^{-2}$ je mm.

Auf die Steuerung des Sekundärspiegels wird in Kapitel 3.6.1 eingegangen.

3.4 Umlenkspiegel (M3) und Instrumentenplattform

3.4.1 Kalibration der optischen Einheit

Abbildung 3.5 zeigt den Strahlengang und die verwendeten Komponenten. Der über den Umlenkspiegel (M3) ausgekoppelte Teilstrahl fällt durch eine im Fokus platzierte Blende und wird anschließend parallelisiert. Ein Strahlteiler spaltet das Licht auf. Der passierende Teil fällt auf das Shack-Hartmann-Gitter und wird von ihm auf die SHA-Kamera abgebildet. Der umgelenkte Teil fällt auf eine Linse, die ihn auf die Nachführungskamera projiziert.

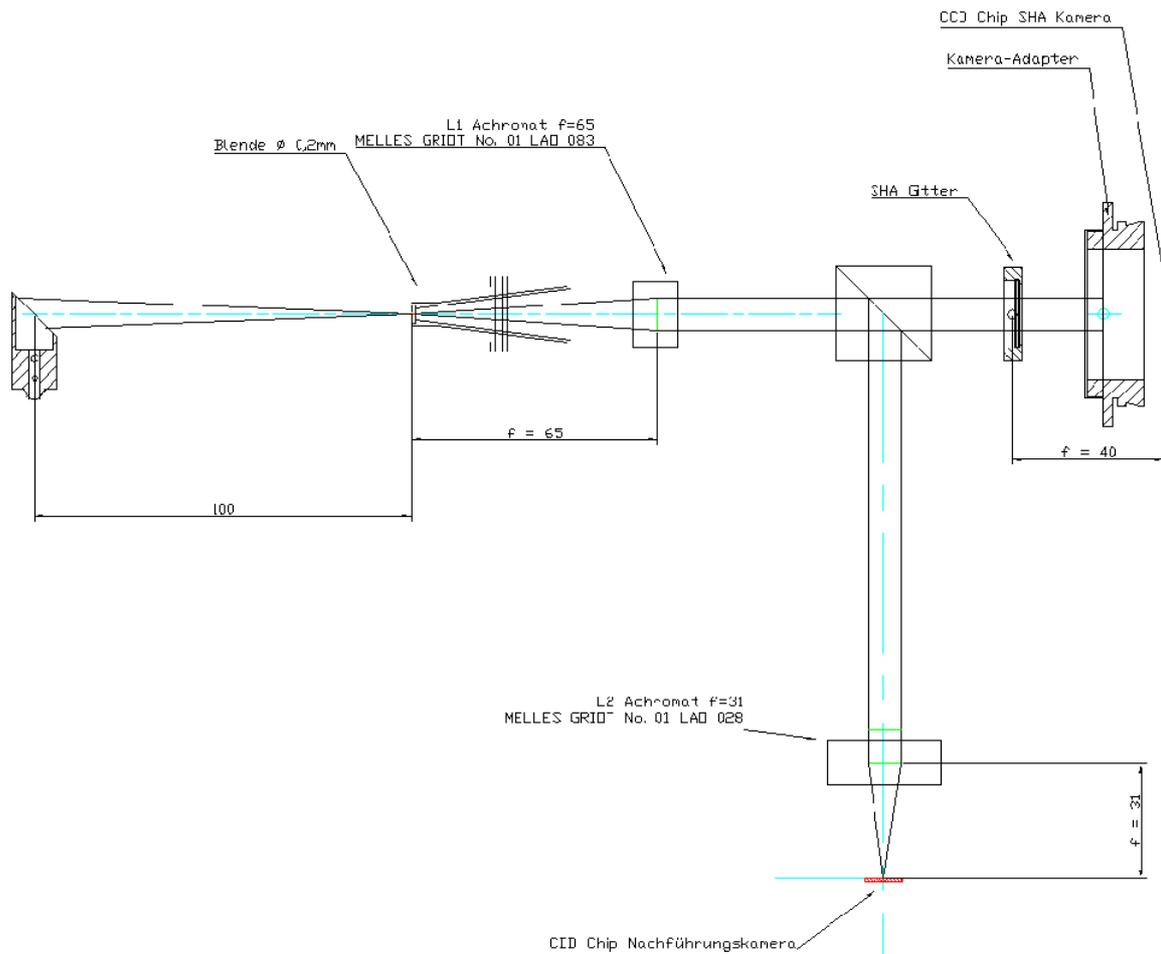


Abbildung 3.5: Strahlengang auf der Instrumentenplattform: vom Umlenkspiegel M3 links kommend fällt der Strahl durch eine im Fokus sitzende Blende und wird anschließend von der Linse L1 parallelisiert, ehe er von einem Strahlteilerwürfel teilweise nach unten Richtung Nachführungskamera geworfen wird, wo die Linse L2 für eine Abbildung auf den CCD-Chip sorgt; in Durchlassrichtung des Strahlteilers befindet sich das SHA-Gitter

Wie in 2.3.1 dargestellt wird für die Shack-Hartmann-Analyse eine Referenz- und eine zu analysierende Aufnahme benötigt, um die Verschiebungen zu messen. Der von der ESO und Klaus Weißbauer (AIRUB) stammende Entwurf sieht zwei per Elektromotor ansteuerbare Klappblenden vor: eine Beobachtungs- und eine Referenzblende (siehe Abbildung B.1 und B.2).

Die Referenzblende dient der optischen Herstellung eines "künstlichen Sterns", der den Idealzustand einer punktförmigen Lichtquelle widerspiegelt. Die Abbildung einer punktförmigen Lichtquelle ist dann ideal, wenn sie beugungsbegrenzt ist. Der beugungsbegrenzte, lineare Durchmesser

des Airy-Scheibchens ⁵ ist:

$$d = 2,44 \cdot \lambda \cdot N$$

Nimmt man $\lambda = 550 \text{ nm}$ an⁶ und setzt den minimalen Wert für N aus Tabelle 3.2 ein, so folgt für das HPT:

$$d = 10\mu\text{m}$$

Der Durchmesser der für das HPT gewählten Blende liegt mit $5\mu\text{m}$ unterhalb dieses Limits und kann deshalb als simulierter, idealer Stern angesehen werden. Realisiert wird er durch eine weiße LED, deren Abstrahlung durch ein Milchglasscheibchen homogenisiert wird, bevor es auf die Blende trifft.

Der ursprüngliche, in der Diplomarbeit von Kimmel (2003) entworfene Plan, einen simulierten Stern per Glasfaser einzukoppeln wurde auf Grund technischer Probleme fallengelassen: zum einen wird die Faser durch das notwendige Umklappen der Blenden bewegt und ist mechanischen Belastungen ausgesetzt, die zu einer veränderten Charakteristik bis hin zum Bruch der Faser führen können, zum anderen ist es nicht trivial und dementsprechend teuer und aufwändig, eine Faser herzustellen, die eine gleichmäßige Ausleuchtung selbst unter dauerhafter mechanischer Belastung garantiert.

Die Beobachtungsblende hat einen erheblich größeren Durchmesser von $200\mu\text{m}$. Anders als die Referenzblende hat sie nur die optische Funktion, Randstrahlen und Streulicht fernzuhalten. In einer Neumondnacht könnte man bei gut eingestelltem Teleskop auch auf die Beobachtungsblende verzichten. Technisch gesehen dient sie der Aperturbegrenzung, indem sie einen Versatz des vom Teleskop kommenden Lichts gegenüber dem Referenzlicht und der optischen Achse der parallelisierenden Linse einschränkt. Ein zu großer Versatz würde zu einer nicht vollständigen Ausleuchtung des SHA-Gitters führen und zudem durch den Versatz bedingte optische Fehler detektieren. Im paraxialen Bereich einer Linse gilt die Näherung $\sin(d/f) = d/f$, für $d = 0,2 \text{ mm}$ und $f = 65 \text{ mm}$ ist diese Näherung mit einem relativen Fehler von $2 \cdot 10^{-6}$ gut erfüllt.

Tabelle 3.4 enthält die Parameter der Linsen, Blenden und Kameras der Instrumentenplattform. Der Strahlteilerwürfel und das SHA-Gitter haben keine definierte optische Achse, die parallelisierende Linse hingegen schon. In einem Hilfsaufbau (siehe Abbildung 3.6) wurde die Blende, Linsen, Strahlteiler, SHA-Gitter und Kameras umfassende Einheit auf einen x-z-Schlitten montiert. Mittels einer Lichtfaser und einer Mikrometerblende wurde ein künstlicher Stern erzeugt. Dieser wurde auf den Rand der Blende fokussiert und der Fokus per Autokollimation mittels Strahlteiler und Fernrohr kontrolliert. Anschließend wurde das Bild des künstlichen Sterns mittels des x-y-Schlittens in die Blende verschoben. Linse, Strahlteiler und SHA-Gitter wurden so arrangiert, dass sie sowohl optimal ausgeleuchtet wurden, als auch die optische Achse der Linse möglichst mit dem geometrischen Mittelpunkt des Würfels und SHA-Gitters zusammenfielen. Der Würfel wurde so gedreht, dass er einerseits von der Frontseite reflektierte Strahlen durch die Blende zurückwarf, andererseits die Linse für die Nachführungskamera gut ausleuchtete. Diese Linse wird durch eine Verschraubung gehalten und lässt sich so auf die Nachführungskamera fokussieren. Strahlteiler, SHA-Gitter und beide Linsen wurden anschließend arretiert.

Die Tests zeigten, dass Referenz- und Beobachtungsblende auf Grund von Fertigungstoleranzen nicht übereinandersaßen. Messungen mit Hilfe eines Theodoliten ergaben eine Abweichung von

⁵Die Lichtintensität hinter einer kreisförmigen Apertur folgt der Besselfunktion 1. Art: $I(r) = (J_1(r)/r)^2$. Rechnet man die Nullstelle dieser Funktion aus und transformiert auf den Durchmesser, so folgt für die Winkelgröße $\sin(\alpha) = 1,22 * \lambda/D$ mit λ für die Wellenlänge und D als Durchmesser der Apertur.

⁶Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges, eine übliche Annahme in der optischen Astronomie.

	Parameter	Wert
L1	Durchmesser	17 mm
	Brennweite	65 mm
L2	Durchmesser	17 mm
	Brennweite	31 mm
SHA-Gitter	Durchmesser (ges.)	12 mm
	Durchmesser (Linse)	300 μm
	Brennweite	40 mm
Beobachtungsblende	Durchmesser	200 μm
Referenzblende	Durchmesser	5 μm
ST9	CCD-Pixel	512 x 512
	Pixelgröße	20 μm
FLI	CCD-Pixel	768 x 512 μm
	Pixelgröße	9 μm

Tabelle 3.4: Optische Parameter der Linsen, Blenden und Kameras auf der Instrumentenplattform

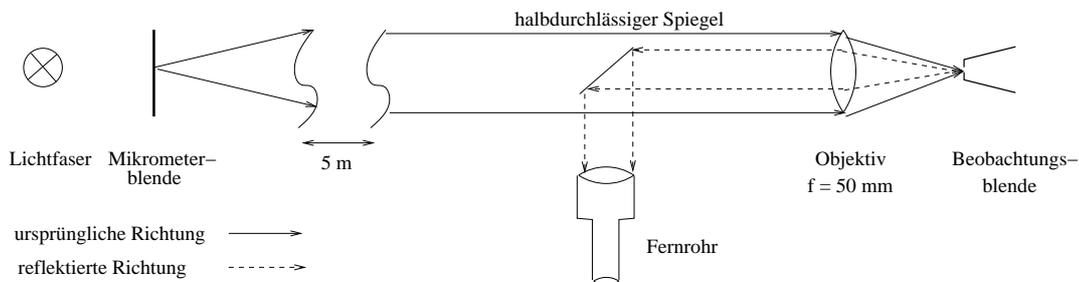


Abbildung 3.6: Hilfsaufbau zur Ausrichtung des SHA-Gitters und des Strahlteilers:

Lichtfaser und Mikrometerblende erzeugen einen künstlichen Stern, der in 5 m Abstand durch ein Objektiv mit $f = 50\text{mm}$ und Blende 8 in die Beobachtungsblende mit $d = 200\mu\text{m}$ projiziert wird. Die Fokussierung findet zunächst auf dem Blendenrand statt und wird per Autokollimation über den Strahlteiler und das Fernrohr kontrolliert. Die hinter der Blende liegenden Aufbauten sind hier nicht dargestellt, sondern Abbildung 3.5 zu entnehmen.

über 1 mm. Der Durchmesser einer Mikrolinse beträgt $300\mu\text{m}$, der Pixeldurchmesser der SHA-Kamera ist $20\mu\text{m}$, die Bildpunkte liegen also 15 Pixel auseinander. Ein Versatz von 1mm führt zu einer Verschiebung von $666\mu\text{m}$ oder 33 Pixeln bzw mehr als 2 Bildpunkten. Dies ist nicht tolerabel.

Für eine gute SHA-Analyse sollten Referenzlicht und Sternlicht vom Teleskop annähernd aus derselben Richtung auf das Gitter fallen. Das heißt, die 5 Mikrometer der Referenzblende sollten idealerweise in den 200 Mikrometern der Beobachtungsblende liegen. In diesem Fall würden die erzeugten Punktmuster genau übereinanderliegen. Weichen die Positionen der Referenz- und Beobachtungsblende voneinander ab, so äußert sich dies in einer linearen Verschiebung des Punktmusters gegeneinander. Das SHA-Verfahren beruht darauf, Bildpunkte einander zuordnen zu können, um den Versatz zu messen. Ist der lineare Versatz zwischen Referenz- und Beobachtungsmuster größer als der halbe Abstand der Bildpunkte, wird es später bei schlecht eingestelltem Spiegel schwierig bis unmöglich, eine Zuordnung vorzunehmen. Ist der Abstand der Blenden zu groß, so handelt man sich zusätzlich die Schwierigkeit ein, dass allein auf Grund der Positionsdifferenz bereits optische Fehler auftreten, die vor einer Korrektur des Hauptspiegels wieder herauszurechnen

sind. Im Interesse einer sicheren Zuordnung der Bildpunkte, sollte der lineare Versatz deutlich kleiner als der halbe Abstand zweier Bildpunkte sein. Der Versatz bei einer Positionsabweichung von 1 mm ist also viel zu hoch.

Ein weiterer Fehler betraf die Position des CCD-Chips in der als SHA-Kamera eingesetzten SBIG ST9. Bei der Konstruktion des Kameraflansches wurde davon ausgegangen, dass der CCD-Chip zentriert in der Aussparung für die Halterung sitzt. Diese Annahme stellte sich als unzutreffend heraus. Der CCD-Chip lag nicht einmal teilweise im Strahlengang.

Die als Nachführungskamera eingesetzte FLI hatte einen zu geringen Abstand zur abbildenden Linse, ein fokussiertes Bild konnte zunächst nicht hergestellt werden.

Blendenhalterung und Kameraflansch der SHA-Kamera wurden aufgrund der oben erwähnten Testergebnisse so umkonstruiert, dass sie es erlauben, Blende und Kamera so zu positionieren, dass das SHA-Gitter möglichst zentrisch getroffen und komplett ausgeleuchtet wird sowie dass das Bild mittig auf der Kamera liegt. Die Umkonstruktion wurde von Klaus Weißbauer vorgenommen, alle neu zu fertigenden Teile wurden in der Werkstatt der Fakultät für Physik und Astronomie hergestellt. Leider war es aus Platzgründen nicht möglich, für die Positioniermöglichkeiten Mikrometerschrauben vorzusehen, statt dessen wurden einfache Klemmschrauben verwendet, die das genaue Positionieren erheblich erschwerten. Im Fall der Nachführungskamera wurde ein Abstandsring eingefügt.

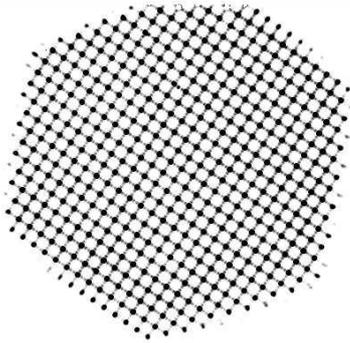


Abbildung 3.7: Erster Labortest mit der SHA-Kamera (achteckige Apertur durch Blende, die das Lichtbündel auf $f/8$ begrenzt)



Abbildung 3.8: Erster Labortest mit der Nachführungskamera

Abbildung 3.7 dokumentiert die ersten Ergebnisse mit der SHA-Kamera (SBIG ST9). Das Öffnungsverhältnis einer einzelnen Linse des SHA-Gitters ist $N = f/d = 1/133$. Der theoretische Durchmesser des Airy-Scheibchens liegt damit für Licht der Wellenlänge 550 nm bei rund $180 \mu\text{m}$, gemessen wurden 9,5 Pixel oder $190 \mu\text{m}$. Tatsächlich ist die Abbildung so gut, dass man sogar die Nebenmaxima als "Brücken" zwischen den in Negativdarstellung dunklen Punkten erkennen kann. Die einzelnen Linsen des Gitters arbeiten beugungsbegrenzt.

Abbildung 3.8 dokumentiert das Ergebnis der Fokussierung auf die Nachführungskamera. Auf den ersten Blick erscheint das Bild mit rund 10 Pixeln bzw. $90 \mu\text{m}$ als zu groß. Rechnet man das System durch, so ergibt sich am Ort der parallelisierenden Linse L1 ein Strahldurchmesser von 8,125 mm. Von den insgesamt 17 mm Durchmesser der abbildenden Linse L2 werden nur

die inneren 8 mm ausgeleuchtet. Das reale Öffnungsverhältnis beträgt damit $31/8 \approx 4$ und der Durchmesser des Airy-Scheibchens $5,4\mu\text{m}$. Allerdings arbeitet die Linse nicht beugungsbegrenzt. Eine Analyse der Linse mit ZEMAX⁷ ergibt eine mittlere quadratische Abweichung der Strahlen von $82\mu\text{m}$ (Durchmesser). Dieser Wert passt gut zum gemessenen Durchmesser des Bildes.

Es sei betont, dass es für eine Nachführungskorrektur fatal wäre, wenn die Linse L2 beugungsbegrenzt arbeiten und eine Abbildung liefern würde, die dem Durchmesser des Airy-Scheibchens entspricht. Die Pixelgröße der Nachführungskamera wäre dann knapp doppelt so groß wie die Abbildung und eine Verschiebung des Sternbildes auf der Kamera würde viel zu spät bemerkt. Im Fall einer beugungsbegrenzten Abbildung müsste man künstlich defokussieren, um eine Drift rechtzeitig zu bemerken.

Ein erster Test der Plattform am Teleskop bestätigte die falsche Positionierung der Blenden, es war nicht möglich einen Stern durch eine der Blenden zu sehen. Aufnahmen bei geöffneten Blenden zeigten, dass der Umlenkspiegel zu klein dimensioniert war, das SHA-Gitter ließ sich nicht komplett ausleuchten. Es gab ursprünglich 2 alternative Konstruktionspläne für die Instrumentenplattform, die Spiegelmaße wurden vertauscht. Bei einem $f/8$ -Bündel beträgt der Durchmesser in 10 cm Entfernung

$$d = r \cdot \tan \phi = r \cdot \frac{D}{2f} = 10 \cdot \frac{1500}{2 \cdot 12000} \text{mm} = 12,5 \text{mm}$$

Aufgrund der Verkipfung von 45 Grad müsste der Spiegel mindestens $12,5 \times 17,7$ mm groß sein. Der vorhandene Spiegel hatte ein rechteckiges Profil von 10 mm Kantenlänge, war also deutlich zu klein. Er konnte aus eigenen Beständen durch einen Spiegel mit elliptischem Profil von 23×32 mm mit Dreipunktlagerung ersetzt werden. Damit ist er eigentlich zu groß, erscheint aber für die Kommissionierungsphase als geeignet. Bei Aufnahme des Regelbetriebes sollte er durch einen kleineren Spiegel ersetzt werden.

Als Ergebnis dieser ersten Testreihe bleibt festzuhalten, dass

- die Ausrichtung von Linse, Strahlteiler und SHA-Gitter aufeinander erfolgreich durchgeführt werden konnte.
- die Ausrichtung von Strahlteilerwürfel, abbildender Linse und Nachführungskamera ebenfalls erfolgreich war.
- die Halterung für die beiden Blenden so umkonstruiert werden musste, dass sie eine Verstellmöglichkeit vorsieht.
- der Flansch für die SHA-Kamera umzukonstruieren war und ebenfalls eine Verstellmöglichkeit vorzusehen war.
- der Umlenkspiegel M3 neu zu dimensionieren war.

Um weitere Überraschungen auszuschließen, wurde das Teleskop mit zwei Einschränkungen in ZEMAX⁸ übertragen und simuliert. Das Programm kann mit einem mehrere hundert Linsen umfassenden SHA-Gitter nicht umgehen, die Zahl der Linsen wurde auf 9 bis 25 begrenzt. Auf eine Simulation des Strahlteilers wurde ebenfalls verzichtet, statt dessen wurde das SHA-Gitter durch die Linse der Nachführungskamera ersetzt und die Bildebene an deren Brennweite angepasst. Weitere Überraschungen waren nicht gefunden.

⁷Ein Simulationsprogramm für Design von optischen Systemen

⁸ZEMAX ist ein in der Astronomie und Optik weit verbreitetes Programm für den Entwurf und die Simulation optischer Komponenten.

3.4.2 Ausrichtung der Blenden und der Shack-Hartmann-Kamera

Nachdem die neue Kamerahalterung, die neuen Blenden und der Abstandshalter eingebaut waren, war die Instrumentenplattform erneut zu kalibrieren und zu prüfen. Insbesondere war der Strahlengang für beide Kameras zu überprüfen, die Blenden in Fokusposition zu bringen und übereinanderzulegen sowie eine gute Ausleuchtung des SHA-Gitters und der Betrieb nahe des Beugungslimits zu gewährleisten.

Stellvertretend für vielfältige Probleme, die im Laufe der Kalibrierung auftauchten und beseitigt wurden, sei kurz die Positionierung und Fokussierung der Beobachtungs- und Referenzblende dargestellt. Ein erster Versuch, die Blendenposition optisch zu überprüfen, zeigte, dass sie in Richtung der optischen Achse eine zu große Abweichung aufwies. Es war nicht möglich, beide Blenden bei diffuser Beleuchtung von außen scharf auf der Nachführungskamera abzubilden, was allerdings erst nach Einbau des Abstandshalters festgestellt werden konnte. Sitzt die Beobachtungsblende nicht im Fokus, so schneidet sie nicht nur Randstrahlen ab und begrenzt den Streulichteinfall, sondern sie begrenzt das Strahlenbündel selbst und wirkt - fälschlicherweise - als Eintrittspupille, also als begrenzende Öffnung für vom Teleskop kommende Strahlen. Ist die Referenzblende nicht im Fokus positioniert, so meldet das SHA-Gitter optisch einen Defokus, auch wenn das Beobachtungsobjekt im Fokus sitzt. Die Blendenhalterung war erneut umzukonstruieren um eine Positionierung in Richtung der optischen Achse zu ermöglichen. Nach der Umkonstruktion erwiesen sich die Blenden als stark exzentrisch in die Halterung eingesetzt, was die überdeckende Positionierung bei gleichzeitiger Fokussierung unmöglich machte — die Blendenhalterung musste abermals neu gefertigt und eine Ersatzblende eingesetzt werden, weil eine zerstörungsfreie Korrektur der exzentrischen Positionierung konstruktionsbedingt nicht möglich ist.

Die Kalibrierung erfolgte in mehreren Schritten:

1. bei demontiertem Umlenkspiegel Zentrierung der Beobachtungsblende auf das SHA-Gitter mittels Laser
2. Ersatz des Lasers durch ein $f/8$ -Bündel und Positionierung der Beobachtungsblende entlang der optischen Achse, so dass die SHA-Kamera ein optimales Bild liefert
3. Ausrichtung der SHA-Kamera (Abbildung zentrisch auf dem CCD-Chip)
4. Positionierung der Beobachtungs- und Referenzblende senkrecht zur optischen Achse, so dass sie einander überdecken
5. Einsatz der Weißlichtdiode in die Referenzblende und Positionierung entlang der optischen Achse, so dass die SHA-Kamera ein optimales Bild liefert
6. Korrektur des Kippwinkels des Strahlteilerwürfels, so dass der CCD-Chip möglichst zentrisch getroffen wird
7. Nachfokussierung der Linse L2, so dass die Nachführungskamera ein optimales Bild liefert
8. Kontrolle der Fokusposition beider Blenden mittels SHA- und Nachführungskamera
9. Einbau und Ausrichtung des Umlenkspiegels M3
10. Kontrolle per $f/8$ -Strahlenbündel über den Umlenkspiegel M3, Nachstellen der Blenden auf Überdeckung

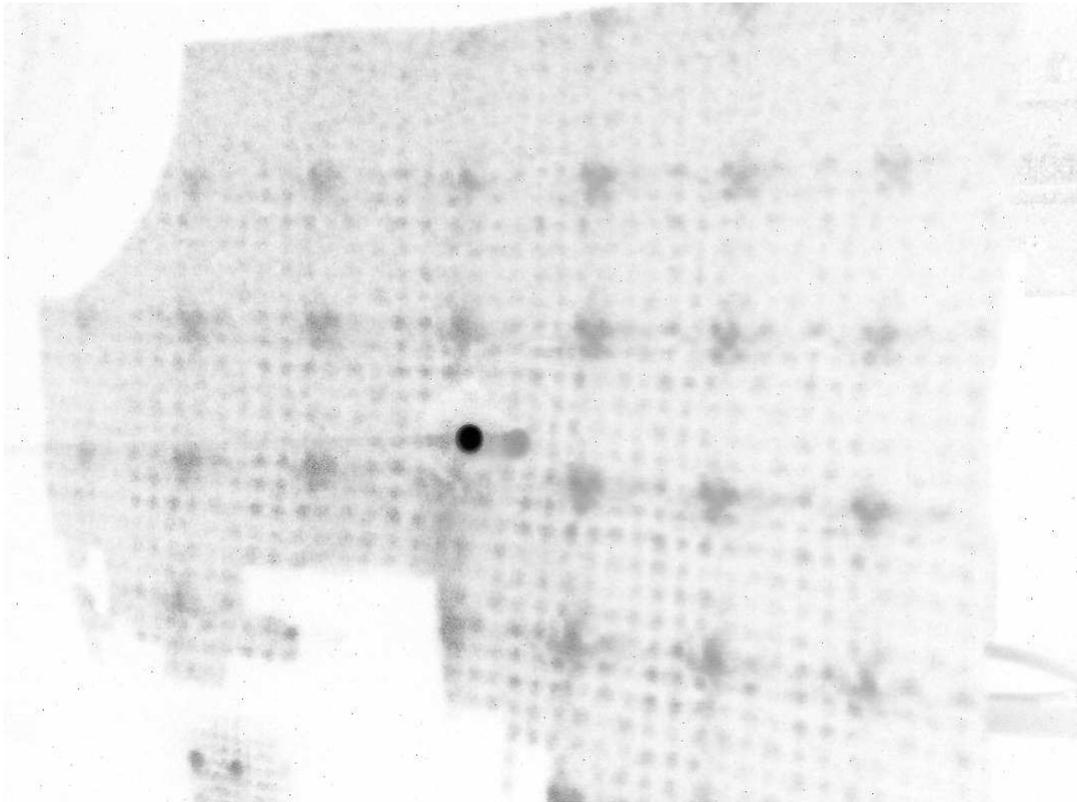


Abbildung 3.9: Reflexion des Laserlichtes vom SHA-Gitter um den abstrahlenden Laser herum (Negativdarstellung). Der dunkle Punkt in der Mitte ist die per Hilfslinse aufgeweitete Laserquelle. Sie strahlt durch ein Loch, das in ein kariertes Blatt Papier geschnitten wurde. In 5 m Abstand befindet sich die Instrumentenplattform. Ein Teil des Laserlichts fällt durch die geöffneten Blenden der Instrumentenplattform auf das Shack-Hartmann-Gitter. Die Reflexionen der Gitterlinsen werden durch das karierte Papier aufgefangen. Das so entstehende Bild wurde fotografiert. Die großen, grauen Punkte sind die Linsenreflexionen, die dazwischen liegenden kleinen Punkte die angeleuchteten Knoten des karierten Papiers. Die weißen Bereiche sind Schattenwürfe durch Aufbauten.

Im ersten Schritt wurde bei demontiertem Umlenkspiegel ein Laser so ausgerichtet, dass zunächst der von der Oberfläche der aus Messing gefertigten Beobachtungsblende reflektierte Teilstrahl zentrisch auf den Laser zurückfiel. Weil Blendenoberfläche und SHA-Gitter einen minimalen Kippwinkel aufweisen können, wurde anschließend die Blende weggeklappt und der Laser so ausgerichtet, dass der vom SHA-Gitter zurückgeworfene Reflex den Laser mittig umgab (siehe Abbildung 3.9). Anschließend wurde die Beobachtungsblende wieder vorgeklappt und so ausgerichtet, dass das durch sie fallende Laserlicht die mit 2 Glasfaserstücken markierte Mitte des SHA-Gitters traf.

Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.10 in Negativdarstellung. Das "Fadenkreuz" besteht aus zwei, in der Öffnung für die Kamera angebrachten Glasfaserstücken, die bis auf 0,6 mm genau auf die Mitte des SHA-Gitters ausgerichtet wurden. Um sie sichtbar zu machen, wurden sie von der Seite beleuchtet — in der Negativdarstellung erscheinen sie dunkel. Der Laser trifft 4 der Linsen des Gitters zentral. Das gitterförmige Netz der Mikrolinsen überlagert sich mit dem konzentrischen Muster der von der Blende erzeugten Beugungsringe und mit dem seitlich einfallenden Licht zur "Fadenkreuzbeleuchtung".

Abbildung 3.11 zeigt das Prinzip des Aufbaus. Als Lichtquelle für das $f/8$ -Bündel dient die Glühwendel einer photographischen Birne, die per Mikroskopokular (20/0,35) verkleinert wird. In 5 m

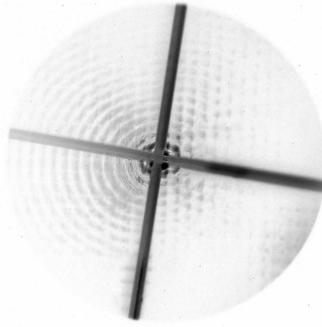


Abbildung 3.10: Zentrierung der Beobachtungsblende auf das SHA-Gitter

In Negativdarstellung ist das dunkle "Fadenkreuz" aus Glasfaserstücken gut zu erkennen. Mittig im Kreuz liegt der durch die Blende fallende Laserstrahl. Umgeben wird er von durch die Blende erzeugten Beugungsringen, die sich mit dem kartesischen Gitter der Mikrolinsen überlagern. Aufnahme per Kleinbildkamera durch ein Mikroskop.

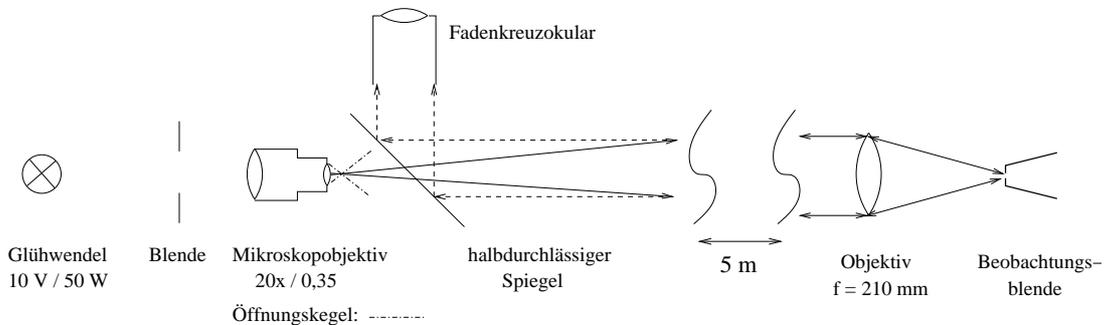


Abbildung 3.11: Schema der Blendenbeleuchtung mit $f/8$ -Bündel

Als Lichtquelle dient die Glühwendel einer Photolampe, die Blende dient nur der Abschirmung. Die Glühwendel wird durch das Mikroskopobjektiv verkleinert abgebildet, dieses Bild wirkt als Punktquelle für das 5 Meter entfernte Objektiv, das mit Blende 8 ein $f/8$ -Bündel in die Beobachtungsblende projiziert. Die Doppelpfeile und gestrichelten Pfeile stellen die Rückrichtung dar: das vom Blendenrand reflektierte Bild der Glühwendel wird vom Objektiv parallelisiert, fällt auf den halbdurchlässigen Spiegel, der ein Teilbild nach oben reflektiert, dort wird es mit einem Fernrohr mit Fadenkreuzokular betrachtet.

Entfernung wird ein Objektiv ($f = 210$ mm) mit Blende 8 benutzt, um das verkleinerte Bild der Glühwendel in die Blende zu projizieren. Die Kontrolle des Fokus erfolgt durch eine Reflexion auf dem Blendenrand (Autokollimation). Um diese zu betrachten, wurde ein halbdurchlässiger Spiegel in den Strahlengang eingefügt, der die Rückreflexion nach oben lenkt, wo sie mit Hilfe eines Fadenkreuzokulars betrachtet wurde. Die Beobachtungsblende wurde dabei mit den Motoren des x-y-Schlittens der Instrumentenplattform bewegt. In 210 mm Entfernung hat ein $f/8$ -Strahl einen Durchmesser von 26 mm, die von einer 5000 mm entfernten, punktförmigen Lichtquelle beleuchtet werden. Die Stahlen sind nicht ganz parallel, sondern weisen einen Winkel von 18 Bogenminuten auf. Die paraxiale Näherung $\sin(\phi) \approx \phi$ ist jedoch gut erfüllt, zusätzliche optische Fehler auf Grund des Öffnungswinkels können ausgeschlossen werden.

Die zentrische Ausleuchtung des SHA-Gitters durch das $f/8$ -Bündel wurde mittels einer in die spätere Position der Kamera gehaltenen Feldlinse und des als Mittenmarkierung benutzten Fadenkreuzes aus Glasfaserstücken kontrolliert.

Als nächstes wurde die Halterung der SHA-Kamera so positioniert, dass der CCD-Chip möglichst

mittig vom $f/8$ -Bündel getroffen wird. Dies erwies sich als recht mühselig, weil aus Platzgründen keine Halterung mit Mikrometerschrauben, sondern eine einfache, in 2 Richtungen bewegliche, durch Klemmschrauben gehaltene Platte verwendet wurde.

Die Ausrichtung der Beobachtungs- und Referenzblende aufeinander bei gleichzeitiger Positionierung im Fokus war sehr zeitaufwändig — wieder kamen nur einfache Klemmschrauben zum Einsatz. Die SHA-Kamera wurde dafür aus der Halterung genommen und der Lichtweg umgekehrt. Das SHA-Gitter wurde von hinten mit einer Lichtfaser bestrahlt und mittels einer Hilfsoptik mit Fadenkreuz die Position der Mitte der erleuchteten Beobachtungsblende markiert. Anschließend wurde die Beobachtungsblende aus dem Strahlengang geklappt und die Referenzblende eingeklappt. Deren Position war so zu verändern, dass sie möglichst auf dem Fadenkreuz lag. Eine Gegenkontrolle erfolgte durch Ausrichtung des Fadenkreuzes auf die Referenzblende. Nach einem erneuten Umklappen der Blenden musste das Fadenkreuz dann im $200\mu\text{m}$ Kreis der erleuchteten Beobachtungsblende liegen. Leider war dies nicht ganz zu erreichen, da sich die Blenden durch das Anziehen der Klemmschrauben immer wieder leicht verschoben. Erreicht wurde eine Positionierung der Referenzblende am Rand der Beobachtungsblende. Für die Shack-Hartmann-Analyse ist das unkritisch und äußert sich nur in einer linearen Verschiebung des Referenz- gegenüber dem Beobachtungsmuster von einem Pixel. Zusätzliche optische Fehler werden bei einem solch kleinen Versatz noch nicht detektiert, weil dieser Wert unterhalb des kritischen Wertes für die Suche nach einander zugeordneten Punkten liegt. Eine lineare Verschiebung des gesamten Punktmusters um 1 Pixel wird durch das Auswertungsprogramm automatisch korrigiert.

Nach erfolgreicher Ausrichtung wurde die SHA-Kamera wieder angebaut, das $f/8$ -Strahlenbündel durch die Beobachtungsblende aufgenommen, die Weißlicht-LED an der Referenzblende angebracht und eine Referenzaufnahme gemacht.

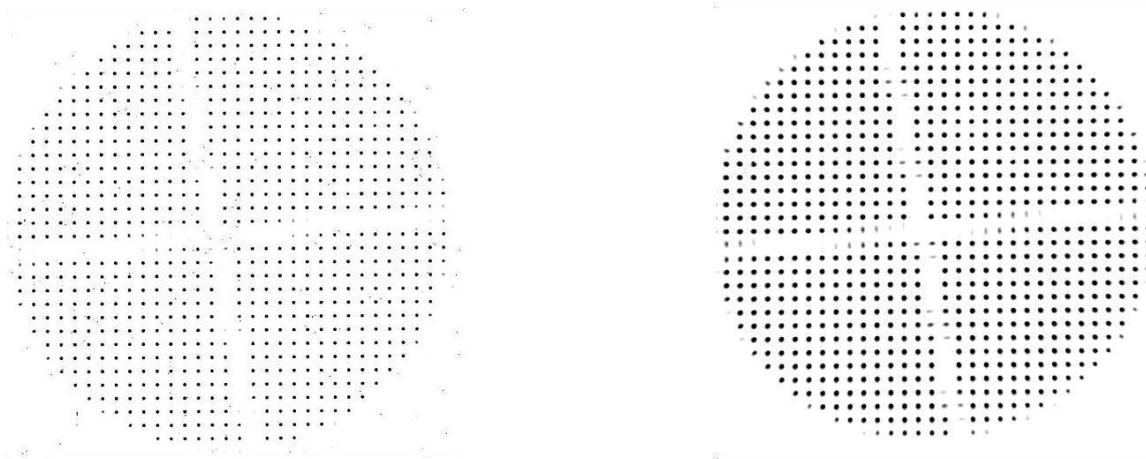


Abbildung 3.12: Referenzaufnahme (links) und $f/8$ -Strahlenbündel (rechts) mit der SHA-Kamera: die $5\mu\text{m}$ -Referenzblende wirkt als Punktlichtquelle und leuchtet den kompletten Halbraum aus. Das $f/8$ -Bündel ist geometrisch auf dieses Öffnungsverhältnis begrenzt. Aus diesem Grund fehlt rechts der äußere Kreis von Punkten. Das Kreuz ist die Abschattung der zur ungefähren Mittenmarkierung angebrachten Glasfasern

Abbildung 3.12 zeigt das Ergebnis. Die $5\mu\text{m}$ -Referenzblende im linken Teilbild wirkt als punktförmige Quelle, die den kompletten Halbraum ausleuchtet. Der durch die Beobachtungsblende fallende Strahl im rechten Teilbild ist geometrisch auf $f/8$ begrenzt und leuchtet nur einen Teilraum aus. Wegen dieser Begrenzung fehlen die äußeren Punkte im rechten Teilbild. Der kreuzförmige Schatten stammt von den zur Mittenmarkierung angebrachten Glasfaserstücken. Die Ausrichtung der Glasfasern ist nicht exakt, sondern weist eine Abweichung von $0,6\text{ mm}$ auf.

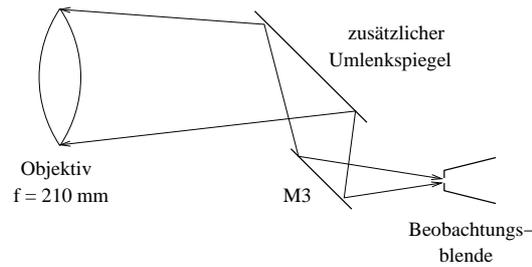


Abbildung 3.13: Prinzipzeichnung des Aufbaus mit Umlenkspiegel M3. Um eine Beleuchtung aus der Horizontalen zu erreichen musste ein zusätzlicher Umlenkspiegel in den Aufbau integriert werden.

Als nächstes wurde der Umlenkspiegel M3 montiert und ausgerichtet. Dazu wurde ein Laser verwendet, der in eine Fassung montiert war, die von oben auf die Hülse des Umlenkspiegels gesteckt werden konnte. Die Dreipunktlagerung des Umlenkspiegels wurde so ausgerichtet, dass der Laserstrahl die Öffnung der Beobachtungsblende traf. Die Ausrichtung wurde durch Strahlumkehr kontrolliert und verbessert. Dazu wurde der Laser wieder entfernt, die SHA-Kamera abgebaut und das SHA-Gitter von hinten, aus der Position der Kamera, mit einer Lichtfaser beleuchtet. Der Umlenkspiegel wurde so ausgerichtet, dass das aus der Beobachtungsblende austretende Bündel die Hülse zentrisch verließ und senkrecht nach oben fiel. Um den Aufbau für das $f/8$ -Bündel weiter nutzen zu können, wurde über dem M3 ein weiterer Umlenkspiegel angebracht. Den geänderten Aufbau zeigt Abbildung 3.13. Das Objektiv und die Lichtquelle waren entsprechend anzuheben und neu auszurichten.

Die Ausrichtung aller Komponenten aufeinander erfolgte mittels Strahlumkehr und dem oben beschriebenen Autokollimationsverfahren. Dazu wurde die Höhe des zusätzlichen Umlenkspiegels vermessen und der Aufbau mit der Lichtquelle in dieselbe Höhe gebracht. Die Beleuchtung aus der Position der SHA-Kamera erzeugt ein Bild der Beobachtungsblende, das vom M3 und dem zusätzlichen Umlenkspiegel in Richtung der Lichtquelle geworfen wird. Dieses Bild wurde auf das Mikroskopobjektiv zentriert. Anschließend wurde die Lichtfaser entfernt, die Lichtquelle des $f/8$ -Bündels eingeschaltet und die Ausleuchtung des SHA-Gitters mittels einer Feldlinse visuell kontrolliert. Abschließend wurde die SHA-Kamera wieder montiert und ein Bild der Referenzquelle und des $f/8$ -Bündels aufgenommen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.14. Der Durchmesser der Gitterpunkte beträgt wie schon im ersten Test 9 Pixel oder rund $180\mu\text{m}$.

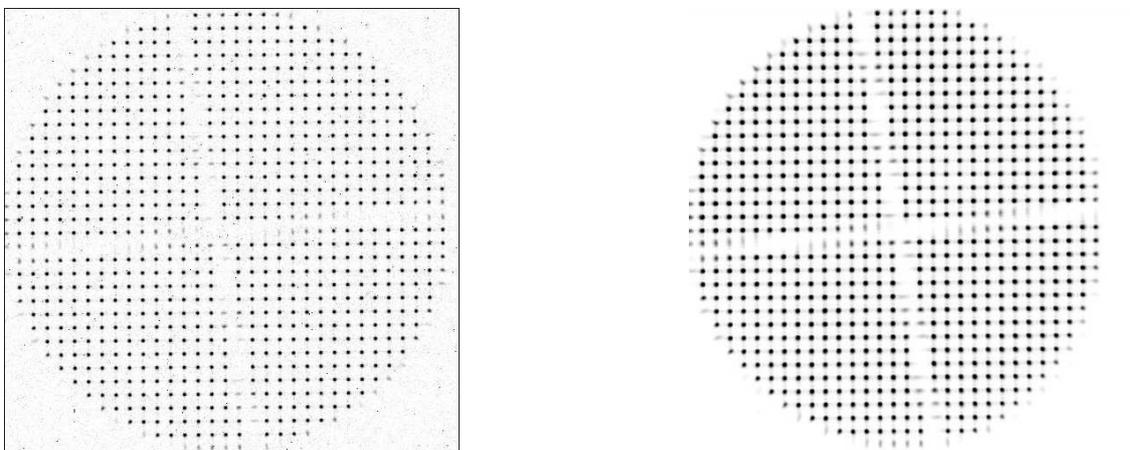


Abbildung 3.14: Referenzaufnahmen (links) und $f/8$ -Strahlenbündel (rechts) mit montiertem M3: Im Bild des $f/8$ -Bündels fehlen rechts einige Punkte.

Während der Tests wurden die Beobachtungs- und Referenzblende häufig hin und her geklappt. Die Beobachtungsblende löste sich dabei in ihrer Fassung und verschob sich erneut. Baubedingt kann die Fassung der Blende nur einmal verwendet werden, weil sie nicht zerstörungsfrei zu öffnen ist. Die Blende musste erneut gefertigt und wieder auf die Referenzblende ausgerichtet werden. Das gesamte oben beschriebene Verfahren war zu wiederholen. Abbildung 3.14 zeigt den Zustand nach Ende aller Arbeiten. Zwar fehlen am rechten Rand weitere Punkte, dies ist jedoch auf die schwierige Ausrichtung des Hilfsspiegels, des Objektivs und der 5 m entfernten Lichtquelle aufeinander zurückzuführen. Schon eine leichte Schrägstellung des Objektivs oder ein leichter Kippwinkel der Lichtquelle führt zu einer weiteren Aperturbegrenzung.

Die Aufnahmen durch die Referenz- und Beobachtungsblende weisen einen leichten Versatz des Punktmusters auf. Um diesen genauer zu bestimmen, wurde jeweils das Zentrum desselben Bildpunktes in den vier Ecken und ein Bildpunkt im Zentrum der Aufnahmen ausgemessen und der mittlere Abstand beider Punkte bestimmt. Das Ergebnis ist in Tabelle 3.5 zusammengefasst.

	x_{ref}	y_{ref}	x_{beob}	y_{beob}	Δ_x	Δ_y	r	Δ_r
rechts oben	353,0	444,0	355,0	442,0	-2,0	2,0	2,8	0,7
rechts unten	386,0	91,5	388,0	88,0	-2,0	3,5	4,0	0,7
links unten	109,5	89,0	110,5	86,0	-1,0	3,0	3,2	0,6
links oben	76,5	426,0	77,0	424,0	-0,5	2,0	2,1	0,6
Zentrum	262,0	290,0	263,0	287,0	-1,0	3,0	3,2	0,6
Mittelwert					-1,3	2,7	3,0	0,65

Tabelle 3.5: Differenzen zwischen Referenz- und Beobachtungsmuster

Alle Werte sind in Pixeln angegeben: x- und y-Position im Referenzbild, x- und y-Position im Bild durch die Beobachtungsblende, Differenz in x- und y-Richtung, Abstand und Fehler des Abstandes. Der Messfehler der Positionen beträgt $\pm 0,5$ Pixel.

Alle Messwerte sind in Pixeln auf der SHA-Kamera angegeben, der Messfehler beträgt für alle Positionen $\pm 0,5$ Pixel. Von links nach rechts sind x- und y-Position des Punktes in der Referenzaufnahme, x- und y-Position desselben Punktes in der Aufnahme durch die Beobachtungsblende, die Differenzen in x- und y-Richtung, der Abstand beider Punkte sowie der Fehler des Abstandes angegeben.

Aus dem mittleren Abstand von $3,0 \pm 0,65$ Pixeln und der Pixelgröße von $20 \mu\text{m}$ folgt ein Versatz von $\Delta_r = 60 \pm 13 \mu\text{m}$. Die Linse L1 sowie jede der Mikrolinsen sind ein abbildendes System mit den Brennweiten $f_{L1} = 65 \text{ mm}$ und $f_{SHA} = 40 \text{ mm}$. Der Versatz der Beobachtungs- und Referenzblende errechnet sich dann aus

$$\Delta_{Blenden} = \Delta_r \cdot \frac{f_{L1}}{f_{SHA}} = (90,0 \pm 19,5) \mu\text{m} \quad (3.5)$$

Die Referenzblende liegt damit in der Nähe des Randes der Beobachtungsblende. Für eine Shack-Hartmann-Analyse ist dies ausreichend.

3.4.3 Ausrichtung der Nachführungskamera

Die Ausrichtung der Nachführungskamera verlief problemlos, ein guter Teil der Arbeit, etwa die Ausrichtung der Blenden, ist schon im Rahmen der Arbeiten für die Shack-Hartmann-Kamera geleistet worden. Nachdem Referenz- und Beobachtungsblende in dieselbe Fokusposition gebracht

wurden, war das Bild für die Nachführungskamera mit Hilfe der Linse L2 nachzufokussieren und die Lage leicht zu korrigieren. Da die Linse in einer Schraubfassung sitzt, die für die Fokussierung vorgesehen ist, gelang dies problemlos. Abbildung 3.15 zeigt das Ergebnis.



Abbildung 3.15: Referenzaufnahmen (links) und $f/8$ -Strahlenbündel (rechts) mit montiertem M3

Der Durchmesser des Bildes beträgt 10 Pixel oder rund $90\mu\text{m}$, dies entspricht dem im ersten Test festgestellten Wert. Das zur Kontrolle aufgenommene Bild der Referenzblende erscheint allerdings auf Grund des erheblich kleineren Durchmessers der Referenzblende deutlich schärfer.

Die Pixelpositionen der beiden Bildzentren auf der Kamera sind $(378, 236)$ für die Beobachtungs- und $(282, 290)$ für die Referenzblende, jeweils wieder mit einem Messfehler von $0,5$ Pixeln. Ihre Differenz beträgt in x- und y-Richtung jeweils 4 Pixel. Ihr Abstand auf der CCD ist dann $5,7 \pm 0,7$ Pixel bzw $(51 \pm 6,3)\mu\text{m}$. Analog zur Rechnung in Gleichung 3.5 erhält man für den Abstand der beiden Blenden:

$$\Delta_{Blenden} = \Delta_r \cdot \frac{f_{L1}}{f_{L2}} = (106,9 \pm 13,2)\mu\text{m} \quad (3.6)$$

Mittelt man die Ergebnisse aus 3.5 und 3.6, so kommt man auf einen Wert von

$$\Delta_{Blenden}^- = (98,5 \pm 16,9)\mu\text{m} \quad (3.7)$$

3.4.4 Zusammenstellung der Ergebnisse der Arbeit an der Instrumentenplattform

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass es gelang

- Beobachtungsblende, SHA-Gitter und -Kamera zu zentrieren
- Beobachtungs- und Referenzblende aufeinander auszurichten
- das SHA-Gitter im erforderlichen Maß auszuleuchten
- die durch das ständige Umklappen der Blende mechanisch anfällige Einkopplung des Referenzlichtes per Glasfaser wurde durch eine erheblich stabilere Lösung mittels Weißlichtdiode und Milchglasscheibe ersetzt

Es sei darauf hingewiesen, dass Aufnahmen mit der SHA-Kamera erheblich längere Belichtungszeiten erfordern als Aufnahmen mit der Nachführungskamera. Die Linse der Nachführungskamera wird mit einem Durchmesser von 8 mm ausgeleuchtet, eine Mikrolinse des SHA-Gitters hat nur 0,3 mm Durchmesser, ihre Licht sammelnde Fläche ist um einen Faktor 711 kleiner. Wünschenswert erscheint eine Korrektur alle 10 bis 15 Minuten, falls die wissenschaftliche Beobachtung nicht längere Belichtungen erfordert oder die Belichtung unterbrochen werden kann. Das begrenzt die für eine Aufnahme mit der Nachführungskamera zur Verfügung stehende Belichtungszeit nach unten auf rund 1 Sekunde, bei kürzeren Zeiten wäre die Ausleuchtung zu schwach für eine sichere Nachführungskorrektur. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 dargestellt, liegt die maximale Ausleserate der Nachführungskamera bei 2 Sekunden. Eine echte Einschränkung des Beobachtungsbetriebes durch die notwendigen, langen Belichtungszeiten der SHA-Kamera ist in der derzeitigen Konfiguration nicht zu erwarten.

Abschließend wurden sämtliche Schrauben mit Siegelack arretiert, die Plattform wurde verpackt und nach Chile verschifft. Am OCA ist die Ausrichtung der Plattform erneut zu prüfen und gegebenenfalls zu korrigieren, denn es erscheint wahrscheinlich, dass sich während des Transports etwas verstellt. Um die Prüfung dort zu vereinfachen, sind zwei baugleiche Linsen zu bestellen, mit deren Hilfe das Licht des vom Mikroskopobjektiv erzeugten Bildes der Glühwendel parallelisiert und — durch die zweite Linse — in ein $f/8$ Bündel transformiert wird. Zwar würde ein Durchmesser von 6 cm ausreichen, es ist jedoch ein größerer Durchmesser erforderlich um Fehler durch Randstrahlen zu vermeiden. Der Strahldurchmesser ist dann vor der zweiten Linse durch eine Blende auf 5,6 cm zu verringern. Geeignet erscheint Melles-Griot LQB244F mit einer Brennweite von jeweils 250 mm und einem Durchmesser von 75 mm.

3.4.5 Bestimmung optischer Fehler aus Pupillenaufnahmen am HPT

Pupillenaufnahmen stellen ein wertvolles, weil direktes Mittel zur Überprüfung der optischen Fehler dar. Zu ihrer Auswertung ist kein Programm nötig, sie können also dazu dienen, die mittels anderer Verfahren, etwa der Shack-Hartmann-Analyse, gewonnenen Aussagen über optische Fehler zu überprüfen. Weil der physikalische Hintergrund der Shack-Hartmann-Analyse gut bekannt und das Verfahren etabliert ist, lässt sich mit Hilfe von Pupillenaufnahmen letztlich die programmtechnische Umsetzung der Analyse überprüfen. Die Auswertung von Pupillenaufnahmen ist in der Kommissionierungsphase eines Teleskops von hohem Wert. Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens findet sich in "Reflecting Telescope Optics I" von Wilson (2001), der theoretische Hintergrund in "Reflecting Telescope Optics II" von Wilson (2004). Das Verfahren sei hier nur kurz zusammengefasst.

Für eine Analyse von Pupillenaufnahmen benötigt man eine intrafokale und eine extrafokale⁹ Aufnahme. Mit Hilfe dieser beiden Aufnahmen lassen sich folgende Fehler feststellen:

- Geometriefehler
- Koma
- Astigmatismus
- sphärische Aberration

⁹Intrafokal: die Kameraposition liegt vom Teleskop aus gesehen vor der Fokusposition; extrafokal: die Kameraposition liegt hinter der Fokusposition

Abbildung 3.16 illustriert anhand des fokussierten Bildes eines Einzelsterns die Wirkung von Koma, Astigmatismus und sphärischer Aberration; der Geometriefehler zeigt sich in fokussierten Aufnahmen nicht, die Erläuterung folgt weiter unten. In der Abbildung oben links ist ein ideales, beugungsbegrenztes Bild eines einzelnen Sterns zu sehen, man erkennt sogar das erste Nebenmaximum als Ring um das zentrale Beugungsscheibchen herum. Das Teilbild rechts oben zeigt das Bild mit Komafehler, das zentrale Beugungsscheibchen weist eine nach unten zeigende, an einen Kometenschweif erinnernde Ausbuchtung auf, ein erheblicher Teil der Energie wird in Teile der Nebenmaxima transferiert und ist als V-förmige Struktur oberhalb des Hauptbildes zu sehen. Links unten ist eine astigmatische Abbildung zu sehen: genauer gesagt gibt es bei astigmatischen Bildern zwei um 90 Grad gegeneinander versetzte Brennlinien, meridionaler und sagittaler Brennpunkt genannt. In der Mitte zwischen diesen Brennlinien erscheint der Stern so wie dargestellt als Scheibchen mit kreuzförmigen Ausläufern in Richtung der Brennlinien. Im Bild rechts unten ist die Wirkung von sphärischer Aberration zu sehen: zentrale Strahlen und Randstrahlen haben einen entlang der optischen Achse versetzten Brennpunkt. Für eine genaue Darstellung, wie diese Bilder zustandekommen, wird auf die Fachliteratur, etwa Max Born (1965) oder Kühlke (2004) verwiesen.



Abbildung 3.16: Bildfehler bei fokussiertem Teleskop

links oben: ideales, beugungsbegrenztes Sternbild. rechts oben: mit Koma

links unten: mit Astigmatismus, rechts unten: mit sphärischer Aberration

Die prinzipielle Wirkung aller vier Fehler auf Pupillenaufnahmen illustriert Abbildung 3.17. Ein Geometriefehler macht sich durch eine Dezentrierung der Abschattung des Sekundärspiegels bemerkbar, die intra- und extrafokal ihre Richtung beibehält. Er kommt durch eine azentrische Fehlstellung von Haupt- und Sekundärspiegel zustande. Ist der Sekundärspiegel nicht zentrisch auf den Hauptspiegel ausgerichtet und liegt der Hauptspiegel etwas schief in der Halterung, so funktioniert das Teleskop als komafreier Schiefspiegler. Im fokussierten Bild macht sich dies nicht bemerkbar. Im defokussierten Pupillenbild aber sieht man die azentrische Ausrichtung des Sekundärspiegels. Die Richtung der Abschattung dreht sich im Fokus gerade um, durchläuft dort sozusagen den Nullpunkt, und weist auf beiden Seiten des Fokus entgegengesetzte Richtungen auf.

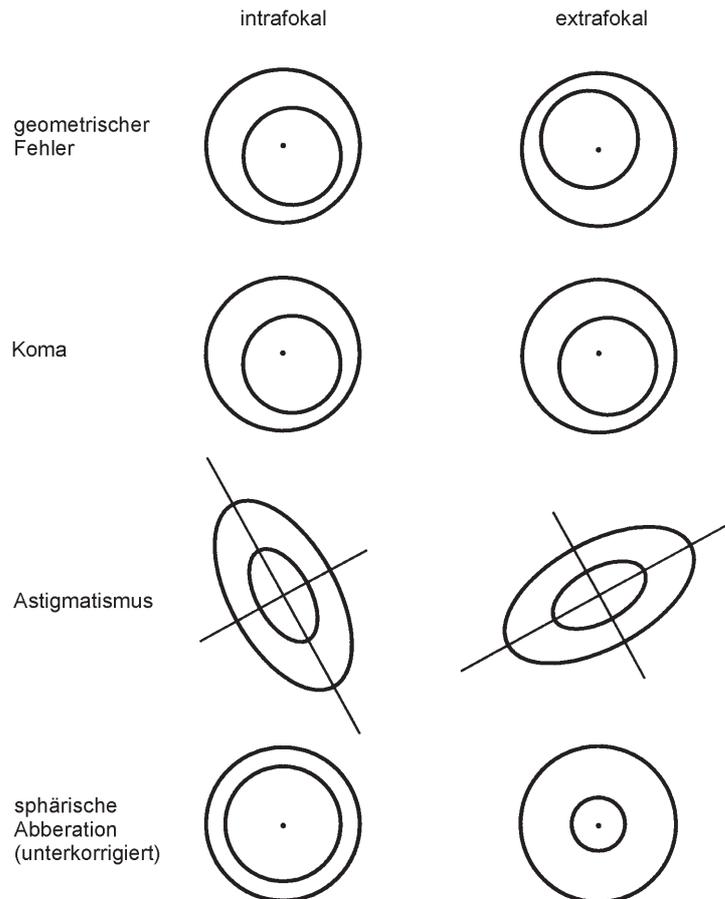


Abbildung 3.17: Wirkung optischer Fehler in Pupillenaufnahmen von oben nach unten: Geometriefehler zeigen einen Versatz der Abschattung des Sekundärspiegels, der intrafokal und extrafokal eine entgegengesetzte Richtung hat; Koma bewirkt ebenfalls einen Versatz, der allerdings intrafokal und extrafokal dieselbe Richtung aufweist; Astigmatismus verzerrt das Pupillenbild zu einer Ellipse, die auf intra- und extrafokalen Aufnahmen um 90 Grad gedreht erscheint; sphärische Aberration verändert das Verhältnis von Innendurchmesser zu Außendurchmesser der Pupille

Koma zeigt sich ebenfalls als Dezentrierung der Abschattung durch den Sekundärspiegel. Mit nur einem Bild ist Koma nicht von einem geometrischen Fehler zu unterscheiden. Bei vorhandener Koma indes behält die Dezentrierung auf beiden Seiten des Fokus ihre Richtung bei. Um sie sicher zu ermitteln, ist eine intra- und eine extrafokale Aufnahme nötig. Durch Mittelung der Dezentrierung lässt sich der Geometriefehler herausrechnen und die Koma ermitteln.

Astigmatismus verzerrt die idealerweise kreisrunde Pupille zu einer Ellipse. Aus der Exzentrizität lässt sich die Größe des Astigmatismus ermitteln.

Sphärische Aberration ändert das Verhältnis des inneren zum äußeren Durchmessers der Pupille in intra- und extrafokalen Aufnahmen. Hier führt ein Vergleich der Verhältnisse von innerem zu äußerem Durchmesser auf einen Wert für den Bildfehler.

Abbildung 3.18 zeigt während des ersten Tests der Instrumentenplattform in Bochum gewonnene Pupillenaufnahmen von Polaris, intrafokal im linken, extrafokal im rechten Teilbild. Vor den Aufnahmen wurde in Zenitstellung des Teleskops eine Metallplatte mit einem zentrisch angebrachten



Abbildung 3.18: Pupillenaufnahmen von Polaris mit dem HPT: links intrafokal, rechts extrafokal.

Laser in das Zentralloch des Hauptspiegels eingesetzt. Der Laser strahlt senkrecht nach oben und unten, er wurde in der Einbauhülse so justiert, dass der Taumelfehler bei Drehung kleiner als das Zerstreuungsscheibchen ist. Der Sekundärspiegel wurde mit Hilfe der neu eingebauten Motoren so ausgerichtet, dass der Laser den Sekundärspiegel ungefähr zentrisch traf und der Strahl in sich selbst zurückreflektiert wurde. Ungefähr, weil der Sekundärspiegel in Bochum keine Mittenmarkierung hatte, eine Abschätzung also nur mit dem Auge vorgenommen werden konnte. Es ist also trotz aller Mühen mit einer Dezentrierung des Sekundärspiegels zu rechnen, die sich als Koma zeigen wird. Anschließend wurde das Teleskop auf Polaris gefahren, die Sekundärspiegeleinstellung korrigiert und die Laserplatte zwecks Beobachtung entfernt.

Durch Vergleich der Pupillenaufnahmen mit Abbildung 3.17 erkennt man sofort, dass Astigmatismus der weitaus stärkste Fehler ist, den der ungestellte Hauptspiegel des HPT aufweist. Die ungleichmäßige Ausleuchtung der Aufnahmen ist auf die Überalterung der Verspiegelung zurückzuführen. Die eher kantig als elliptisch erscheinende Form in der extrafokalen Aufnahme ist teils auch darauf zurückzuführen, dass die Aufnahmen noch mit dem alten, zu kleinen M3 gemacht wurden, dessen Kante aperturbegrenzend wirkte. Die Aufnahmen wurden mit Hilfe des Programmpaketes DS9¹⁰ ausgewertet.

Für die intrafokale Aufnahme in Abbildung 3.19 wurde der Hintergrund durch Ausmessen der Zählrate ("Counts") bestimmt, Ergebnis: 7000. Davon abgeleitet wurden Konturgrenzen definiert: beim 1,5-fachen, 4-fachen und 6-fachen dieses Wertes. Hinzugefügt wurde eine Konturlinie bei 60.000, um den Sättigungsbereich der Kamera zu kennzeichnen.

Auffällig ist die Ausbuchtung rechts unten um das Helligkeitsmaximum herum. Die Aufnahme entstand in Bochum und in Richtung Polaris befanden sich die Universitätsgebäude mit auch nachts erleuchteten Fenstern sowie diversen Straßenlaternen. Wahrscheinlich handelt es sich bei dem Helligkeitsmaximum um die Reflexion einer Straßenlaterne, sie tritt in allen Pupillenaufnahmen von Polaris auf, unabhängig von Datum und Zeit. Bei der Bildanalyse ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

Zunächst sind die Mittelpunkte der äußeren und inneren Begrenzung der Pupille zu bestimmen. Die Messpunkte sind in Abbildung 3.19 als Kreuz eingezeichnet. Bei der Bestimmung des minimalen y -Wertes der äußeren Begrenzung wurde die um 14 Pixel weiter unten liegende, wahrscheinlich

¹⁰SAOImage DS9 ist ein Programm des Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) zum Betrachten und Auswerten von Fotos im in der Astronomie üblichen fits-Format.

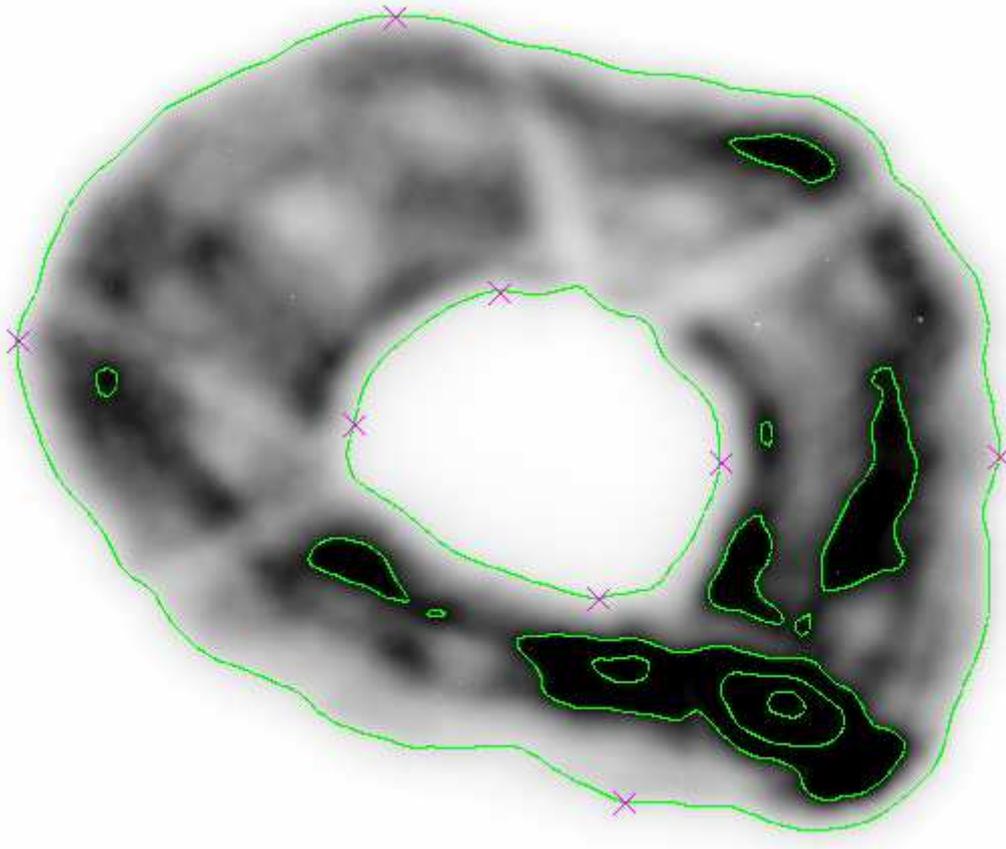


Abbildung 3.19: Intrafokale Pupillenaufnahme von Polaris, Hintergrund: 7000, Konturlinien bei 10.500, 28.000, 42.000, 60.000

durch eine Reflexion verursachte Ausbuchtung nicht berücksichtigt. Das HPT steht zwar mittlerweile in Chile, aus technischen Gründen war es jedoch noch nicht möglich, die Instrumentenplattform am Teleskop zu testen. Derzeit driften die zur Steuerung verwendeten Relativencoder der Teleskopmontierung, so dass Sterne nicht stabil im Bildfeld gehalten werden können. Die visuelle Begutachtung auf Papier projizierter Pupillenaufnahmen weist keine Ausbuchtung auf, die Ausleuchtung ist auch auf Grund der neuen Verspiegelung homogen. Es erscheint also gerechtfertigt, die Ausbuchtung für die Auswertung der in Bochum gewonnenen Pupillenaufnahmen zu vernachlässigen. Der minimale y -Wert wurde dort abgelesen, wo die äußere Konturlinie wieder leicht ansteigt, bevor sie auf Grund der Reflexion wieder weiter abfällt. Der obere Teil von Tabelle 3.6 enthält die Ergebnisse. Als Ablesefehler werden pauschal ± 2 Pixel angenommen, bei der Berechnung der Mittelpunkte wurden halbe Pixel aufgerundet.

Die extrafokale Aufnahme 3.20 erscheint auf Grund ihrer Form kaum auswertbar. Sie soll auch nur dazu dienen, zwischen Geometriefehler und Koma zu unterscheiden. Anders gefragt: liegt die Verschiebung der Abschattung auf derselben Seite wie in der intrafokalen Aufnahme oder kehren sich die Vorzeichen um? Es genügt, einen Hinweis ableiten zu können. Der Hintergrund liegt in dieser Aufnahme bei 6200 Counts. Die Konturlinien wurden wie oben aus dem Hintergrundniveau bestimmt. Das Sättigungsniveau der Kamera wird in dieser Aufnahme nicht erreicht. Lassen sich die Werte für die Außenbegrenzung der Pupille noch zwanglos bestimmen, so ist die Bestimmung der inneren Pupillenmaße problematisch, insbesondere in x -Richtung auf Grund der Abschattungen durch die M2-Beine. Gewählt wurden Messpunkte, bevor die Konturlinie auf Grund der Beinschatten weiter abfällt. Die Ergebnisse stehen im unteren Teil von Tabelle 3.6.

Bildet man nun die Differenz zwischen äußerer und innerer Mittelpunktsposition, so erhält man

Bild	Ort		x	y
intrafokal	außen	min	101	93
		max	588	486
		Mitte	345	290
	innen	min	268	195
		max	450	348
		Mitte	359	272
extrafokal	außen	min	296	34
		max	622	446
		Mitte	459	240
	innen	min	429	200
		max	495	280
		Mitte	462	240

Tabelle 3.6: Mittenpositionen der Pupillen

Für das intra- und extrafokale Pupillenbild wurden jeweils Minimum und Maximum der Koordinaten des Pupillenrandes (außen) und der Abschattung durch den M2 (innen) bestimmt. Aus diesen Werten errechnet sich die Lage des Mittelpunktes (Mitte), halbe Pixel werden aufgerundet. Alle Werte sind in Pixeln angegeben, für alle Messwerte wird ein Fehler von ± 2 Pixeln angenommen.

folgende Ergebnisse:

$$\text{intrafokal: } \Delta_{Mi} = (-14 \pm 4; 10 \pm 4) \quad \text{extrafokal: } \Delta_{Me} = (-3 \pm 4; 0 \pm 4) \quad (3.8)$$

Ein Vorzeichenwechsel und damit ein Geometriefehler kann in der extrafokalen Aufnahme auf Grund der Fehlergrenzen nicht sicher ausgeschlossen werden. Dieses Ergebnis war unbefriedigend, die Pupillenaufnahmen sollten wiederholt und es sollte versucht werden, die Reflexion in der intrafokalen Aufnahme zu beseitigen. Die Ausrichtung des Sekundärspiegels wurde wie oben beschrieben wiederholt, um eventuelle Fehler auszuschließen. Die Ausrichtung des alten, zu kleinen Umlenkspiegels wurde ebenfalls kontrolliert. Die Aktuatoren des Hauptspiegels wurden in Mittenposition gestellt. Die Reflexion blieb dennoch konstant an derselben Stelle. Dies erhärtet den Verdacht, dass es sich um eine Einstreuung von außen handelt. Die Belichtungszeit der intrafokalen Aufnahme wurde so korrigiert, dass der Sättigungsbereich der Kamera nicht mehr erreicht wurde. Die neu gewonnene Aufnahme ist samt Konturlinien und Messpunkten in Abbildung 3.21 wiedergegeben. Der Hintergrund liegt bei 6200 Counts, die Konturlinien wurden wie vorher bestimmt, der Sättigungsbereich der Kamera wird nicht erreicht. Die Reflexion ist deutlich sichtbar, ihre Wirkung aber wesentlich geringer als in der vorherigen intrafokalen Aufnahme. Die Erstellung einer extrafokalen Aufnahme wurde durch aufkommende Bewölkung vereitelt. Die Aufnahmen konnten vor der Verschiffung des HPT nach Chile nicht mehr wiederholt werden. Die neue intrafokale Aufnahme ist jedoch für eine Abschätzung der optischen Fehler ausreichend.

Zunächst werden wieder die Mittelpunkte des äußeren und inneren Pupillenrandes ausgemessen. Der resultierende Mittenversatz ist $\Delta_M = (-15 \pm 4; 13 \pm 4)$ Pixel.

Diese und eine weitere Aufnahme werden in den folgenden Unterkapiteln im Sinne Seidelscher Bildfehlerkoeffizienten und maximal nötiger Stellwerte der Hauptspiegelaktuatoren ausgewertet. Eine kurze Zusammenfassung der Seidelschen Bildfehlertheorie und der Koeffizienten findet sich in Anhang A. Für eine ausführlichere Behandlung wird auf die Fachliteratur, insbesondere Wilson (2004), sowie die Diplomarbeit von Nils Kimmel (2003) verwiesen.

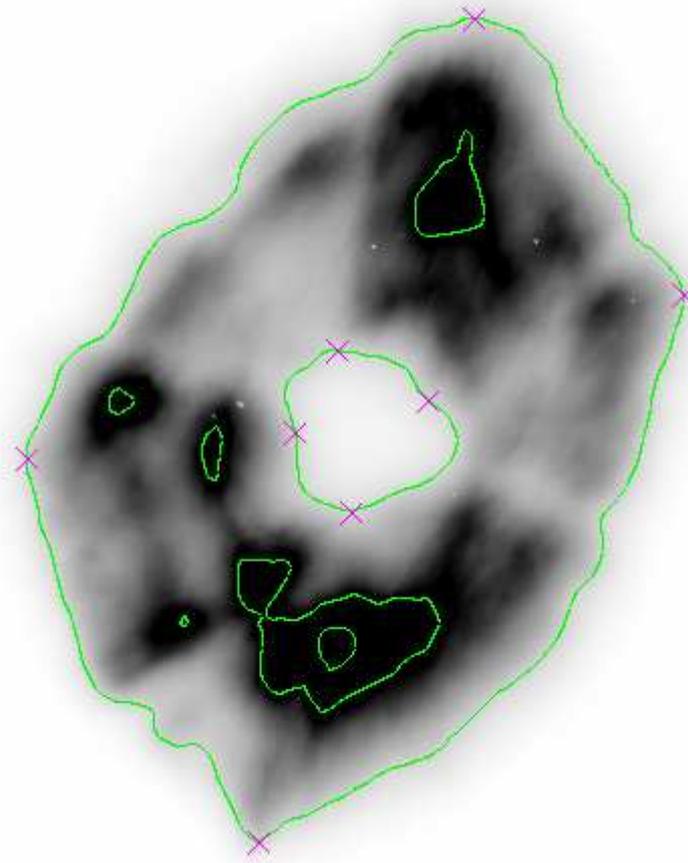


Abbildung 3.20: Extrafokale Pupillenaufnahme von Polaris, Hintergrund: 6200, Konturlinien bei 9300, 24.800 und 37.200. Der Sättigungsbereich von 60.000 wird nicht erreicht.

3.4.5.1 Astigmatismus

Weil Astigmatismus der beherrschende Fehler ist, sei er zuerst bestimmt. Gemessen werden der Durchmesser der äußeren Konturlinie entlang der großen und der kleinen Halbachse. Hilfsweise wird um den Mittelpunkt der äußeren Kontur ein Kreis mit dem Fehlerradius von 4 Pixeln gelegt. Die Lage der Halbachsen wird visuell bestimmt, der Durchmesser muss durch den Fehlerkreis gehen. Beide Halbachsen müssen senkrecht aufeinander stehen, weil sie die Lage der senkrecht aufeinander stehenden meridionalen und sagittalen Brennpunkten markieren. Abbildung 3.22 zeigt die gewählten Durchmesser. Der Messfehler wird aus hier nicht im Bild dokumentierten, alternativen Lagen mit ± 4 Pixeln abgeschätzt.

Das Ergebnis beträgt 503 ± 4 Pixel für den Durchmesser entlang der großen und 364 ± 4 Pixel entlang der kleinen Halbachse. Zusammen mit dem Pixeldurchmesser der verwendeten FLI¹¹ von ($9\mu\text{m}$) folgt:

$$a = (4527 \pm 36) \mu\text{m}; \quad b = (3276 \pm 36) \mu\text{m}$$

Der Durchmesser des astigmatischen Kreises im optimalen Fokus zwischen sagittaler und meridionaler Brennlinie bestimmt sich daraus zu

$$\phi_{ast} = \frac{a - b}{2} = 625,5 \pm 36 \mu\text{m} \quad (3.9)$$

¹¹Finger Lakes Instrumentation

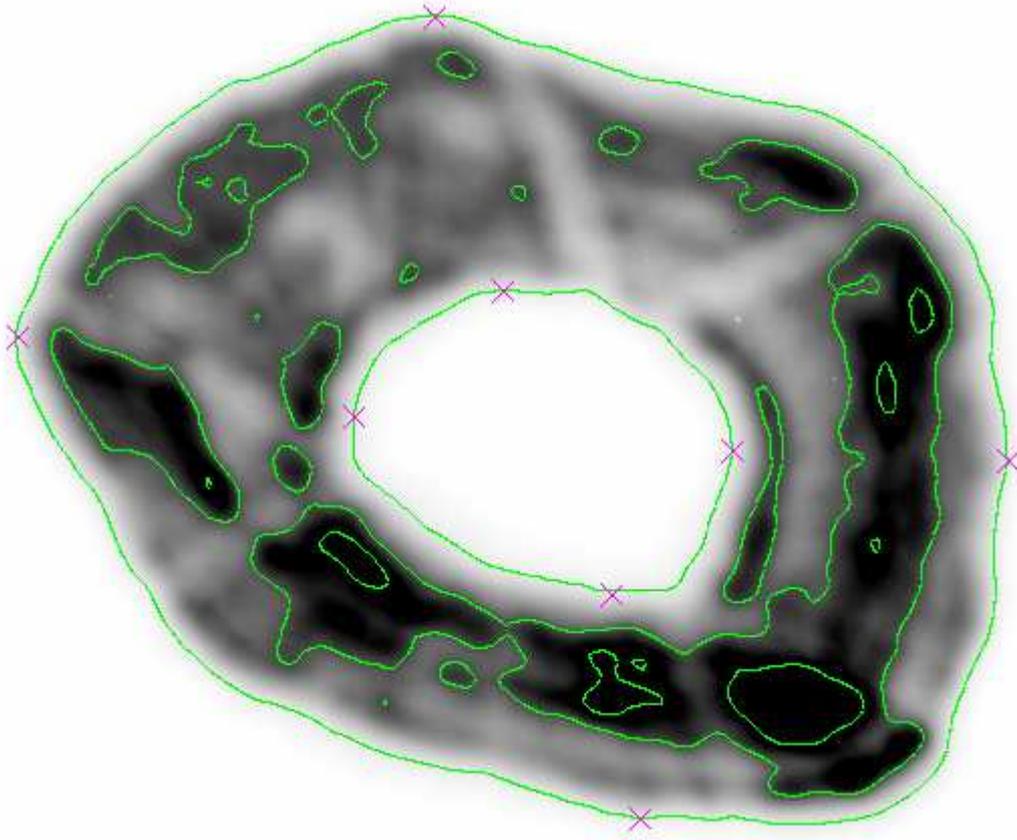


Abbildung 3.21: Auswertbare intrafokale Pupillenaufnahme von Polaris, Hintergrund: 6200, Konturlinien bei 9300, 24.800 und 37.200. Der Sättigungsbereich von 60.000 wird nicht erreicht.

Mit dem gemittelten Skalenfaktor aus Tabelle 3.2 von $S = 17,18 \text{ arcsec/mm}$ folgt

$$(\phi_{ast})_{arcsec} = 10,75 \pm 0,62 \text{ arcsec} \quad (3.10)$$

Mit der bildseitigen Brennweite f , dem bildseitigen Brechungsindex n , dem Eintrittsradius des Strahls am Hauptspiegel y_1 und dem Seidelkoeffizienten für den Astigmatismus S_{III} gilt für den Durchmesser im optimalen Fokus ebenfalls:

$$\delta\phi_{ast} = -\frac{f}{ny_1} S_{III}$$

Mit $y_1 = y_m = 740 \text{ mm}$ (Radius des Hauptspiegels), der mittleren Brennweite von $f = 12.000 \text{ mm}$ und $n = 1$ für Luft folgt für den Seidelkoeffizienten

$$S_{III} = (38,6 \pm 1,6) \mu\text{m}$$

Der maximale, absolute Wellenfrontfehler im Gaußschen Fokus berechnet sich dann mit $y = y_m$ aus

$$(W_{III})_{GF} = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_m} \right)^2 S_{III} = 19,3 \pm 0,8 \mu\text{m} \quad (3.11)$$

Dieser Wellenfrontfehler muss durch die M1-Aktuatoren kompensiert werden. Für den maximalen Hub der Aktuatoren finden sich widersprüchliche Aussagen in Vertex (1993): in einem Fall 8, im anderen Fall $20 \mu\text{m}$. Selbst im optimistischen Fall würde dies nur knapp ausreichen, den Fehler zu

Ort		x	y
außen	min	191	85
	max	683	486
	Mitte	437	286
innen	min	358	197
	max	546	349
	Mitte	452	273

Tabelle 3.7: Mittenpositionen der Pupillen in der neuen intrafokalen Aufnahme
Alle Werte sind in Pixeln angegeben, für alle Messwerte wird ein Fehler von ± 2 Pixeln angenommen. Halbe Pixel bei der Mittenberechnung werden aufgerundet.

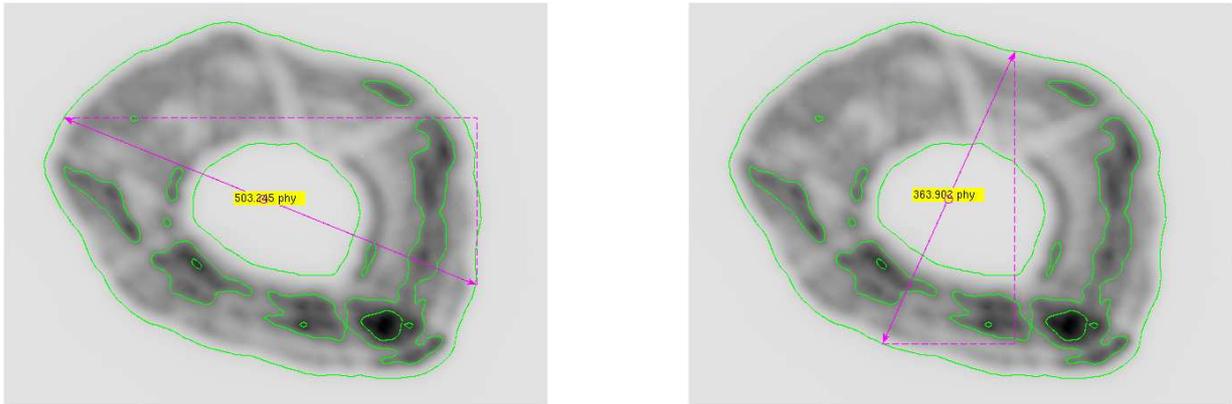


Abbildung 3.22: Äußerer Pupillendurchmesser entlang der Hauptachsen
Links entlang der großen, rechts entlang der kleinen Halbachse. Der berechnete Mittelpunkt ist durch einen Kreis mit dem Fehlerradius von 4 Pixeln markiert. Beide Durchmesser müssen durch diesen Kreis gehen und senkrecht aufeinander stehen.

kompensieren. Allerdings ist zu beachten, dass hier nicht nur der Astigmatismus des Hauptspiegels, sondern des Gesamtsystems inklusive aller Teile auf der Instrumentenplattform vermessen wurde. Astigmatismus entsteht durch schräg einfallende Lichtbündel. Trifft der vom Teleskop kommende Strahl schräg auf eine Linse auf der Instrumentenplattform, entsteht ebenfalls Astigmatismus. Um die Einflüsse der Komponenten auf der Plattform herauszunehmen, wird eine Pupillenaufnahme herangezogen, die mit einer zu Testzwecken kurzzeitig vorhandenen SBIG¹² STL-6303E im Wissenschaftsfokus gemacht wurde (3072 x 2048 Pixel, $9\mu\text{m}$ Pixelgröße). Beobachtungsobjekt war wieder Polaris. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.23. Die Werte zur Mittenbestimmung sind: Die Lage der Hauptachsen wird mit Hilfe eines im Mittelpunkt verankerten Kreises visuell ermittelt. Die ermittelten Durchmesser sind $a = 1463 \pm 4$ und $b = 1310 \pm 4$ Pixel.

$$\phi_{ast} = \frac{a - b}{2} = 689 \pm 72 \mu\text{m} \quad (3.12)$$

Das ist ein ähnlich hoher Wert wie zuvor, der große Astigmatismus kommt nicht durch die optischen Komponenten auf der Instrumentenplattform zustande. Aus dem Durchmesser des astigmatischen Kreises im mittleren Fokus lässt sich der Abstand zwischen mittlerem Fokus und tangentialer Brennlinie bestimmen:

¹²Santa Barbara Instrumentation Group

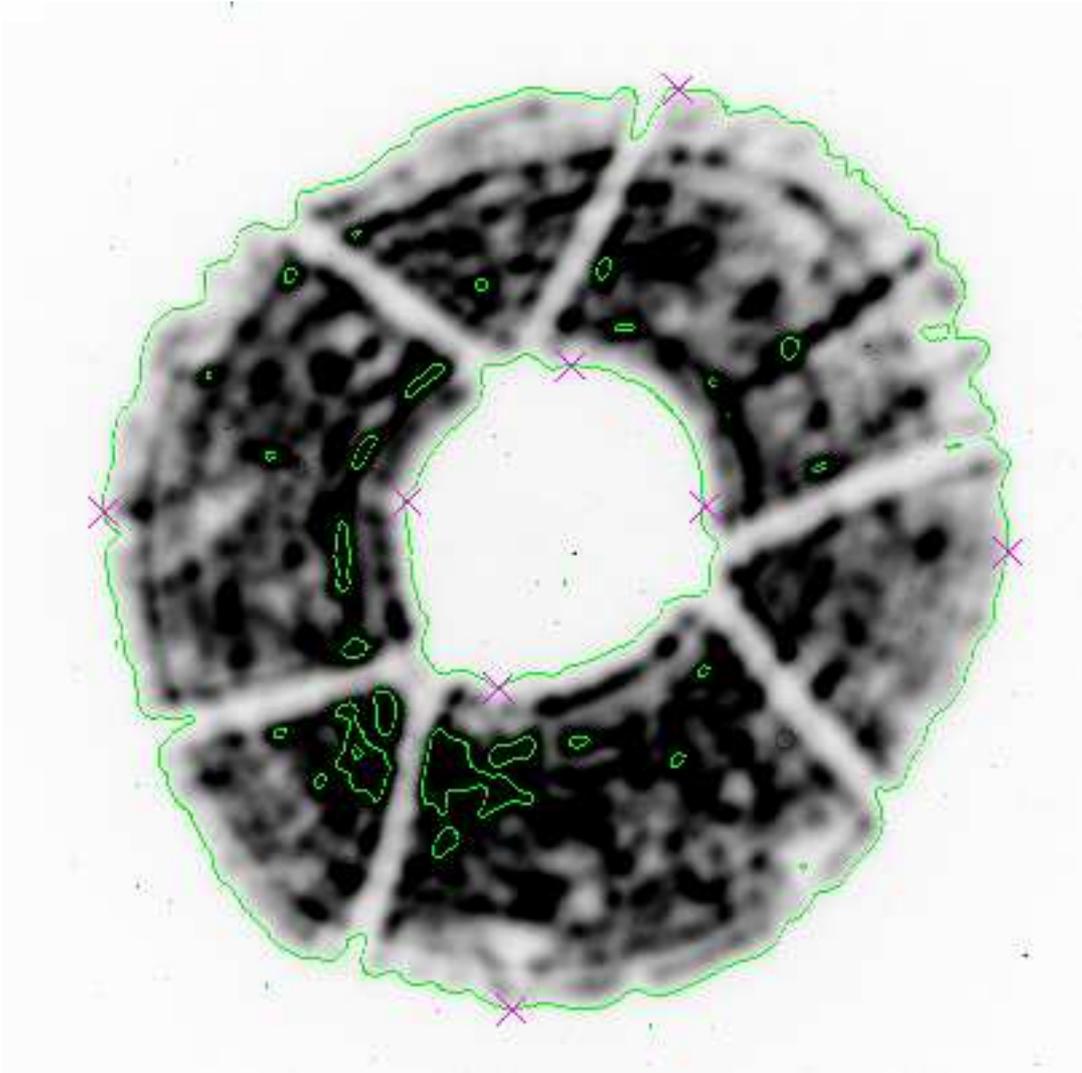


Abbildung 3.23: Pupillenaufnahme von Polaris im Wissenschaftsfokus. Hintergrund: 1300, Konturlinien bei 2000, 15.000 und 30.000. Der Sättigungsbereich von 60.000 wird nicht erreicht.

$$D_{tm} = \frac{\phi_{ast} y}{f} \approx 5000 \mu\text{m} \quad (3.13)$$

Der Abstand zwischen sagittaler und meridionaler Brennlinie ist das doppelte dieses Wertes. Das Resultat von rund 1 cm Abstand zwischen den Brennlinien entspricht durchaus dem visuellen Eindruck am Teleskop in Chile, wenn man die Brennlinien auf ein Papier projiziert und es zwischen den Positionen bewegt.

Der Streulichtschutz des Teleskops musste entfernt werden, um die zur Ausrichtung des Sekundärspiegels benötigte Laserplatte in das Zentralloch des Hauptspiegels einsetzen zu können. Es bestand die vage Hoffnung, dass einstreuendes Licht für den großen Astigmatismus verantwortlich ist. Zur Überprüfung wird ein Bild von Gamma Cepheus herangezogen — siehe Abbildung 3.24. Aus der Elliptizität des Bildes wird klar, dass der mittlere Fokus nicht ganz getroffen wurde. Mittelt man die Durchmesser entlang der Halbachsen (31 und 22 Pixel) und nimmt das Ergebnis als Durchmesser des astigmatischen Scheibchens, so folgt für den Wellenfrontfehler:

Ort		x	y
außen	min	975	264
	max	2323	1648
	Mitte	1649	956
innen	min	1427	748
	max	1871	1232
	Mitte	1649	990

Tabelle 3.8: Mittenpositionen der Pupillen im Wissenschaftsfokus Aufnahme mit einer SBIG STL. Alle Werte sind in Pixeln angegeben, für alle Messwerte wird ein Fehler von ± 4 Pixeln angenommen. Halbe Pixel bei der Mittenberechnung werden aufgerundet.

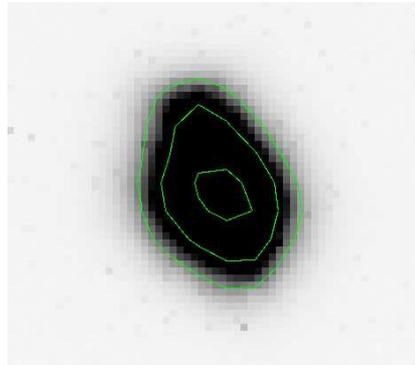


Abbildung 3.24: Gamma Cepheus im mittleren Fokus Konturlinien bei 7700 (1,5-facher Hintergrund), 15.000 und 30.000, maximale Zählrate bei 24.732, Belichtungszeit 0,5 s.

$$(W_{III})_{GF} = \frac{1}{2} \frac{y_1}{f} \frac{a+b}{2} \cdot 9 \mu\text{m} = 7,4 \mu\text{m} \quad (3.14)$$

Dieser Fehler wäre auch bei einem Aktuatorhub von maximal $8 \mu\text{m}$ noch korrigierbar.

3.4.5.2 Koma

Das Prinzip zur Auswertung von Pupillenaufnahmen hinsichtlich Koma illustriert Abbildung 3.25. Die vier Messgrößen sind a , b , c und d . Sind sie bekannt, berechnet sich der Komavektor aus

$$L_c = \sqrt{\left(\frac{a-b}{2}\right)^2 + \left(\frac{c-d}{2}\right)^2} \quad \Theta = \arctan\left(\frac{c-d}{a-b}\right) \quad (3.15)$$

Ein hoher Astigmatismus verzerrt die idealerweise kreisförmigen Pupillen zu Ellipsen und beeinflusst die Koma-Bestimmung. Um diesen Einfluss zu minimieren, werden zwei Hilfskreise im Mittelpunkt der äußeren und inneren Pupille verankert, ihr Durchmesser ist gleich dem Mittelwert des Durchmessers entlang der kleinen und großen Halbachse. Die entsprechenden Werte für die äußere Pupille sind bekannt (1463 und 1310 Pixel), für die innere Pupille wurden 484 und 416 Pixel gemessen. Die gesuchten Radien sind dann 687 und 225 Pixel. Die benötigten Messwerte sind die Differenzen zwischen diesen beiden Hilfskreisen.

Abbildung 3.26 enthält die Hilfskreise und Messwerte. Gemessen in Pixeln ergibt sich:

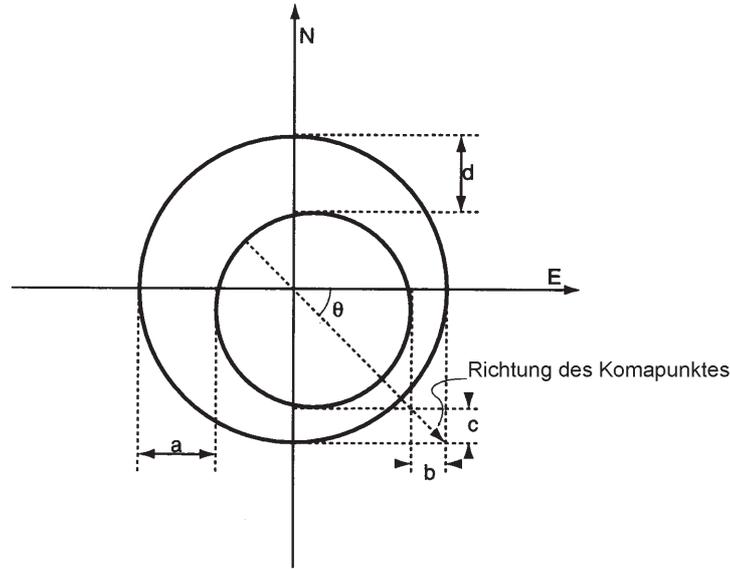


Abbildung 3.25: Messgrößen zur Komabestimmung aus Pupillenaufnahmen

$$a = 464 \quad b = 464 \quad c = 492 \quad d = 424$$

Der Fehler dieser Messgrößen wird auf Grund der elliptischen Verzerrung durch den Astigmatismus mit 12 Pixeln abgeschätzt. Für den Komavektor folgt damit¹³:

$$L_c = 34 \pm 12 \text{ Pixel} = 306 \pm 108 \mu\text{m} \quad \Theta = -90 \pm 7 \text{ Grad}$$

Weil der innerste Teil des Komamusters durch den Sekundärspiegel abgeschattet wird, ist L_c noch um einen von der Abschattungsrate ϵ abhängigen Faktor zu korrigieren. Insgesamt erhält man:

$$C_t = L_c \frac{1}{1 - \epsilon} = 437 \pm 154 \mu\text{m} \quad (3.16)$$

Der Seidelkoeffizient S_{II} folgt dann aus

$$C_t = \frac{f}{ny_1} S_{II} \Rightarrow S_{II} = \frac{C_t y_1}{f} = 26.9 \pm 9.5 \mu\text{m}$$

Für den Wellenfrontfehler gilt

$$W_{II} = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_m} \right)^3 S_{II} \cos \phi$$

Er wird extremal bei $y = y_m$ (am Rand der Apertur) und bei $\phi = 0, \pi$. Die maximale Aberration im Gaußschen Fokus ist dann

$$\overline{W}_{II} = S_{II} = 26.9 \pm 9.5 \mu\text{m} \quad (3.17)$$

Es sei betont, dass diese Wellenfrontaberration **nicht** durch die Aktuatoren des Hauptspiegels ausgeglichen werden muss! Generell gibt es folgende Möglichkeiten um Koma bei einem Cassegrain-System zu reduzieren:

¹³Wegen $a = b$ wird der Arcustangens singular, die Fehler erlauben mathematisch jeden beliebigen Winkel. Der Fehler muss aus der Aufnahme und dem Fehler für die Mittenpositionen abgeschätzt werden. Verschiebt man die Mittenposition um 4 Pixel nach rechts oder links, ergibt sich eine Änderung der Richtung von knapp 7 Grad.

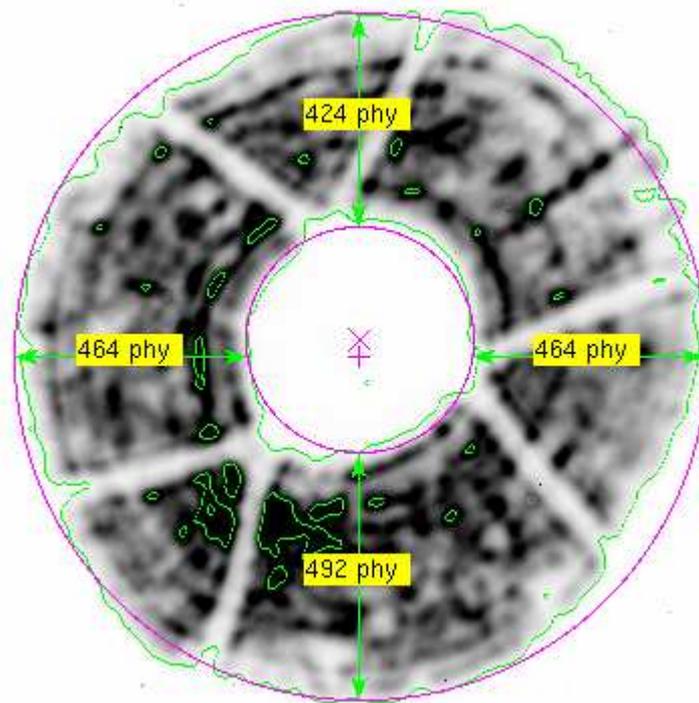


Abbildung 3.26: Komamesswerte und Hilfskreise in Pupillenaufnahme mit der Kamera STL-6303E

Mittenmarkierungen: + für die äußere, x für die innere Pupille. Die Hilfskreise sind in den markierten Mittelpunkten verankert, ihr Durchmesser entspricht dem gemittelten Durchmesser entlang der kleinen und großen Halbachse der jeweiligen Pupille. Messgrößen: *a* links, *b* rechts, *c* unten, *d* oben. Geschätzter Fehler: jeweils 12 Pixel.

- Anheben des Hauptspiegels auf der Seite des Komapunktes
- Verschieben des Hauptspiegels entgegengesetzt zum Komapunkt
- Verschieben des Sekundärspiegels in Richtung zum Komapunkt
- Absenken des Sekundärspiegels auf der Seite des Komapunktes (Rotation des Sekundärspiegels um dessen Krümmungsmittelpunkt)

Die Optik des HPT ist als Ritchey-Chrétien-Optik ausgelegt und als solche komafrei. Eine vorhandene Koma sollte idealerweise nur durch Verschieben und Rotieren des Sekundärspiegels ausgleichbar sein.

3.4.5.3 Sphärische Aberration

Lassen sich Astigmatismus und Koma im Prinzip aus einer Pupillenaufnahme gewinnen, so sind für die Bestimmung der sphärischen Aberration eine intra- und extrafokale Aufnahme notwendig, da die relative Größe der Abschattung durch den Sekundärspiegel auf beiden Seiten des Fokus gemessen werden muss. Beide Aufnahmen sollten zeitnah von demselben Stern gemacht werden. Abbildung 3.27 illustriert die Geometrie. Sind IF und EF die intra- und extrafokalen Aufnahmen sowie GF die Ebene des Gaußschen Fokus, so ist ϕ die Änderung der Abschattungsrate.

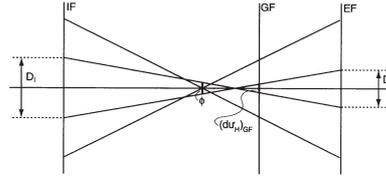


Abbildung 3.27: Ermittlung der sphärischen Aberration aus Pupillenaufnahmen
 IF - intrafokale Aufnahme; EF - extrafokale Aufnahme; D_i, D_e - Durchmesser der Abschattung durch den Sekundärspiegel in der jeweiligen Aufnahme

Zur Auswertung herangezogen werden die Pupillenaufnahmen in den Abbildungen 3.19 und 3.20. Gemessen werden die Durchmesser entlang der großen Halbachse, weil insbesondere in Abbildung 3.20 dieser Durchmesser auf Grund der Abschattungen durch die Beine noch als der zuverlässigste Wert erscheint.

Gemessen werden die Durchmesser der äußeren und inneren Pupillen in der intra- und extrafokalen Aufnahme jeweils in Pixeln:

$$\begin{aligned} \text{intrafokal, außen: } d_i &= 503 \pm 4 & \text{innen: } D_i &= 178 \pm 4 \\ \text{extrafokal, außen: } d_e &= 426 \pm 4 & \text{innen: } D_e &= 79 \pm 4 \end{aligned}$$

Rechnet man dies mit Hilfe der Pixelgröße von $9\mu\text{m}$ in Mikrometer um, so lässt sich folgende Differenz berechnen

$$\Delta D = D_i - D_e \left(\frac{d_i}{d_e} \right) = 84,7 \pm 6,4 \mu\text{m}$$

und damit

$$\phi = \frac{\Delta D}{2f} \text{ rad} = (3,53 \pm 0,27) \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

Mit der Abschattungsrate ϵ und dem Winkeldurchmesser der Abschattung im Gaußschen Fokus $(du_H)_{GF}$ gilt für ϕ aber auch die Beziehung

$$\phi = (du_H)_{GF} \cdot \frac{1 - \epsilon^2}{\epsilon^2}$$

Aus der Seidelschen Bildfehlertheorie folgt:

$$(du_H)_{GF} = \frac{1}{y_m} S_I \epsilon^3 \text{ rad}$$

Für den Bildfehlerkoeffizienten S_I erhält man:

$$S_I = \frac{y_m \phi}{\epsilon - \epsilon^3} = 9.57 \pm 0.72 \mu\text{m} \quad (3.18)$$

Für den Winkeldurchmesser eines Sternbildes im besten Fokus - minimaler Durchmesser der Abbildung - gilt:

$$(du)_{BF} = \frac{S_I}{4y_m} \text{ rad}$$

Er lässt sich direkt aus der Differenz ΔD berechnen:

$$(du)_{BF} = \frac{1}{8\epsilon(1 - \epsilon^2)} \frac{\Delta D}{f} \cdot 206265 \text{ arcsec} = 0,67 \pm 0,05 \text{ arcsec} \quad (3.19)$$

bzw. mit Hilfe des Skalenfaktors in Mikrometern:

$$(du)_{BF} = 39 \pm 3 \mu\text{m} \quad (3.20)$$

Für den entsprechenden Wellenfrontfehler im Gaußschen Fokus gilt

$$(W_I)_{GF} = \frac{1}{8} \left(\frac{y}{y_m} \right)^4 S_I$$

Er wird maximal für $y = y_m$ (Rand der Apertur). Dort gilt dann

$$(W_I)_{GF} = \frac{1}{8} S_I = 1,20 \pm 0,09 \mu\text{m} \quad (3.21)$$

Dies ist ein im Vergleich zu den bisherigen Fehlern kleiner Wert.

3.5 Hexapod-Montierung

Herkömmliche Teleskopmontierungen sind zweiachsig. Bei parallaktischer Montierung ist eine Achse auf den Himmelspol ausgerichtet, die Deklinationsachse steht senkrecht auf ihr. Ein Stern wird durch Bewegung des Teleskops um beide Achsen angefahren. Ist er einmal im Bildfeld, braucht nur noch mit homogener Geschwindigkeit um die auf den Himmelspol ausgerichtete Achse nachgeführt zu werden. Die azimutale Montierung gleicht einer Kameramontierung, bei der eine Achse horizontales Schwenken, die zweite Achse eine vertikale Bewegung der Kamera erlauben. Ist ein Stern einmal im Bildfeld, muss um beide Achsen nachgeführt werden. In die Nachführungsgeschwindigkeit geht eine Sinus- bzw. Kosinusfunktionen ein, sie ist also inhomogen. In der Realität haben azimutale Montierungen oft den Nachteil, dass in einem Bereich um den Zenit herum nicht beobachtet werden kann, weil die konkrete Bauweise der Montierung dies verhindert. In Zenitnähe ändert sich der Azimut sehr schnell, viele Teleskope mit azimutaler Montierung bewegen sich zu langsam, um in Zenitnähe dieser Änderung folgen zu können. Zusätzlich müssen bei parallaktischer und azimutaler Montierung Maßnahmen gegen die Bildfeldrotation ergriffen werden.

Bei einer Hexapod-Montierung gibt es keine Achsen. Sowohl das Anfahren eines Objektes als auch das Nachführen geschieht durch Änderung der Beinlängen. Die zum Nachführen benötigten Geschwindigkeiten sind für jedes Bein unterschiedlich, die Geschwindigkeitsfunktionen sind komplex und hängen von der aktuellen Position des Teleskops ab (siehe Endsachbericht der Firma Vertex und darin Neisius (1991)). Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Teleskopposition und Beinlängen beschrieben.

Dazu betrachten wir zunächst die grundlegenden Koordinatensysteme eines Hexapod wie in Abbildung 3.28 dargestellt: links in Ausgangsstellung und rechts auf einen Stern positioniert. Das Koordinatensystem $S_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ist fest mit dem Mittelpunkt des unteren Kardans verbunden. Seine Orientierung ist beliebig, aber fest. Sie wurde beim HPT so gewählt, dass die x-Achse durch die Mitte zwischen 2 unteren Kardanen verläuft. Die beiden Kardane gehören zu Bein 1 und Bein 6 (aus darstellerischen Gründen wurde das Koordinatensystem in Abbildung 3.28 anders ausgerichtet). Die x-Achse zeigt bei korrekter Aufstellung des Teleskops nach Süden.

Das System $S_2 = (x_2, y_2, z_2)$ hat seinen Ursprung im Mittelpunkt des oberen Kardans. In Ausgangsstellung ist es gegenüber dem System S_1 um den Vektor $(0, 0, z_0)_1$ verschoben. S_2 ist ein bewegliches System, das heißt, es bewegt sich mit der oberen Plattform und rotiert mit, wenn die obere Kardanebene zur Kompensation der Bildfeldrotation rotiert ("Polarisationsbewegung").

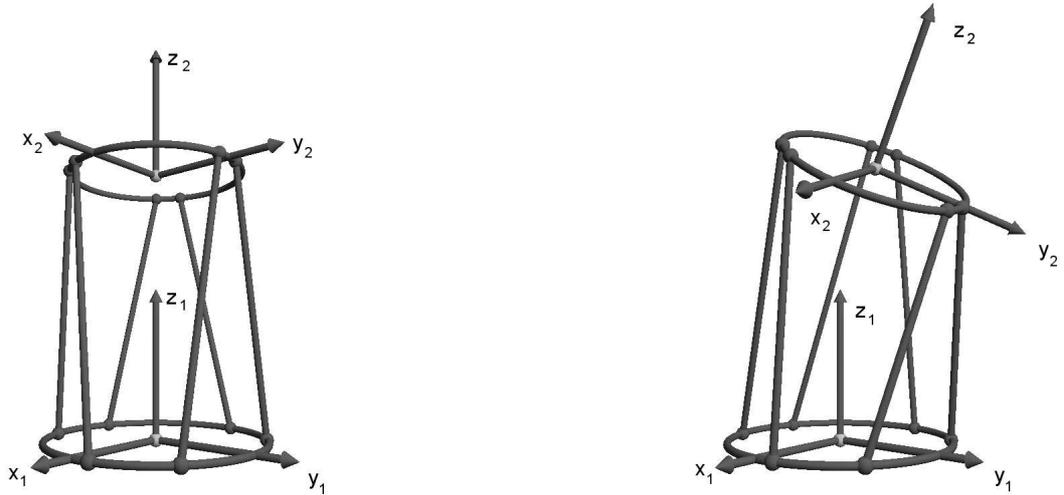


Abbildung 3.28: Koordinatensysteme des HPT; links: Ausgangsstellung, rechts: auf Stern positioniert

Das Koordinatensystem $S_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ist fest mit dem Mittelpunkt des unteren Kardans verbunden, das System $S_2 = (x_2, y_2, z_2)$ hat seinen Ursprung im Mittelpunkt des oberen Kardans und bewegt sich mit.

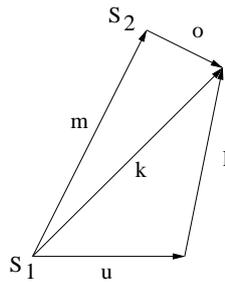


Abbildung 3.29: Vektoren in den HPT-Koordinatensystemen (Erläuterungen siehe Text)

Abbildung 3.29 definiert einige Vektoren und illustriert den Zusammenhang zwischen ihnen. S_1 ist der Ursprung des mit den unteren Kardanen verbundenen Koordinatensystems, S_2 der Ursprung des oberen Systems. \vec{u} ist der Vektor vom Ursprung des unteren Systems zu einem unteren Kardan, \vec{o} entsprechend der Vektor vom Ursprung des oberen Systems zu einem oberen Kardan, \vec{l} ist der Beinvektor und \vec{m} der Vektor zwischen den beiden Koordinatensystemen. \vec{k} zeigt vom Ursprung des unteren Systems zu einem oberen Kardanpunkt. Für jedes der 6 Beine gilt:

$$\vec{l} = -\vec{u} + \vec{k} \quad \vec{k} = \vec{m} + \vec{o} \quad (3.22)$$

Die Position der unteren Kardane ist fest, die Vektoren \vec{u} sind bekannt. Der Betrag der Vektoren \vec{l} ist ebenfalls bekannt, da jedes Bein mit Encodern versehen ist, die die Länge messen. Insgesamt erhält man folgendes Gleichungssystem:

$$\vec{l}_i = -\vec{u}_i + \vec{k}_i \quad i = 1..6 \quad (3.23)$$

$$l_i^2 = \sqrt{(\vec{k}_i - \vec{u}_i)^2} \quad (3.24)$$

Das sind 24 Gleichungen für die jeweils 36 unbekanntenen Komponenten der Vektoren \vec{k}_i und \vec{l}_i . Drückt man die Beinvektoren durch die übrigen Vektoren aus, so erhält man:

$$\vec{l}_i = -\vec{u}_i + \vec{m} + \vec{o}_i \quad i = 1..6$$

Darin sind die 18 Komponenten der Beinvektoren und die 3 Komponenten des Mittelpunktsvektors \vec{m} unbekannt. Die Vektoren \vec{o}_i sind lediglich im oberen System S_2 bekannt, dort sind sie konstant. S_1 kann durch eine Drehung um 3 Eulerwinkel und die in der Gleichung bereits enthaltene Verschiebung um \vec{m} in S_2 transformiert werden. Dann kommen die 3 Drehwinkel als Unbekannte hinzu und man hat es mit insgesamt 24 Unbekannten zu tun. Sei E die Transformationsmatrix, so ist

$$\vec{l}_i = -\vec{u}_i + \vec{m} + E \cdot \vec{o}_i \quad i = 1..6 \quad (3.25)$$

Ist $D()$ die euklidische Entfernung zweier Punkte, so ergeben sich die Beinlängen als

$$l_i = D(-\vec{u}_i, \vec{m} + E \cdot \vec{o}_i) \quad i = 1..6 \quad (3.26)$$

Man unterscheidet nun 2 Varianten der Lösung dieser Gleichungen:

1. inverse oder Rückwärtskinematik: man kennt die Position des Hexapod, Mittelpunktsvektor und Eulermatrix sind gegeben, die Beinlängen sind zu berechnen. Das Problem ist eindeutig lösbar
2. direkte oder Vorwärtskinematik: die Beinlängen sind gegeben, die Drehwinkel und Komponenten von \vec{m} aus zu berechnen. Das Problem ist mehrdeutig.

Zwar hat von Düsterlohe (2002) sich in seiner Promotion bereits mit der Rückwärtskinematik des Hexapods beschäftigt, der dort gewählte Ansatz ist jedoch etwas unübersichtlich. Hier soll ein verständlicherer Ansatz entwickelt werden.

3.5.1 Inverse Kinematik des Hexapod

Die Blickrichtung des Teleskops am Himmel ist durch den Azimut az und die Elevation el definiert. Als Besonderheit des HPT kommt die Möglichkeit hinzu, durch eine Drehung der Plattform die astronomische Bildfeldrotation ausgleichen zu können. Dieser Drehwinkel wird in allen bisherigen Arbeiten über das HPT als "Polarisation" p bezeichnet, diese Nomenklatur wird übernommen. Die Ausrichtung des Teleskops und damit des oberen Koordinatensystems S_2 ist damit bekannt.

Anschaulich gesprochen transformiert sich das untere System S_1 in das obere System S_2 , indem S_1 zunächst drei Elementardrehungen ausgeführt werden, die sich zu einer Eulermatrix kombinieren lassen. Anschließend wird das so gewonnene System entlang eines Vektors verschoben. Die erste Drehung erfolgt im Azimut, also um die z -Achse. Anschließend wird um die Zenitdistanz $zd = 90 - az$ Grad gekippt (um die neue y -Achse). Als letztes wird um den Winkel $pa = p - az$ gedreht (um die neue z -Achse). Dieses System wird dann entlang des Vektors \vec{m} verschoben. Die Elementardrehungen lassen sich sofort hinschreiben:

$$\underline{E} = \begin{pmatrix} \cos(pa) & \sin(pa) & 0 \\ -\sin(pa) & \cos(pa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(zd) & 0 & -\sin(zd) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(zd) & 0 & \cos(zd) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(az) & \sin(az) & 0 \\ -\sin(az) & \cos(az) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ausmultipliziert entspricht dies einer Eulermatrix in $z - y' - z''$ -Konvention (Reihenfolge der Achsen, um die gedreht wird):

$$\underline{E} = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & -\cos(pa) \sin(zd) \\ E_{21} & E_{22} & \sin(pa) \sin(zd) \\ \sin(zd) \cos(az) & \sin(zd) \sin(az) & \cos(zd) \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

mit

$$E_{11} = \cos(pa) \cos(zd) \cos(az) - \sin(pa) \sin(az) \quad (3.28)$$

$$E_{12} = \cos(pa) \cos(zd) \sin(az) + \sin(pa) \cos(az) \quad (3.29)$$

$$E_{21} = -\sin(pa) \cos(zd) \cos(az) - \cos(pa) \sin(az) \quad (3.30)$$

$$E_{22} = -\sin(pa) \cos(zd) \sin(az) + \cos(pa) \cos(az) \quad (3.31)$$

Damit ist die Matrix in Gleichung 3.25 bzw. 3.26 bekannt.

Das HPT bewegt sich im Beobachtungsbetrieb nicht in allen 6 Freiheitsgraden, sondern die Bewegung ist durch die sogenannte "Kuppelfunktion" eingeschränkt. Diese Funktion wurde so gewählt, dass die Motoren der Beine nicht miteinander kollidieren können und dass sich die mechanische Belastung der Beine möglichst gleichmäßig verteilt. Diese Kuppelfunktion legt den Mittelpunktvektor \vec{m} fest;

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} \cos(az) \, el \, (800 - 70 \, el^2) \\ \sin(az) \, el \, (800 - 70 \, el^2) \\ 2000 - 210 \, el^2 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

Die Daten der noch benötigten Vektoren \vec{u} und \vec{o} befinden sich im Anhang. Damit ist die rechte Seite von Gleichung 3.26 bekannt und die Beinlängen folgen eindeutig.

3.5.2 Pointingmodell

Bisher wurde angenommen, dass die x-Achse der Südrichtung entspricht und dass die Ebene der Grundkardane exakt horizontal ausgerichtet ist. Ebenfalls wurde angenommen, dass die Vektoren zu den unteren Kardanpunkten exakt bekannt sind. Diese Voraussetzungen kann man aber nicht unbedingt als gegeben annehmen. Es seien drei Arten von Fehlern unterschieden:

1. Aufstellungsfehler: Verdrehung gegenüber der Südrichtung und Verkippung der Grundkardanebene aus der Horizontalen
2. dynamische Abweichungen: Abweichungen von der idealen Position auf Grund gravitativer Einflüsse insbesondere auf den Sekundärspiegel
3. Produktionsfehler: Abweichungen der Kardanpunkte von ihrer idealen Position

In diesem Abschnitt werden die Fehler erster Art und ihre Auswirkungen auf die Positionierung ermittelt und in ein Pointingmodell eingebaut. Es gibt eine Vielzahl von Programmen, die aus Messdaten ein Pointingmodell erstellen. Sie sind allerdings für eine herkömmliche Montierung und nicht für eine Hexapod-Montierung ausgelegt. Besonderheiten wie die gravitativ bedingte Bewegung des Sekundärspiegels berücksichtigen sie ebenfalls nicht, da die Sekundärspiegelmontierung bei fast allen optischen Teleskopen so ausgelegt ist, dass Abweichungen des Sekundärspiegels von seiner idealen Position verhindert werden. In der Radioastronomie hat man es zwar mit gravitativen Verformungen (hauptsächlich des Primärspiegels) zu tun, der wird aber meist nach dem Prinzip der homologen Verformung gebaut: Der Spiegel verformt sich so, dass sich nur der Fokus in z-Richtung verschiebt. Die vorhandenen Programme zur Erstellung eines Pointingmodells können also nicht verwendet werden.

Eine Verdrehung gegenüber der Südrichtung zeigt sich im Azimut als konstante Abweichung der realen gegenüber der idealen Position am Himmel. Eine Verkippung der Grundkardanebene führt zu einer sinusförmigen Abweichung im Azimut, die sich mit der grundsätzlichen Verdrehung überlagert. Sei α_0 die Verdrehung gegenüber der Südrichtung, i der Inklinationswinkel (Kippwinkel)

und β der Winkel zur Knotenlinie der idealen und verkippten Kardanebene, so hat die Abweichung die Form

$$\Delta Az = \alpha_0 + A(i) \cos Az$$

Für die Abweichungen in der Elevation spielt die Verdrehung gegenüber der Südrichtung keine Rolle. Eine Verkippung der Grundkardanebene zeigt sich ebenfalls als Winkelfunktion, jedoch versetzt, der Inklinationwinkel folgt direkt aus dem Maximum der Elevationsfehler:

$$\Delta El = i \cos Az + \phi_0$$

Wird eine Stern am Himmel angefahren, so wird seine Position nicht genau getroffen. Das Teleskop wird dann so lange verfahren, bis der Stern im Bildzentrum liegt, die Korrekturwerte für Azimut und Elevation werden zusammen mit Datum, Uhrzeit, Rektaszension, Deklination und Namen der Quelle protokolliert. Trägt man dann die Korrekturwerte gegenüber dem Azimut auf, so sollten sie die genannten Abhängigkeiten zeigen.

3.5.2.1 Pointingtests in Bochum

Ziel dieser Tests ist es, noch vor der Verschiffung und dem Wiederaufbau des Teleskops in Chile möglichst umfassend die Eigenschaften im Hinblick auf mechanische Teile, mögliche Verbiegungen der Haltekonstruktion und Sekundärspiegelhalterung kennen zu lernen, um eventuell erforderliche Gegenmaßnahmen möglichst früh ergreifen zu können.

Das Verfahren zur Ermittlung der Positionierungsfehler wurde zunächst mit Platzhaltern für die Motoren des Sekundärspiegels durchgeführt. Nach Lieferung der Motoren und Ausrichtung des Sekundärspiegels in Zenitstellung mittels Laserplatte wurden die Messungen wiederholt. Dazu wurde eine Hilfsplattform mit einem Zentralloch von 10 cm Durchmesser angefertigt. Am Teleskop entspricht dies einem Feld von 28 Bogenminuten. Dies reicht aus um selbst defokussierte Sternscheibchen wie sie mit Platzhaltern für die Sekundärspiegelmotoren zu sehen waren, auf Papier zu projizieren und auf etwa 3 Bogenminuten genau in der Mitte zu projizieren.

Bereits Schlosser hatte 2002 durch Vorabmessungen in Bochum einen azimutalen Versatz gegenüber der Südrichtung von 20,7 Grad nach Osten gemessen. Erste eigene Messungen am Teleskop bestätigten diesen Wert und er wurde übernommen.

Die in mehreren Experimentserien gewonnenen Daten wurden mittels Fourieranalyse auf harmonische Moden untersucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenpunkte keine gleichen Abstände in Azimut und Elevation haben, geeignete Verfahren sind zum Beispiel in William H. Press zu finden. Die Daten reichten aus, um höhere Ordnungen bis $\sin 3Az$ zu finden, es stellte sich jedoch heraus, dass die Platzhalter für die Motoren einen Schiefstand des Sekundärspiegels verursachten, was den Wert der Daten vermindert. Auf eine Wiedergabe sei deshalb verzichtet.

Nach Lieferung der Motoren konnte besser fokussiert werden und nach Einmessung per Projektionsverfahren wurde die SHA-Kamera an der Hilfsplattform befestigt. Sie hat am Teleskop ein Bildfeld von 2.9 x 4.4 Bogenminuten. Beim Anfahren eines Sterns lag dieser in der Regel innerhalb dieses Bildfeldes.

Abbildung 3.30 und 3.31 zeigen die erzielten Ergebnisse, nachdem der Sekundärspiegel mit Hilfe der Motoren und der Laserplatte genauer positioniert werden konnte. Eine exakte Positionierung war auf Grund einer fehlenden Mittenmarkierung am Sekundärspiegel nicht erreichbar. Sie wurde erst im Rahmen der Neuverspiegelung in Chile angebracht.

Abbildung 3.30 zeigt den Positionierungsfehler in Azimut und Elevation in Abhängigkeit vom Azimut. Die Ablesegenauigkeit beträgt etwa 2 Bogenminuten und ist für die Abweichung in Elevation als Fehlerbalken eingezeichnet. Der entsprechende Fehler im Azimut ist von der Elevation

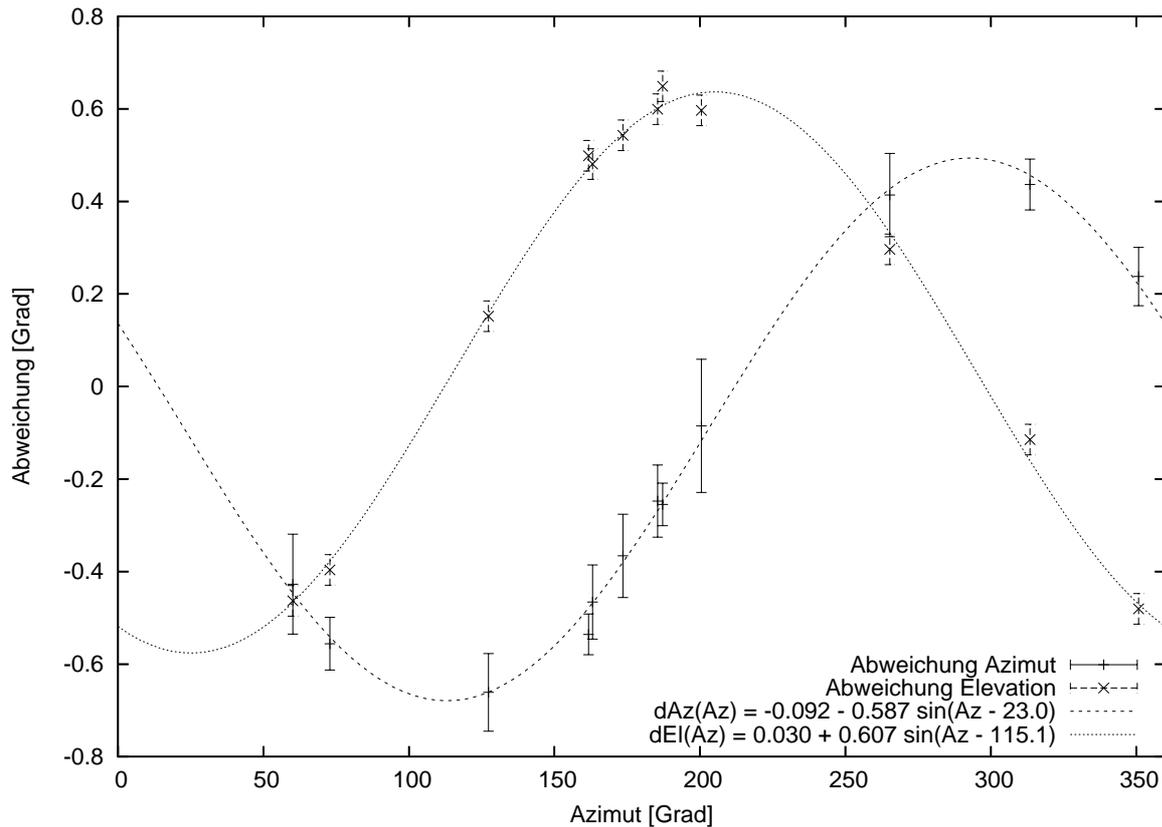


Abbildung 3.30: Azimutabhängige Positionierungsfehler am HPT in Bochum
Positionierungsfehler in Abhängigkeit vom Azimut, Fehlerbalken Elevation = 2 Bogenmi-
nuten; die Fehlerbalken im Azimut sind elevationsabhängig, Erläuterung siehe Text

abhängig. Man kann sich dies leicht veranschaulichen, wenn man sich um den geographischen Nordpol der Erde einen Hilfskreis von 1 m Durchmesser denkt, der die Ablesegenauigkeit symbolisiert. Weil die geographische Länge dort eine Polstelle hat, laufen alle Längengrade durch diesen Hilfskreis, die Länge ist unbestimmt. Verschiebt man diesen Hilfskreis an den Äquator, so ist der Längengradfehler erheblich kleiner. Ist ϕ die Ablesegenauigkeit, R der Erdradius, r der Abstand vom Pol zum Hilfskreis und d der Durchmesser dieses Hilfskreises und ΔAz der vom Pol aus gemessene Azimutwinkel unter dem d erscheint, so gilt:

$$R \tan \phi = d = r * \tan \Delta Az$$

Ist Zd der Winkel zwischen Pol und Mittelpunkt des Hilfskreises (gemessen vom Erdmittelpunkt), so ist weiterhin

$$r = R \tan (Zd)$$

Insgesamt folgt:

$$\tan (\Delta Az) = \frac{\tan (\phi)}{\tan (Zd)} \quad (3.33)$$

Dieser Zusammenhang gilt analog am Himmel mit Zd als Zenitdistanz und ΔAz als resultierender Fehler im Azimut. Der größte Fehler im Azimut beträgt 8,6 Bogensekunden, ist also rund 4 mal so groß wie die Ablesegenauigkeit. Die Fehler in Azimut und Elevation gelten ebenfalls in der Horizontalen, indes sind sie so klein, dass sie bei der benötigten Skalierung nicht darstellbar sind.

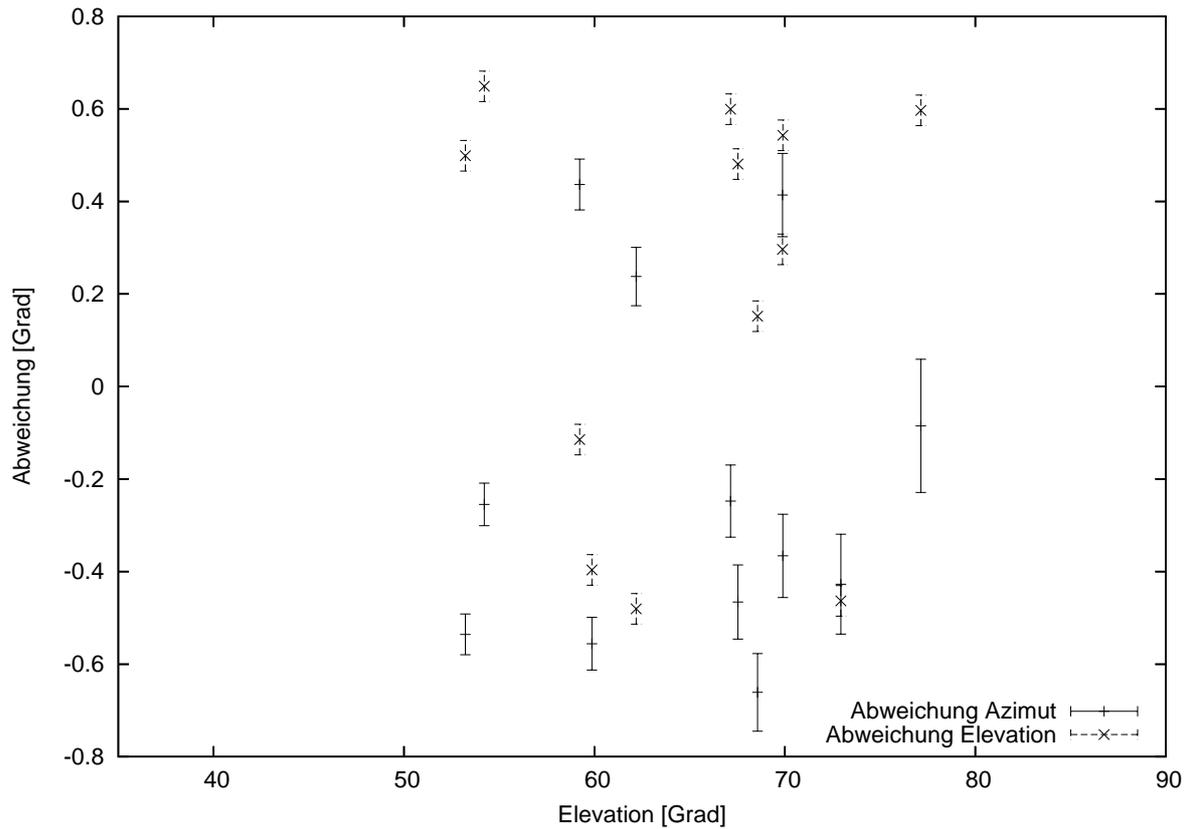


Abbildung 3.31: Elevationsabhängige Positionierungsfehler am HPT in Bochum
 Positionierungsfehler in Abhängigkeit von der Elevation, Fehlerbalken = 2 Bogenminuten, der Bereich von 35 bis 90 Grad entspricht den systembedingten Grenzen des HPT, tiefere Elevationen sind nicht erreichbar. Es ist kein Zusammenhang erkennbar.

Die beiden Ausgleichsfunktionen in Abbildung 3.30 wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate¹⁴ angepasst. Die Anpassung wurde auf die niedrigste Ordnung ($\sin Az$) beschränkt, zur sicheren Anpassung höherer Ordnungen ($\sin 2Az$, $\sin 3Az$) wären mehr Datenpunkte nötig. Die Untersuchung der vorhandenen Daten deutet jedoch darauf hin, dass höhere Ordnungen keine wesentliche Rolle spielen, weil ihre Amplituden um einen Faktor 30 geringer sind. Da zudem der Sekundärspiegel wegen fehlender Mittenmarkierung nicht exakt positioniert werden konnte und die Messungen in Chile sowieso zu wiederholen waren, wurde in Bochum angesichts der knappen werdenden Zeit darauf verzichtet. Die Ausgleichsfunktionen lauten (das verwendete gnuplot-Programm implementiert einen Levenberg-Marquardt Algorithmus zur Anpassung)

$$\begin{aligned} dAz(Az) &= -0.092 - 0.587 \sin(Az - 23.0); & \text{rms} &= 0.027 \\ dEl(Al) &= +0.030 + 0.607 \sin(Az - 115.1); & \text{rms} &= 0.029 \end{aligned}$$

Die maximalen Abweichung sind in beiden Fällen etwa 0,6 Grad bzw. 36 Bogenminuten. Um diesen Betrag war die Grundkardanebene des HPT gegenüber der Horizontalen verkippt. Bei einem Radius von 800 mm entspricht dies einer Höhendifferenz von 8,4 mm. Die Richtung der Verkipfung folgt aus dem Maximum der Elevationsabweichung: bei 205 Grad Azimut ist die Grundkardanebene zu hoch, bei 25 Grad zu niedrig.

Abbildung 3.31 zeigt zum Vergleich die Positionierungsfehler in Azimut und Elevation in Abhängigkeit von der Elevation. Dargestellt ist der mit dem HPT erreichbare Elevationsbereich von 35

¹⁴Englisch: least square fit

bis 90 Grad. Im Bereich von 35 bis 53 und von 78 bis 90 Grad wurden mit montierten Motoren keine Messungen mehr vorgenommen (Messungen in diesem Bereich wurden mit den Platzhaltern durchgeführt, sie ändern nichts an der statistischen Verteilung der Positionierungsfehler). Eine Abhängigkeit der Positioniergenauigkeit von der Elevation ist nicht feststellbar. Dies lässt darauf schließen, dass die Positioniergenauigkeit nicht von der gravitativen Belastung der Hauptmontierung oder der Spiegelzelle abhängt.

3.5.2.2 Pointingtests in Chile

Für die ersten Pointingtests in Chile wurden folgende Ziele gesetzt:

1. Zentrierung des Sekundärspiegels in Zenitposition mittels Laserplatte
2. Aufnahme der Daten für ein erstes Pointingmodell ohne Positionskorrektur des Sekundärspiegels

Zunächst wurde die geographische Position per GPS bestimmt. Die Ortskoordinaten wurden zu $24^{\circ} 35' 54''$, 67 Süd und $70^{\circ} 12' 4''$.45 West gemessen, die Höhe mit 2700 m. Diese Werte wurden in die Steuerung integriert. Durch Messung des Sonnenstandes wurde die Nordrichtung per Sonnenstand bestimmt. Die Messung ergab eine Verdrehung des Gebäudes von 16 Grad gegenüber der Nord-Südrichtung. Diese Werte wurden in die Steuerung übernommen. Der Sekundärspiegel wurde mit Hilfe der Laserplatte und der jetzt vorhandenen Mittenmarkierung in Zenitstellung des Teleskops ausgerichtet.

Bereits die ersten Tests wiesen auf ein in Bochum nicht aufgetretenes, technisches Problem hin: die von der Elektronik vermeintlich ermittelten Beinlängen und damit die Position am Himmel blieben nicht stabil, sondern veränderten sich unkontrolliert. Die Beine der Hauptmontierung verfügen jeweils über einen Absolut- und einen Relativencoder zur Messung der Beinlänge. Die Absolutencoder liefern zwar absolute Werte, lassen sich aber für eine aktive Kontrolle des Teleskops im Beobachtungsbetrieb nicht schnell genug auslesen. Die Auslesegeschwindigkeit der Absolutencoder liegt bei 2 Sekunden, die Hauptregelschleife der HPT-Steuerung wird alle 5 ms durchlaufen. Die Relativencoder sind mit dieser Geschwindigkeit auslesbar, liefern aber eben nur Differenzen. Die Relativencoder werden beim Einschalten des Teleskops mit Hilfe der Absolutencoder kalibriert. Es stellte sich heraus, dass die Werte der Relativencoder im Laufe der Zeit abdriften. Die Ursache liegt wahrscheinlich in Störsignalen, die in die vom Teleskop zum Steuerschrank führenden Kabel eingestreut werden. Trotz intensiver Suche konnte die Quelle der Signale nicht identifiziert werden. Trotz aller Schirmungsmaßnahmen konnte auch die Einstreuung nicht beseitigt werden. Die Einstreuung sorgt dafür, dass im Laufe von 2 bis 3 Minuten eines der Beine eine Längenabweichung von mehr als 2 mm aufweist, was zu einem Nothalt führt. Im Extremfall — der obere Kardanpunkt des Beins steht genau über dem unteren Kardanpunkt — führt dies bereits zu einer Positionsabweichung von 11,5 Bogenminuten.

Da der Fehler nicht zu beseitigen war, wurde versucht, seine Auswirkung einzugrenzen, indem im Steuerprogramm die Möglichkeit geschaffen wurde, die Relativencoder zurückzusetzen und neu zu kalibrieren. Die Daten für das Pointingmodell wurden dann wie folgt gewonnen:

1. computergesteuertes Anfahren des Zielsterns
2. manuelle Korrektur der Position auf die Mitte des Bildfeldes der Hilfsplattform
3. Rücksetzung der Relativencoder

4. erneute manuelle Korrektur auf die Bildfeldmitte
5. Messung

Wenn nötig, wurden Rücksetzung der Relativencoder und erneute manuelle Korrektur mehrfach durchgeführt, um die Zeit zwischen Rücksetzung und Messung zu minimieren. Insbesondere in Zenitnähe stößt dieses Vorgehen für azimutale Korrekturen jedoch an seine Grenzen. Rings um den Zenit hat auch ein Verfahren des Teleskops um 1 Grad oder mehr kaum Auswirkungen auf die Position im Bildfeld, weil sich das Teleskop entsprechend wenig bewegt.

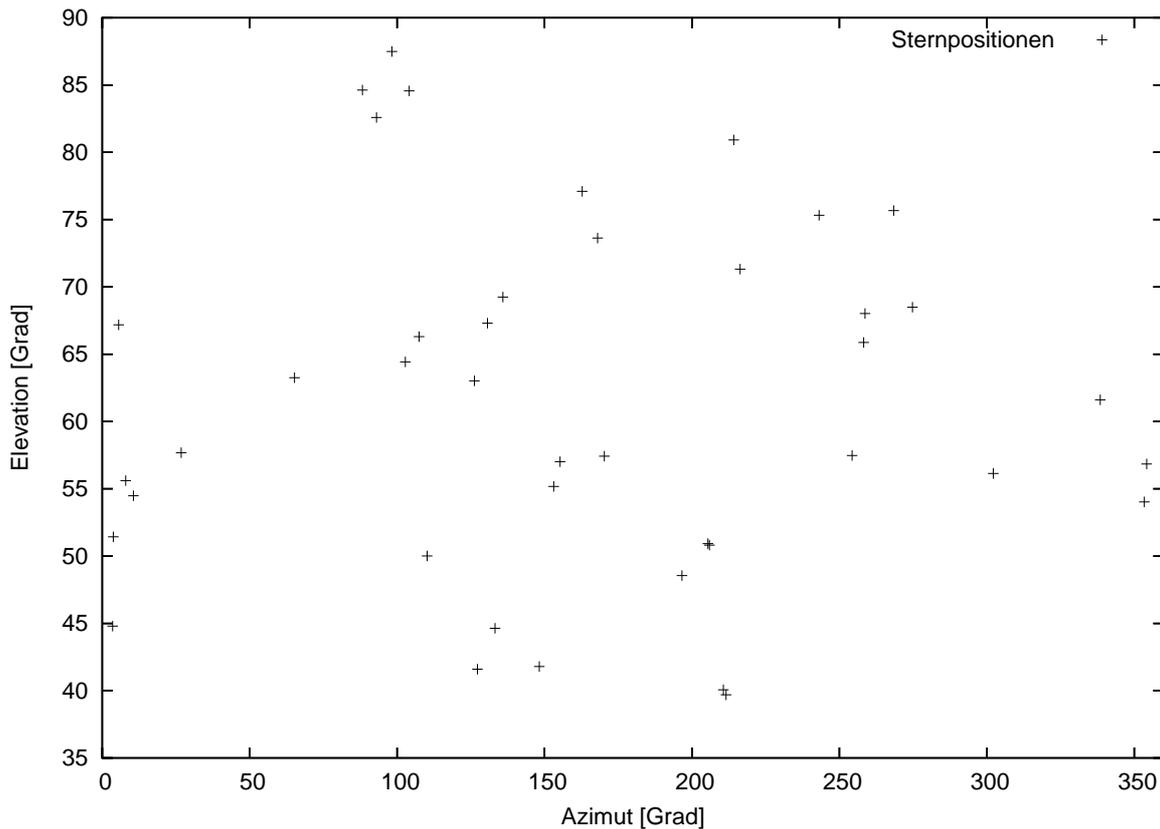


Abbildung 3.32: Verteilung der in Chile gemessenen Zielsterne

Aufgetragen sind die Positionen der für das Pointingmodell vermessenen Sterne im Horizontsystem. Die Elevation entspricht dem vom HPT erreichbaren Bereich von 35 bis 90 Grad. Angestrebt wird eine möglichst gleichmäßige Verteilung im später hauptsächlich genutzten Bereich zwischen 50 und 90 Grad Elevation. Bei Elevationen über 80 Grad spielen Positionierungsfehler im Azimut nur eine eingeschränkte Rolle, weil selbst große Differenzen im Azimut nur kleine Verschiebungen im Bildfeld bewirken.

Die in Chile gemessenen Quellen und Daten sind in den Tabellen C.3 und C.4 zusammengestellt. Abbildung 3.32 zeigt die Verteilung der Quellen. Die Azimutwerte aus den Tabellen liegen im Intervall $[-180; 180]$ des Steuerprogramms, sie wurden auf die übliche Darstellung $[0; 360]$ Grad umgerechnet. Wünschenswert ist eine gleichmäßige Verteilung in Azimut und Elevation, insbesondere im später hauptsächlich genutzten Elevationsbereich zwischen 50 und 90 Grad. Bei Elevationen nahe 90 Grad spielen Fehler im Azimut allerdings nur eine kleine Rolle, weil selbst ein großer Fehler nur eine kleine Verschiebung des Bildfeldes bewirkt. Auf eine Überdeckung des gesamten Azimutbereichs bei hohen Elevationen kann im Moment verzichtet werden. Sie ist zudem mit der zur Zeit in Azimut und Elevation laufenden HPT-Steuerung nur schwer zu erreichen. Abhilfe

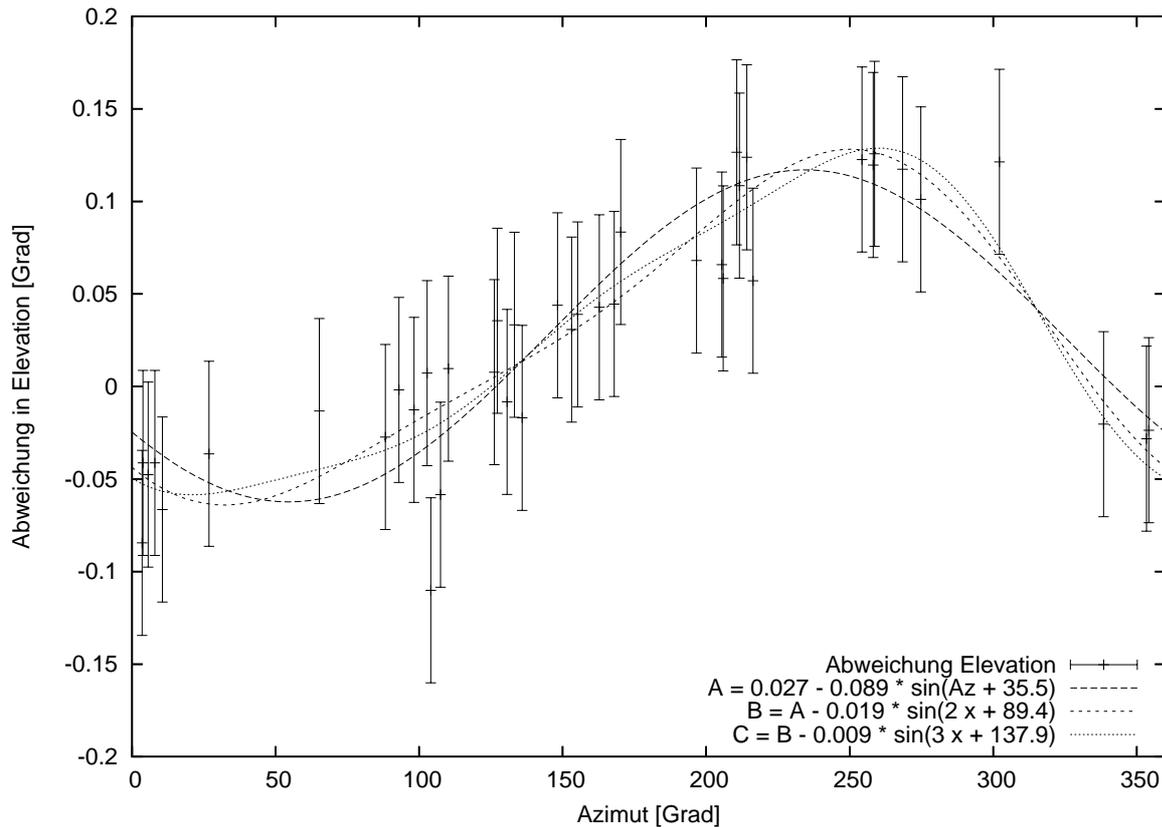


Abbildung 3.33: Positionierungsfehler in Elevation (Chile)

Aufgetragen ist die gemessene Elevationsabweichung der realen von der theoretischen Position in Abhängigkeit vom Azimut. Die Fehlerbalken betragen auf Grund der Encoderdrift 3 Bogenminuten. Die Kurve A liefert eine Anpassung erster Ordnung, in B wurde ein Term der Form $a \sin(2Az + b)$, in C ein Term der Form $a \sin(3Az + b)$ zusätzlich angepasst.

schaft die Umstellung der Steuerung auf Rektaszension und Deklination. Dieses System hat im Zenit keine Polstelle und eignet sich besser zur manuellen Messung der Positionierungsfehler. Für ein endgültiges Pointingmodell sollte auch der zenitnahe Bereich ausgemessen werden.

Auf Grund der Encoderdrift wurde die Ablese- bzw. Positioniergenauigkeit anhand des Bildfeldes der Hilfsspinne mit 3 Bogenminuten abgeschätzt. Abbildung 3.33 zeigt die Messpunkte samt Fehlerbalken sowie an die Daten angepasste Kurven mit Sinustermen bis zur 3. Ordnung. Die Funktion der Kurve dritter Ordnung lautet

$$\Delta El = 0.027 - 0.089 \sin(Az + 35.5) - 0.019 \sin(2Az + 89.4) - 0.009 \sin(3Az + 137.9) \quad (3.34)$$

mit $\text{rms} = 0,029$.

In Abbildung 3.33 fällt zuerst die sinusförmige Verteilung mit einem Maximum bei 250 Grad auf, so wie wir sie auch bei den Bochumer Voruntersuchungen festgestellt hatten. Im Unterschied zu diesen jedoch erscheinen die Fehlerbalken auf den ersten Blick riesig. Zum einen wurde ihr Radius wegen der Encoderdrift von 2 auf 3 Bogenminuten hochgesetzt, zum anderen aber sind die absoluten Werte wesentlich kleiner als in Bochum. Lag das Maximum in Bochum bei 0,6 Grad, so liegt der entsprechende Wert jetzt bei 0,094 Grad bzw. 5,6 Bogenminuten. Das ist knapp 1/6 des Bochumer Wertes. Die Skalierung der y-Achse wurde dementsprechend angepasst, die Fehlerbalken

erscheinen deshalb relativ groß. Die Abweichung der Grundkardanebene von der Horizontalen liegt bei rund 1,3 mm. Anders gesagt: das Teleskop steht in Chile erheblich besser als in Bochum.

Angesichts der geringen absoluten Abweichungen und der vergleichsweise großen Fehlerbalken stellt sich die Frage, wie weit man die Anpassung treiben kann und ob ein "Sägezahn" — stückweise Anpassung durch Geraden — nicht ebenso möglich wäre wie eine Anpassung durch Sinusfunktionen. Die in Chile gemessenen Daten würden auch zu einem Sägezahn passen, aber die in Bochum gemessenen Daten nicht. Die mit dem Ab- und Aufbau befassten Institutsmitarbeiter — Rolf Chini, Klaus Weißbauer, Roland Lemke und andere — trafen auf keinerlei Schwierigkeiten mechanischer Art. Es ist unwahrscheinlich, dass sich beim Zusammenbau ein Fehler eingeschlichen hat, der tatsächlich dafür sorgen würde, dass das Teleskop Sprünge in der Bewegung ausführen würde. Eine erste Anpassung durch harmonische Funktionen erscheint also gerechtfertigt, auch wenn sie die produktionsbedingten Fehler (Abweichung der Grundkardane von ihrer idealen Position) nicht berücksichtigt.

Bleibt die Frage, bis zu welcher Ordnung man sie treiben sollte. Angesichts der 120-Grad-Symmetrie des HPT erscheint eine Anpassung bis zur 3. Ordnung plausibel ($\sin(3Az + \phi_3)$). Schaut man sich die Kurven an, so verschieben die höheren Ordnungen im wesentlichen die Extremalwerte von (35, 5; 215, 5) Grad zu (20, 8; 260, 0) Grad, die absoluten Differenzen zwischen den Kurven sind relativ gering. Sie liegen bei 0,02 Grad bzw. 1,2 Bogenminuten. Dies ist kleiner als das Bildfeld der verwendeten Kameras.

Bei (104; -0, 11) liegt ein Datenpunkt, dessen Fehlerbalken von keiner der Kurven durchlaufen wird. Es handelt sich um den Stern $\beta 9$ im Sternbild Corvus, beobachtet am 22.02.2007 um 12:57:08 (Sternzeit). Es wurde geprüft, ob es sich um eine Quellenverwechslung handeln kann, ob also nicht $\beta 9$, sondern ein ähnlich heller Stern in der Nähe beobachtet wurde. $\beta 9$ hat eine Helligkeit von 2,65 mag, alle in der Nähe liegenden Sterne haben deutlich geringere Helligkeiten: 5,6 mag und weniger. Eine Verwechslung erscheint ausgeschlossen. Angesichts der lokalen Zeit von 4:30 Uhr morgens kann ein Bedienfehler nicht ausgeschlossen werden: etwa dass vergessen wurde, die Encoder zurückzusetzen.

Die Auswertung der Abweichungen im Azimut gestaltet sich etwas komplexer. Schaut man sich die Abweichungen in den Tabellen C.3 und C.4 an, so fällt auf, dass fast alle Werte eine Abweichung von mehr als 2 Grad aufweisen. Die weiter oben angesprochenen 16 Grad Versatz gegenüber der Nord-Süd-Richtung betrafen das Gebäude des HPT. Innerhalb des Gebäudes ist das Teleskop noch einmal um mehr als 2 Grad verdreht aufgestellt worden. Dieser zusätzliche Versatz bestimmt sich aus der additiven Konstante bei der Anpassung 1. Ordnung.

Zu diskutieren ist, welche Datenpunkte zur Anpassung herangezogen werden können. Wie dargestellt, wachsen die Fehler im Azimut bei hohen Elevationen stark an. Die gemessenen Quellen weisen Elevationen von bis zu 87 Grad auf, der projizierte Ablesefehler von 3 Bogenminuten beträgt dann schon mehr als 1 Grad im Azimut. Es erscheint nicht sinnvoll, diese Werte bei der Auswertung zu berücksichtigen. Gibt man einen tolerierbaren Fehler im Azimut vor, so lässt sich anhand von Gleichung 3.33 berechnen, bis zu welcher Zenitdistanz ($Zd = 90 - El$) Datenpunkte herangezogen werden können. Akzeptiert man Fehler bis zum 5-fachen der Ablesegenauigkeit, also bis zu 1/4 Grad, liegt die maximale Elevation bei 78,7 Grad. Um eine klarere Grenze zu haben, wird dies auf 80 Grad aufgerundet. Von den 41 gemessenen Quellen fallen dann 5 heraus, das erscheint verschmerzbar.

Abbildung 3.34 zeigt die Ergebnisse für den Azimut. Aufgetragen ist wieder die Abweichung im Azimut gegenüber dem Azimut selbst. Die Anpassung der Kurven erfolgte wie oben, diesmal jedoch wurde das Quadrat der inversen Fehlerbalkenbreite als Gewicht der Datenpunkte verwendet.

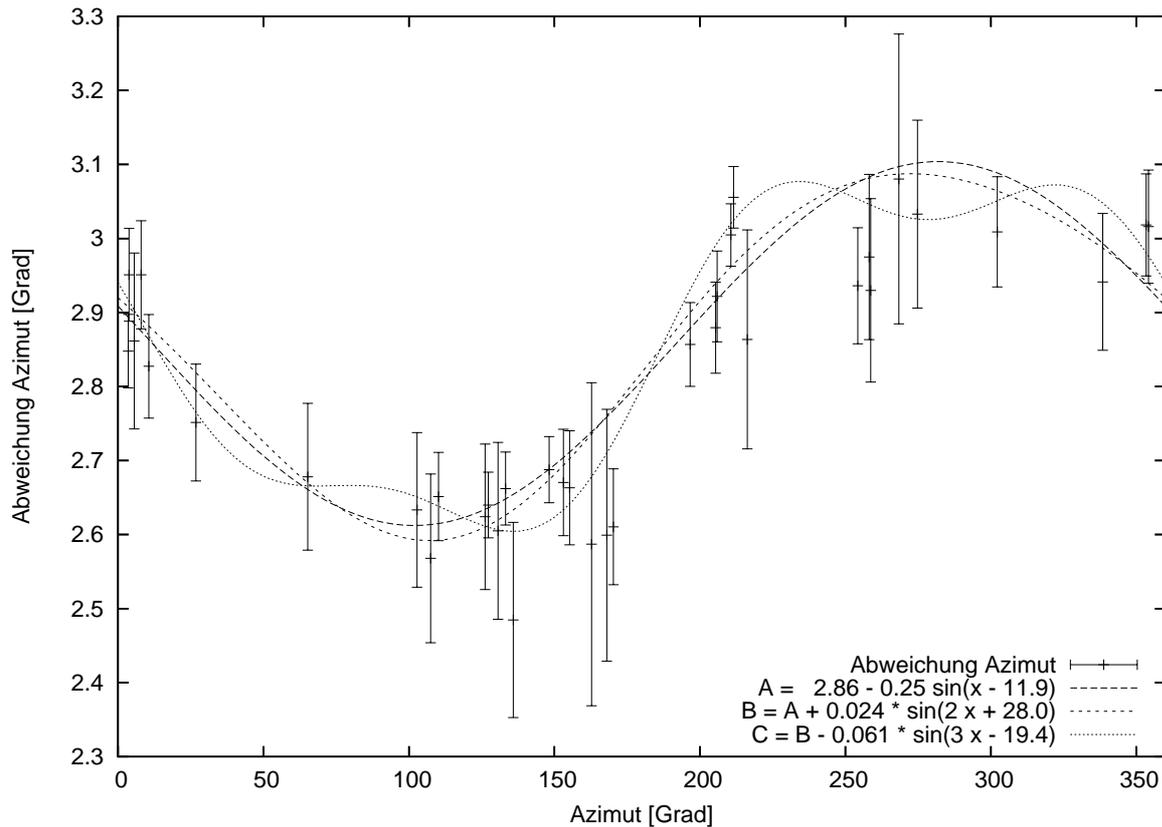


Abbildung 3.34: Azimutale Positionierungsfehler in Chile

Aufgetragen ist die gemessene Azimutabweichung der realen von der theoretischen Position in Abhängigkeit vom Azimut. Die Fehlerbalken betragen auf Grund der Encoderdrift 3 Bogenminuten. Die Kurve A liefert eine Anpassung mit nur einer Mode, in B wurde ein Term der Form $a \sin(2Az + b)$, in C ein Term der Form $a \sin(3Az + b)$ zusätzlich angepasst.

Punkte mit kleinen Fehlerbalken gehen stärker in die Ausgleichsfunktion ein als Punkte mit großen Fehlerbalken. Die Ausgleichsfunktion 3. Ordnung lautet:

$$\Delta Az = 2.86 - 0.246 * \sin(x - 11.9) + 0.024 * \sin(2x + 28,0) - 0,061 \sin(3x - 19,4) \quad (3.35)$$

mit $\text{rms} = 0,80$.

Die Ausgleichsfunktionen laufen bei mehreren Datenpunkten nicht innerhalb der Fehlerbalken. Der Übergang zu höheren Ordnungen bringt diesbezüglich keine Verbesserung: besser getroffenen Datenpunkten stehen solche gegenüber, die nicht mehr getroffen werden. Die höheren Ordnungen gehen erheblich stärker ein als bei der Elevation. Auch die Amplitude ist mit 0,24 Grad bzw. 14 Bogenminuten größer als die 5,6 Bogenminuten in Elevation, sie liegt aber immer noch um einen Faktor 2,5 niedriger als bei den Bochumer Daten, was die bessere Aufstellung des Teleskops bestätigt.

Es gibt mehrere Erklärungsmöglichkeiten für diese Inkonsistenz der azimutalen Daten. Der Ablesefehler könnte zu niedrig angesetzt sein. Er wurde anhand des visuellen Eindrucks am Teleskop mit Hilfe des Bildfeldes der Hilfsplattform abgeschätzt. Die Abschätzung kann zu gering ausgefallen sein. Setzt man die Ablesegenauigkeit auf 4 Bogensekunden, werden die Fehlerbalken entsprechend größer und von den Ausgleichskurven getroffen. So naheliegend diese Erklärung ist,

sie ändert nichts an der Verteilung der Messpunkte und der Form der Ausgleichsfunktionen. Zudem ist der visuell abgeschätzte Fehler bis auf den oben diskutierten Fall konsistent mit den Elevationsdaten.

Wie schon in Bochum ist eine Abhängigkeit der Positionierungsfehler von der Elevation nicht feststellbar (siehe Abbildung 3.35).

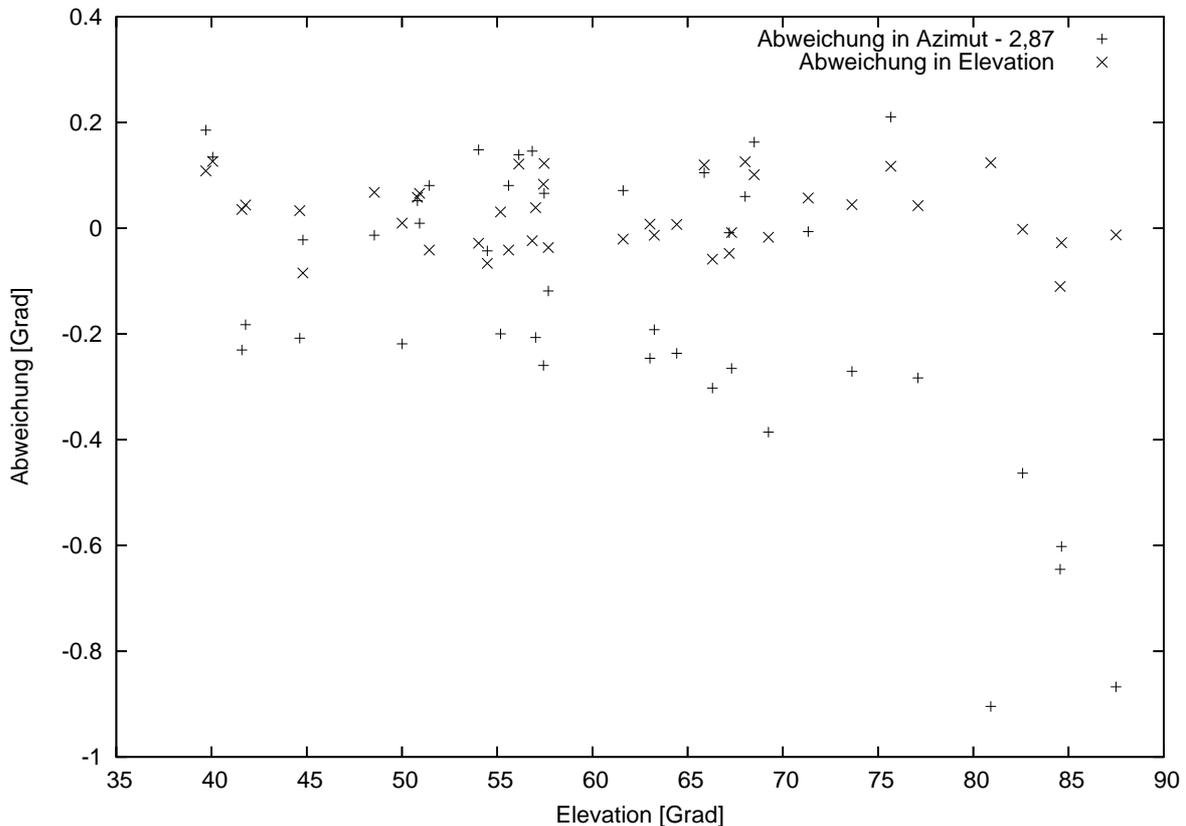


Abbildung 3.35: Positionsabweichungen in Abhängigkeit von der Elevation

Aufgetragen ist die gemessene Abweichung der realen von der theoretischen Position für Azimut und Elevation in Abhängigkeit von der Elevation. Vom azimuthalen Fehler wurde der konstante Versatz subtrahiert. Eine Abhängigkeit der Fehler von der Elevation ist nicht erkennbar.

Auffällig ist, dass die Bochumer Amplituden für die Abweichungen in Azimut und Elevation annähernd gleich waren, die Amplituden der in Chile gemessenen Daten sich aber um einen Faktor 2,5 unterscheiden. Auffällig ist ebenfalls, dass der Einfluss höherer Ordnungen überproportional zugenommen hat. Lag das Amplitudenverhältnis bei den Bochumer Daten noch bei $1/30$, so liegt es jetzt bei rund $1/4$ (Azimut) bzw. $1/5$ (Elevation).

Eine Erklärung für diese überproportionale Zunahme der Bedeutung höherer Ordnung könnte darin liegen, dass die Beine der Sekundärspiegelmontierung ausgetauscht werden mussten. Ein außergewöhnlich starker Sturm im September 2006 drückte die Teleskopkuppel gegen den Sekundärspiegel und zerbrach 3 der 6 Beine der Montierung. In der Folge wurden alle 6 Beine erneuert. Wenn die neuen Beine "weicher" als die alten sind, erklärt dies die überproportionale Zunahme höherer Ordnungen, weil dann die schwerkraftbedingte Bewegung des Sekundärspiegels stärker ausfällt als mit den Originalbeinen. Eine andere Erklärung könnte darin liegen, dass durch die insgesamt bessere Aufstellung des Teleskops Abweichungen der Grundkardane von ihrer idealen

Position eine größere Rolle spielen und diese Abweichungen werden sich nicht in einfachen harmonischen Funktionen zeigen.

Es wurde zwar versucht, den Einfluss der Encoderdrift zu minimieren, der Erfolg aber fiel unterschiedlich aus. In manchen Fällen war nach der Rücksetzung keine weitere Korrektur erforderlich, in anderen Fällen nahm die Korrektur bis zu einer Minute in Anspruch. Da die Drift ungleichmäßig erfolgt - manchmal hat ein Encoder Plateauphasen, in denen er nicht abweicht, außerhalb dieser Phasen ist die Abweichgeschwindigkeit nicht konstant - und sich mit der Nachführungsbewegung des Teleskops überlappt, ist es kaum möglich, Drift und Nachführungsbewegung zu trennen. Selbst wenn dies gelänge, wäre es allenfalls von theoretischem Nutzen, da es allenfalls erlauben würde, a posteriori die Positionsdaten zu erklären aber keine Vorhersagen erlauben würde, wie sich die Drift das nächste Mal auswirken wird. Zwar ließe sich die Drift der Relativencoder prinzipiell durch Vergleich alle 2 Sekunden mit den Absolutencodern zur Laufzeit herausrechnen und minimieren, dies kann jedoch nicht das Ziel sein.

Ein weiterer Einflussfaktor liegt in Produktions- oder Aufstellungsfehlern zweiter Ordnung. Bisher wurde angenommen, dass alle Grundkardane auf einer Ebene liegen, die gegenüber der Südrichtung verdreht und gegenüber der Horizontalen verkippt ist. Weichen die Grundkardane von dieser Ebene ab oder liegen innerhalb der Ebene nicht an ihren theoretischen Positionen, so hat dies Einfluss auf die Positioniergenauigkeit. Die Unterschiede zwischen den azimuthalen und Elevationsabweichungen deuten in diese Richtung. Verifizieren lässt sich dies aber erst, wenn die Drift beseitigt und eine genauere Positionierung möglich ist.

3.5.2.3 Analytisches Pointingmodell

Die Inverse Kinematik des Hexapod ermöglicht es prinzipiell auf analytischem Wege zu einem genauen Pointingmodell zu kommen. Ein vereinfachter Ansatz liefert zunächst die Aufstellungsfehler, ein verfeinerter Ansatz die genauen Positionen der Grundkardane. Die theoretische Position einer Quelle am Himmel dient dabei als Referenz für Azimut und Elevation. Nach dem Anfahren der theoretischen Position am Himmel und nach manueller Korrektur erhält man die reale Position im Sinne des anzufahrenden azimuthalen Winkels und der Entfernung vom Zenit. Bezeichnet man die Referenzwerte mit dem Index r und die angefahrenen Winkel mit dem Index c (für das englische "commanded"), so ergeben sich 2 Datensätze (der Beinindex i wird der Übersichtlichkeit halber weggelassen):

$$\vec{l}_c = -\vec{u} + \vec{m}_c + E_c \cdot \vec{o} \quad (3.36)$$

$$\vec{l}_r = -\vec{u} + \vec{m}_r + E_r \cdot \vec{o} \quad (3.37)$$

Die Vektoren \vec{u} und \vec{o} sind bekannt und konstant. Die Werte für \vec{l}_c , \vec{m}_c und das Produkt $E_c \cdot \vec{o}$ werden vom Steuerprogramm protokolliert. \vec{m}_r erhält man aus der Definition der Kuppelfunktion in Gleichung 3.32, die Matrix E_c folgt aus den Gleichungen 3.27 und 3.31. Die Vektoren \vec{l}_r können dann berechnet werden.

Nimmt man an, dass das Teleskop verdreht und verkippt aufgestellt wurde, und nimmt man weiter an, dass sich das Teleskop dabei steif verhält, so sind untere und obere Kardane jeweils um dieselben Winkel verdreht und verkippt. Beschreibt man dies durch eine Eulermatrix E_x mit den unbekanntem Winkeln az_x, zd_x, pa_x , so ist diese Rotationsmatrix der Drehung um die Referenzwinkel vorgelagert. Es gilt dann:

$$\vec{l}_c = -(E_x \cdot \vec{u}) + \vec{m}_c + E_r \cdot E_x \cdot \vec{o} \quad (3.38)$$

Die resultierenden Gleichungen sind lang und sollen nicht explizit hingeschrieben werden. Sie sind numerisch wegen der hochgradigen Nichtlinearität durch die trigonometrischen Funktionen auch nicht gerade einfach zu lösen. Eine stabilere Methode verspricht der Ansatz, die Matrix E_x auf spezielle Weise aufzufassen: als Matrix von Spaltenvektoren \vec{p} , \vec{q} und \vec{r} :

$$E_x = \begin{pmatrix} p_x & q_x & r_x \\ p_y & q_y & r_y \\ p_z & q_z & r_z \end{pmatrix}$$

Die Zahl der Unbekannten erhöht sich zwar auf 9, jedoch wird Gleichung 3.38 linear in den Unbekannten. Weil die Matrix E_x statisch ist — sie ist für alle 6 Beine und alle Quellen am Himmel gleich — kann die erhöhte Zahl an Unbekannten ausgeglichen werden, indem man die Gleichungen für 3 Beine oder mehrere Quellen gleichzeitig löst. Weil E_x eine Eulermatrix ist, gelten folgende Gleichungen:

$$\vec{p} \cdot \vec{p} = 1, \quad \vec{q} \cdot \vec{q} = 1, \quad \vec{p} \cdot \vec{q} = 0 \quad \vec{p} \times \vec{p} = \vec{r} \quad (3.39)$$

Diese Gleichungen sind leicht auswertbar und lassen sich einsetzen, um die Qualität der gefundenen Lösung zu beurteilen, bzw den Fehler abzuschätzen. Alternativ liefert $\vec{p} \cdot \vec{q} = 0$ eine zusätzliche lineare Gleichung, wenn jeweils eine der Komponenten berechnet wurde. Auf Kosten der Linearität lassen sich die Skalarprodukte einsetzen, um die Erfüllung dieser Bedingungen zu erzwingen. Die Korrekturwinkel az_x, zd_x, pa_x ermittelt man anschließend durch Koeffizientenvergleich mit einer Eulermatrix.

Sind die Winkelabweichungen klein, so weicht E_x nur wenig von einer Einheitsmatrix ab und das Verfahren wird empfindlich gegenüber Messfehlern bzw. gegenüber der angesprochenen Encoderdrift. Insbesondere das Rückrechnen auf Winkel durch Koeffizientenvergleich reagiert in diesem Fall extrem empfindlich. Es ist dann besser, die Gleichungssysteme linear zu lösen, über mehrere Lösungen zu mitteln und E_x als reine Transformationsmatrix aufzufassen. Die Daten aus Chile lassen ein sicheres Rückrechnen auf Drehwinkel nicht zu.

Ein vollständigeres, aber aufwändiger zu lösendes Modell ermittelt den Versatz der Kardane direkt. Dazu werden Vektoren $\vec{du}_i, \vec{dm}_j, \vec{do}_i$ definiert, wobei i den Index für das Bein bezeichnet und j verschiedene Quellen indiziert. Man erhält dann:

$$\vec{l}_{c[ij]} = -(\vec{u}_i + \vec{du}_i) + (\vec{m}_{rj} + \vec{dm}_j) + E_{rj} \cdot (\vec{o}_i + \vec{do}_i) \quad (3.40)$$

Die Differenzvektoren für die Kardanpositionen hängen nur vom jeweiligen Bein, die Differenz für den Mittenvektor hängt nur von der jeweiligen Position am Himmel ab. Die Kardandifferenzen liefern insgesamt $2 \cdot 3 \cdot 6 = 36$ Unbekannte, die Mittendifferenz liefert je Quelle 3 weitere Unbekannte. In Komponentenform liefert jede Messung am Himmel 18 Gleichungen. Misst man 3 Quellen aus, so stehen 54 Gleichungen zu Verfügung, dem gegenüber stehen 45 Unbekannte. Die Gleichungen sind lang, aber in allen Unbekannten linear. Sie sollten sich also theoretisch lösen lassen.

Ganz so einfach ist es indes nicht, weil z.B. jeder Versuch, die \vec{dm}_j zu eliminieren, indem man die Gleichungen zweier Beine für dieselbe Quelle subtrahiert, sofort zu Gleichungen führt, in denen die Koeffizienten für die \vec{do}_i bis auf einen Faktor -1 gleich sind. Die entsprechenden Koeffizienten etwa für Bein 1 und Bein 2 verschwinden notwendigerweise in allen weiteren Gleichungen gleichzeitig und das System wird unbestimmt. Kompensieren lässt sich das nur durch die Beobachtung weiterer Quellen. Das Gleichungssystem wird dann zwar überbestimmt, lässt sich aber im Sinne einer Anpassung nach dem Prinzip der minimalen Fehlerquadrate lösen.

3.6 Steuerung

Der Bau eines komplexen Systems wie eines modernen Teleskops geschieht im Wesentlichen in mehreren Schritten:

- Konzeption
- Herstellung der Komponenten
- Zusammenbau und Test des physikalischen Zusammenspiels der Komponenten
- Steuerung des Gesamtsystems
- Kommissionierung bzw. Inbetriebnahme

Jeder dieser Schritte ist mit komplexen Detailproblemen behaftet. Die Konzeption etwa umfasst mechanische wie optische Komponenten, die im Entwurf miteinander abgeglichen werden müssen, wenn sie später harmonisch miteinander agieren sollen. Die Herstellung der einzelnen Teile ist meist sehr aufwändig, das klassische Beispiel im Bau optischer Teleskope ist die Herstellung der Spiegel. Oft steckt aber in anderen Komponenten nicht weniger Arbeit, weil neue Werkstoffe und Produktionstechniken verwendet werden. Beim HPT ist hier der Verbund aus Stahlknoten und kohlefaserverstärkten Kunststoffstreben zu nennen, die extrem genau an das thermische Verhalten des Hauptspiegels angepasst werden müssen, um über die fest mit dem Spiegel verbundenen Aktuatoren keine Scherspannungen zu induzieren, die zum Abreißen der Aktuatoren oder zum Bruch des Spiegels führen könnten. Ebenfalls neu ist die in den Beinen der Hauptmontierung steckende Antriebstechnik, die eine sehr hohe Positioniergenauigkeit haben muss.

Der Zusammenbau eines Teleskops ist im Normalfall eine sehr zeitaufwändige Sache. Im Falle des HPT ist das Gesamtteleskop aber so geschickt in einzelne Komponenten zerlegt worden, dass sich das gesamte Teleskop in 1 bis 2 Tagen ab- oder aufbauen lässt. Es gibt weltweit kein anderes Teleskop dieser Größenordnung, mit dem dies möglich wäre.

Andere Aspekte, wie zum Beispiel Fehler im optisch-mechanischen Zusammenspiel der Komponenten fallen nur auf, wenn man dieses Zusammenspiel testet. Solche Tests sind zeitaufwändig und teuer. Verzichtet man auf sie, riskiert man aber, ein mehrfaches der Kosten für "Reparaturmaßnahmen" investieren zu müssen.

Die Steuerung des Gesamtsystems ist nicht weniger komplex als der Entwurf oder die Herstellung, ihre Komplexität wird jedoch gern unterschätzt, insbesondere wenn es dabei um Software geht. Die Steuerung des HPT umfasst die folgenden, wesentlichen Komponenten:

- Beine des primären Hexapods (Hauptmontierung)
- Aktuatoren des Hauptspiegels
- Beine der Sekundärspiegelmontierung
- x-y-Schlitten zur Bewegung der Instrumentenplattform und Blendenklappen
- Kameras für die Nachführungskorrektur und die Shack-Hartmann-Analyse
- Wissenschaftskamera
- Zeitkontrolle

- GPS-System
- Wetterstation

Hinzu kommen noch reine Softwaremodule, die zwar kein Gerät steuern, aber für das Funktionieren des Teleskops als Gesamtsystem unerlässlich sind. Zu nennen sind insbesondere die Nachführung und die Shack-Hartmann-Analyse. All diese Komponenten müssen für den Beobachtungsbetrieb des Teleskops koordiniert zusammenwirken. Die Anforderungen an die Software sind hoch. Sie muss modular sein, leicht lesbar und verständlich, weite Teile müssen parallel ausführbar sein, manche Teile müssen in Echtzeit¹⁵ laufen und sie muss vor allem eines: zuverlässig funktionieren.

Bei Übernahme des Projektes ließen sich die Beine der Hauptmontierung bewegen und das Teleskop mittels einer in Labview realisierten Oberfläche steuern. Die eigentliche Steuerung ist nicht in Labview, sondern als C-Programm realisiert, das kompiliert und auf eine in einem Windows-PC steckende Karte (dSpace 1103) geladen wird, die die Hauptsteuerschleife in Echtzeit einmal alle 5 ms abarbeitet. Die Benutzeroberfläche kommuniziert mit diesem Steuerprogramm. Um die Qualität der vorhandenen Software zu illustrieren, sei es erlaubt eine einzelne Zeile aus dem rund 5000 Zeilen umfassenden C-Programm in originaler Formatierung zu zitieren — die Zeilenumbrüche sind im originalen Quelltext nicht enthalten:

```
T_43[0][0] =
((cos(rektaszension-polarisation)*sin(deklination)*cos(rektaszension)+
sin(rektaszension-polarisation)*sin(rektaszension))*sin(geo_breite_rad)*
cos(sternzeit_lokal_rad)+(cos(rektaszension-polarisation)*
sin(deklination)*sin(rektaszension)-sin(rektaszension-polarisation)*
cos(rektaszension))*sin(geo_breite_rad)*sin(sternzeit_lokal_rad)+
cos(rektaszension-polarisation)*cos(deklination)*cos(geo_breite_rad))*
cos(drehwinkel_z_23)+(-(cos(rektaszension-polarisation)*sin(deklination)*
cos(rektaszension)+sin(rektaszension-polarisation)*sin(rektaszension))*
sin(sternzeit_lokal_rad)+(cos(rektaszension-polarisation)*
sin(deklination)*sin(rektaszension)-sin(rektaszension-polarisation)*
cos(rektaszension))*cos(sternzeit_lokal_rad))*sin(drehwinkel_z_23);
```

Eine nicht gerade übersichtliche und verständliche Form der Darstellung. Wenn sich in solchen Zeilen Fehler verstecken, die dafür sorgen, dass das Teleskop die Südrichtung falsch annimmt und bei der Verfolgung von Sternen nach Osten anstatt nach Westen läuft, ist der Fehler nur mühsam zu finden und zu beseitigen. Es dauerte insgesamt mehrere Monate, die vorhandene Software zur Steuerung der Hauptmontierung zu korrigieren. Die Entscheidung, die Benutzeroberfläche in Labview zu realisieren, erwies sich als "unglücklich", weil die Abläufe bei der Steuerung eines Teleskops so komplex sind, dass die entsprechenden Labview-Programme zwangsläufig unübersichtlich werden. Eine Fortentwicklung der Steuerungssoftware auf dem bis dahin eingeschlagenen Weg erschien nicht angeraten. Bei der Überlegung, in welche Richtung die weitere Entwicklung gehen sollte, wurden folgende Anforderungen zusammengetragen:

- echtzeitfähiges Betriebssystem, auch wenn nur die wenigsten Teile in Echtzeit laufen müssen
- Verteilung der Prozesse auf mehrere Rechner

¹⁵Ein Echtzeitsystem beendet eine Aufgabe garantiert innerhalb eines vorher festgelegten Zeitraums. MS-Windows ist kein echtzeitfähiges Betriebssystem, weil es keine Möglichkeit gibt, das Betriebssystem anzuweisen, eine bestimmte Aufgabe innerhalb einer vorgegebenen Zeit garantiert abzuschließen.

- Prozesskommunikation über Rechengrenzen und ggf. über Architekturgrenzen hinweg
- Benutzung einer objektorientierten Sprache für die Softwareentwicklung
- Trennung von Benutzeroberfläche, Datenverarbeitung und Datenhaltung (Dreischichtarchitektur)
- Integration der vorhandenen, korrigierten Programme
- Kooperation mit anderen Instituten und Universitäten
- Minimierung der Lizenzkosten

Entschieden wurde, herkömmliche PC's zu verwenden und sie unter Linux laufen zu lassen. Zwar sind herkömmliche Linux-Varianten nicht echtzeitfähig, es gibt jedoch ein echtzeitfähiges "Real-time Linux", das eingesetzt werden kann. Die nötige Software sollte mit Hilfe des im Rahmen von ALMA¹⁶ entwickelten ACS¹⁷ realisiert werden. ACS ist ein CORBA-basiertes¹⁸ Programmpaket, das derzeit von der ESO und mehr als einem Dutzend weiterer Institute und Universitäten eingesetzt wird. Es ermöglicht die Entwicklung in C++, Java oder Python, auch gemischt, also etwa zeitkritische Datenverarbeitung in C++, Benutzeroberflächen in Java. Im Rahmen des HPT-Projektes kommt C++ zum Einsatz, in wenigen Ausnahmen auch Python. Für die Entwicklung der Benutzeroberfläche wird die Qt-Bibliothek der Firma Trolltech verwendet.

Name	Bedeutung	Steuerungsaufgabe	
Camera	Digital Input/Output	Kameras für Nachführung, SHA und Beobachtung	
DIO		Ansteuerung von Karten zur digitalen Signalerzeugung	
Geo		geographische Position	
Guide		Nachführungskorrektur	
Meteo		Wetterstation	
M1		Aktuatoren des Primärspiegels	
M2		Montierung des Sekundärspiegels	
Mount		zentrale Komponente für die primäre Montierung, Zeitkontrolle	
Paddle		Power Supply	Blendenklappen auf der Instrumentenplattform
PS			verschiedene Netzgeräte zur Stromversorgung
SHA	Telescope Control Unit	Shack-Hartmann-Analyse	
TCU		primäre Montierung (Labview, dSpace-Programm)	

Tabelle 3.9: Zentrale Module der HPT-Software

Tabelle 3.9 gibt eine Übersicht über die zentralen Module der Steuerungssoftware des HPT, Abbildung 3.36 zeigt den Informationsfluss zwischen den Modulen. Das Modul Mount bezieht die geographische Position vom Modul Geo. Wetterdaten werden von Meteo geliefert. Meteo und Geo müssen laufen, ehe der Mount gestartet werden kann. Der Mount läuft in Echtzeit und ist für die Zeitkontrolle verantwortlich. Zudem versorgt er die TCU über einen CAN-Bus mit Positionsdaten (Azimut, Elevation). Er liefert die aktuelle Position an die für die Nachführungskorrektur

¹⁶Atacama Large Millimeter Array

¹⁷ALMA Common Software

¹⁸Die Common Object Request Broker Architecture, kurz CORBA, ist eine anwendungsunabhängige Technologie, die plattformübergreifende und sprachunabhängige Dienste und Protokolle definiert, die das Erstellen verteilter Anwendungen in heterogenen Systemen ermöglicht.

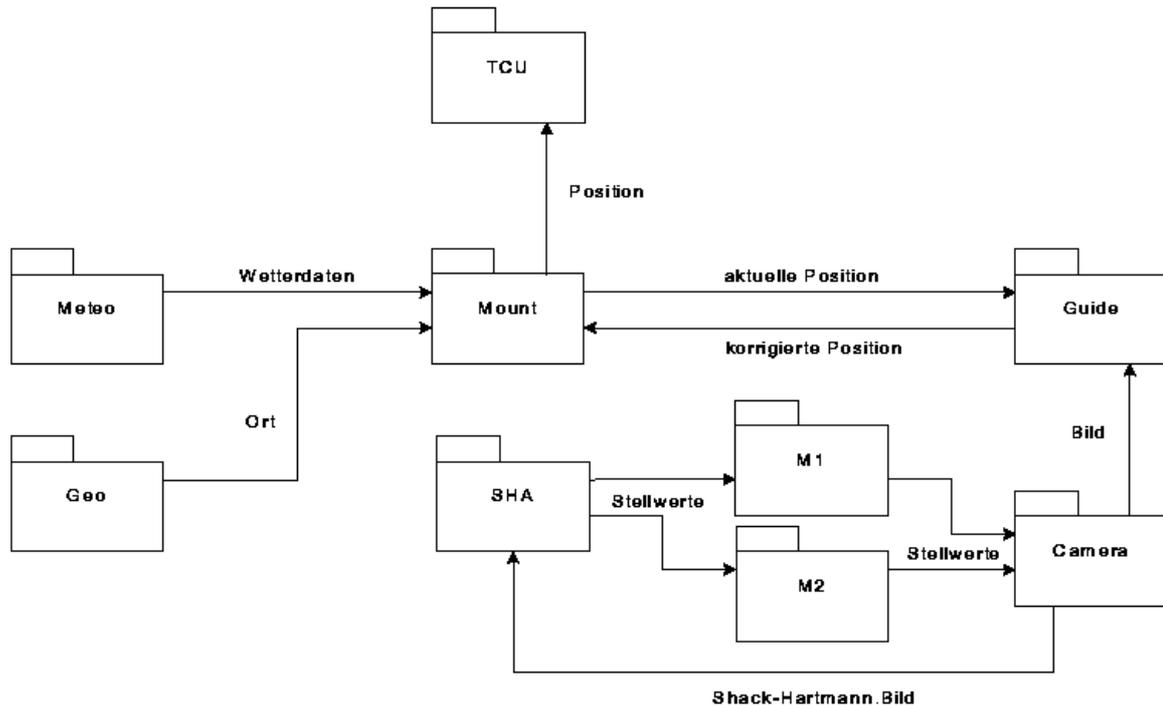


Abbildung 3.36: Informationsfluss zwischen den zentralen Modulen

zuständige Komponente "Guide". Diese wiederum bezieht via Camera laufend Bilder von der Nachführungskamera — Camera ist die zentrale Komponente zur Verwaltung aller angeschlossenen Kameras, sie verfügt über Steuerungsmodule für jede einzelne Kamera. Die Kamerakomponente fragt die aktuellen Positionen beim Mount und die aktuellen Stellwerte der Hauptspiegelaktuatoren und der Montierung des Sekundärspiegels ab. Diese Informationen werden zusammen mit dem Bild abgespeichert. Bilder selbst werden im in der Astronomie üblichen FITS-Format gespeichert bzw. weitergereicht. Sollte eine Nachführungskorrektur erforderlich sein, liefert "Guide" Korrekturwerte an den Mount zurück, der sie in die aktuellen Positionen für die TCU einrechnet.

Dieser Ablauf enthält eine Besonderheit der Steuerung eines hexapod-montierten Teleskops: es gibt keine Nachführung im eigentlichen Sinn. Bei einem parallaktisch montierten Teleskop etwa besteht die Nachführung aus einem vom Motor der Stundenachse vorgenommenen Drehen des Teleskops mit konstanter Geschwindigkeit. Die Steuerungssoftware greift nur dann ein, wenn der Stern "wegläuft". Bei azimutal montierten Teleskopen ist dies prinzipiell genauso, allerdings wegen der nicht konstanten Geschwindigkeit etwas komplizierter. Die Steuerung lässt sich in beiden Fällen vom Teleskop trennen, es folgt — in gewissen Grenzen — dem Stern autark. Beim HPT scheitert diese Art der Nachführung. Statt dessen wird es von der Steuerung permanent mit neuen Positionsdaten versorgt, die es dann anfährt. Bei einer Trennung des Teleskops von der Steuerung bleibt das HPT sofort stehen.

Die für die Shack-Hartmann-Analyse zuständige Komponente "SHA" bekommt von der Kamerakomponente aktuelle Bilder der Shack-Hartmann-Kamera, die sie dann analysiert und aus den festgestellten Fehlern Korrekturwerte für die Hauptspiegelaktuatoren und die Sekundärspiegelmontierung errechnet. Falls keine wissenschaftliche Aufnahme läuft, werden die Korrekturwerte an die Module "M1" und "M2" weitergereicht, die die entsprechenden Einstellungen vornehmen.

Bis auf die genannte Ausnahme — Meleo und Geo müssen vor Mount gestartet werden — funktionieren die Komponenten auch unabhängig voneinander. Das heißt, die Kameras laufen auch,

wenn M1 und M2 noch nicht gestartet sind, die Bilder enthalten dann allerdings die entsprechenden Stellwerte nicht. Für einen Testbetrieb ist dies praktisch, für den Wissenschaftsbetrieb muss jedoch sichergestellt werden, dass alle benötigten Komponenten gestartet wurden und einwandfrei funktionieren.

Alle genannten Komponenten wurden vom HPT-Team — Roland Lemke, Thomas Jürges, Martin Paegert - neu entwickelt. Jedes Modul besteht aus 2 bis 3 Schichten:

- Benutzeroberfläche
- Verarbeitungs- und Steuerkomponente
- Datenbankanschluss (optional, nicht für jede Komponente notwendig)

Die Verarbeitungs- und Steuerkomponente sowie die von ihr abhängige Datenbankschicht läuft nur einmal. Es können aber mehrere Benutzeroberflächen gestartet werden: Zum Beispiel eine vor Ort in Chile und eine zweite in Bochum. Es ist sicherzustellen, dass nur eine der Benutzeroberflächen die Verarbeitungs- und Steuerkomponente aktiv kontrolliert. Während eine Oberfläche aktiv steuert, darf die andere nur beobachten. Steuerungs- und Beobachterrolle müssen austauschbar sein. Dies geht nur, wenn die Verarbeitungs- und Steuerkomponente "weiß", wer sie aktiv kontrolliert und weitere Anfragen ablehnt, wenn es bereits eine steuernde Benutzeroberfläche gibt. Gleichzeitig soll es der steuernden Benutzeroberfläche aber möglich sein, die Kontrolle abzugeben. Dies wurde realisiert.

Zentral für jedes CORBA-basierte System sind "IDL"-Dateien¹⁹. Ein IDL-Compiler übersetzt diese Beschreibungen in Strukturen einer konkreten Programmiersprache - zum Beispiel C++. In einem zweiten, rein "mechanischen", aber fehleranfälligen und mühsamen Schritt sind diese Übersetzungen in ein Rahmenwerk wie ACS einzufügen und zu testen. Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Programm entwickelt, das diesen Schritt automatisiert (acsGenerator). Es wird von der ESO und anderen Instituten eingesetzt.

Immer mehr Ergebnisse in der Astronomie wie in der Physik hängen von Programmen und ganzen Ketten von Programmen ab, deren einzelne Glieder präzise ineinandergreifen müssen, wenn solide neue Erkenntnisse gewonnen werden sollen. Die Komplexität der Anwendungen und Datenauswertungen ist mittlerweile so hoch, dass mehr als die Hälfte der Arbeitszeit darauf verwendet wird, Programme zu schreiben. Nach diesen einleitenden Worten, sei der Fokus nun auf die von mir entwickelten und angepassten Steuerungsmodulen des HPT gelegt. Beiträge zu Modulen, die hauptsächlich von Roland Lemke oder Thomas Jürges entwickelt wurden, werden hier nicht dargestellt.

3.6.1 Steuerung des Sekundärspiegels (M2)

Nach dem Test und Einbau der M2-Motoren war ein Programm zu entwickeln, das die Steuerung der Sekundärspiegelmontierung in die Gesamtsteuerung integriert und das es erlaubt, den Sekundärspiegel gezielt zu verfahren. Prinzipiell gelten für die Sekundärspiegelmontierung dieselben Gleichungen wie für die Hauptmontierung. Als Grundebene fungiert jetzt die Ebene, in der die unteren Kardane²⁰ der Sekundärspiegelmontierung liegen. Das Koordinatensystem habe

¹⁹Interface Definition Language, eine Sprache zur Beschreibung der zur Verfügung gestellten Schnittstellen eines Moduls

²⁰Ich verwende den Begriff "Kardane" weiter, auch wenn die Sekundärspiegelmontierung nicht über Kardane, sondern Kugelgelenkstrukturen (unten) und über eine mechanische Wippe (oben) verfügt, die bei den geringen, benötigten Stellwinkeln jedoch wie Kardane funktionieren.

seinen Ursprung wieder im Mittelpunkt des Kreises, auf dem die unteren Kardane liegen. Dieses System ist fest mit der Hauptspiegelplattform verbunden, das bewegliche System S_2 und das Grundsystem der Sekundärspiegelsteuerung unterscheiden sich im S_2 -System nur durch einen festen Versatz in z-Richtung. Eine Rückrechnung auf S_2 wird in der Praxis aber nicht benötigt. Es gibt 3 grundlegende Bewegungen des Sekundärspiegels:

1. Fokussierung
2. Bewegung des Mittelpunktes um einen Betrag in eine vorgegebene Richtung
3. Rotation um den Krümmungsmittelpunkt des Sekundärspiegels

Diese Bewegungen werden analysiert und die entsprechenden Steuerbewegungen beschrieben. Ausgangspunkt ist wieder Gleichung 3.25 für die Beinvektoren:

$$\vec{l}_i = -\vec{u}_i + \vec{m} + \underline{E} \cdot \vec{o}_i \quad i = 1 \dots 6$$

Im Gegensatz zur Hauptmontierung sind die Bewegungen der Sekundärspiegelmontierung klein, die Eulermatrix E ist fast identisch mit einer Einheitsmatrix. Dies kann genutzt werden, um nicht die Winkel, sondern ausgehend von einer Anfangslage, die Vektoren \vec{o}_i direkt im Koordinatensystem der unteren Kardane mitzuführen. Die Gleichung vereinfacht sich dann zu:

$$\vec{l}_i = -\vec{u}_i + \vec{m} + \vec{o}_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (3.41)$$

Die Fokussierung ist trivial: der Sekundärspiegel wird nur in z-Richtung bewegt, \vec{m} in der z-Komponente verlängert oder verkürzt. Alle Beinlängen werden um gleiche Beträge geändert.

Eine Translation des Mittelpunktsvektors \vec{m} um einen Betrag r in eine Richtung az ändert die Komponenten um

$$d\vec{m} = (r \cos az, r \sin az, 0) \quad (3.42)$$

Da die Bewegung in einer Ebene erfolgt, ändern sich die oberen Kardanvektoren nicht. Die Translation des Mittelpunktes geht direkt in die Beinvektoren ein, die neuen Beinlängen können direkt berechnet und angefahren werden. Der Krümmungsmittelpunkt des Sekundärspiegels verschiebt sich starr mit dem Mittelpunkt des Sekundärspiegels. Die Position des Krümmungsmittelpunktes spielt für die Rotation um diesen Mittelpunkt eine Rolle.

Die Rotation um den Krümmungsmittelpunkt des Sekundärspiegels ist etwas komplexer. Der Krümmungsradius r_{cM2} ist bekannt und findet sich in Tabelle 3.1. Im System der unteren Kardane sei \vec{v}_{rc} der Vektor zum Krümmungsmittelpunkt. Der Krümmungsmittelpunkt sei der Ursprung eines weiteren Koordinatensystem S_{rc} , das dieselbe Ausrichtung hat wie das System der unteren Kardane. In diesem System haben die Beinvektoren dann die Koordinaten

$$\vec{l}' = \vec{v}_{rc} - \vec{l} \quad (3.43)$$

Analog gilt für den Mittelpunktsvektor

$$\vec{m}' = \vec{v}_{rc} - \vec{m} \quad (3.44)$$

In diesem System lässt sich jede Rotation um den Mittelpunkt durch eine Eulermatrix mit den Winkeln raz , rzd und $-raz$ ausdrücken. Dabei ist raz der gewünschte azimutale Winkel, in dessen Richtung, und rzd der Winkel, um den geschwenkt werden soll. Dieselbe Transformation ist für

\vec{m}' durchzuführen. Zusammen mit der Rücktransformation in das System der unteren Kardane erhält man für die neuen Vektoren:

$$\vec{l}_n = \vec{v}_{rc} - E(raz, rzd, -raz) \cdot \vec{l}' \quad \vec{m}_n = \vec{v}_{rc} - E(raz, rzd, -raz) \cdot \vec{m}' \quad (3.45)$$

Alternativ böte sich an, die Vektoren im System des Krümmungsmittelpunktes in Kugelkoordinaten zu transformieren, *raz* und *rzd* direkt zu addieren und wieder zurück in kartesische Koordinaten zu wandeln. Dies wäre jedoch ungeschickt, da der Sekundärspiegel idealerweise so steht, dass die Zenitdistanz gleich π ist, er also genau in Polstellung steht.

Anders als bei der primären Montierung werden die Beinlängen der Sekundärspiegelmontierung nicht direkt gemessen. Die an den Motoren befindlichen Absolutencodier liefern nur die Stellung der Motorspindeln und Information darüber, wie weit die Motorspindel ausgefahren ist. Es muss noch die Beinlänge selbst hinzuaddiert werden — mit Beinlänge ist hier die konstante Länge der CFK-Strebe der Sekundärspiegelhalterung gemeint.

Bei der Steuerung des Sekundärspiegels kommt es in der Praxis weniger auf die absoluten Werte der Beinlängen oder -vektoren als auf die Differenz zur korrekten Idealposition an, und die definiert sich über die Optik des Gesamtsystems. In der Idealposition des Teleskops fallen die optischen Achsen des Haupt- und Sekundärspiegels zusammen und das Teleskop ist fokussiert. In diesem Fall liegt auch der Krümmungsmittelpunkt des Sekundärspiegels auf der gemeinsamen optischen Achse, die Vektoren \vec{v}_{rc} und \vec{m} haben nur eine z-Komponente. Die Shack-Hartmann-Analyse liefert zwar absolute Fehler im Sinne der klassischen Bildfehler, daraus berechnen sich dann aber Differenzen von dieser Idealposition, also relative Stellgrößen wie "2 Mikrometer zu weit in Richtung 90 Grad Azimut".

Auf Grund der fehlenden Konstruktionszeichnungen der Sekundärspiegelhalterung lässt sich die genaue Geometrie derzeit nur abschätzen, aber nicht mit der erforderlichen Genauigkeit berechnen. Ist aber erstmal eine Idealposition gefunden, so kann diese verwendet werden, um die geometrischen Daten zu berechnen. Dies wird ein iterativer Prozess sein, da der große Astigmatismus die manuelle Ermittlung der Fokusposition erschwert. Die Geometrie der Sekundärspiegelmontierung findet sich im Anhang in Abbildung C.2, die Tabelle mit den unteren und oberen Kardanvektoren in Tabelle C.2.

Die zenitnahe Idealposition des Sekundärspiegels ist zunächst unbekannt. Mit Hilfe der in das Zentralloch des Hauptspiegels eingesetzten Laserplatte und des entwickelten Programms lässt sich das Teleskop so steuern, dass die Mittenmarkierung vom Laserstrahl getroffen wird und die Reflektion den Laser zentrisch umgibt. In dieser Stellung sind die Encoderwerte sowie Beinvektoren und der Bequemlichkeit halber der Mittenvektor als Referenzwerte abzuspeichern.

Die so festgehaltene Position wird als größten Fehler noch einen Defokus aufweisen. Der lässt sich in einem ersten Schritt manuell beseitigen, indem man das Teleskop auf einen zenitnahen Stern positioniert und den Fokus nach visueller Begutachtung einstellt. Die Encoderwerte, Beinlängen und der Mittelpunktvektor sind in einer anderen Datei zu speichern. Anschließend ist das Teleskop wieder in Zenitposition zu fahren und die Stellung mittels Laserplatte zu kontrollieren. Sollten sich deutliche Abweichungen ergeben, ist der Sekundärspiegel unter Beibehaltung der z-Komponente für den Mittenvektor nachzukorrigieren und der Parametersatz in einer dritten Datei zu speichern.

Idealerweise sollte sich der erste und zweite Parametersatz nur durch gleiche Differenzen in allen Beinlängen unterscheiden. Abweichungen in den Differenzen sowie die Unterschiede zwischen dem zweiten und dritten Parametersatz (also nach der Korrektur größerer Abweichungen mit Hilfe der Laserplatte) liefern einen ersten Hinweis auf die gravitative Empfindlichkeit der Ende 2006 neu produzierten Beine der Sekundärspiegelhalterung.

3.6.2 Shack-Hartmann-Analyse

Die Shack-Hartmann-Analyse basiert auf dem Vergleich einer Referenzaufnahme, die unter idealen Bedingungen hergestellt wird, mit einer realen Aufnahme, die optische Fehler enthält. Die Linsen des Shack-Hartmann-Gitters liefern unter Idealbedingungen ein regelmäßiges Punktgitter, das heißt: alle Punkte haben den gleichen Abstand voneinander. Fällt eine gestörte Wellenfront auf das Gitter, so verschieben sich die Punkte gegeneinander. Diese Verschiebungen gegenüber dem Referenzgitter werden ausgemessen. Aus ihnen werden die Wellenfrontfehler berechnet und aus denen wiederum Korrekturwerte für die Hauptspiegelaktuatoren. Damit das Verfahren funktioniert, dürfen die Wellenfrontfehler nicht zu groß und die Wellenfront muss in allen Punkten stetig differenzierbar sein. Abbildung 3.37 illustriert diese Voraussetzungen.

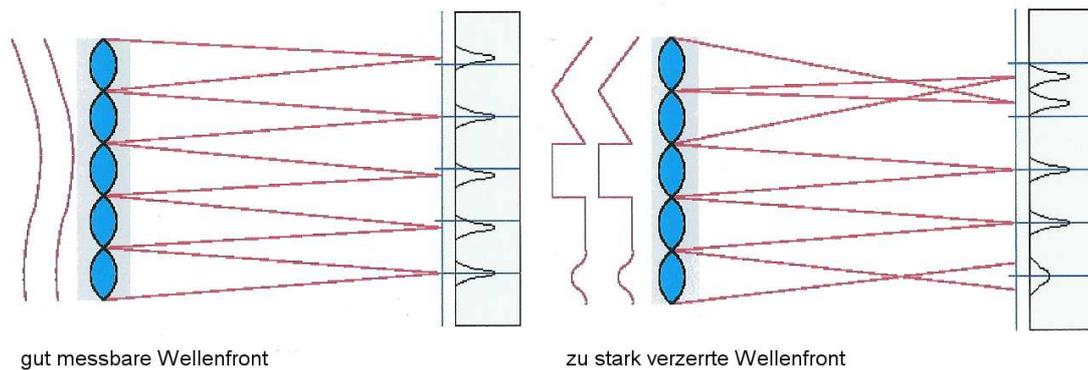


Abbildung 3.37: Grenzen der Shack-Hartmann-Analyse

Links: schwach gestörte, stetig differenzierbare Wellenfront, die sich gut auswerten lässt.

Rechts: zu stark gestörte und nicht stetig differenzierbare Wellenfront, die sich nicht auswerten lässt.

Der Versatz $\Delta x, \Delta y$ der Punkte von ihrer Idealposition liefert ein Maß für die Abweichung der realen von der idealen Wellenfront. Die vor dem Shack-Hartmann-Sensor liegende Optik ist bei der Übersetzung von Versatz in Wellenfrontfehler zu berücksichtigen. Ist f_{col} die Brennweite der Kollimatorlinse, f_l die Brennweite einer einzelnen Sensorlinse und N_{tel} die Öffnungszahl des Teleskops, so ist der Zusammenhang von Versatz und Wellenfrontfehler gegeben durch:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2N_{tel}} \frac{f_{col}}{f_l} \Delta x \quad \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{1}{2N_{tel}} \frac{f_{col}}{f_l} \Delta y \quad (3.46)$$

Abbildung 3.38 illustriert die Zusammenhänge.

Eine Shack-Hartmann-Analyse besteht außer der Herstellung der Referenz- und Sternaufnahme aus mehreren Schritten:

1. Bestimmung der Position der Linsenabbildungen in der Referenz- und Sternaufnahme
2. Zuordnung der Abbildungen zueinander
3. Ausmessen der Abweichungen
4. Integration der Abweichungen auf dem Detektor zu Wellenfrontdeformationen
5. Anpassung der Deformation an annulare Zernike-Polynome²¹ nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate

²¹siehe Anhang A

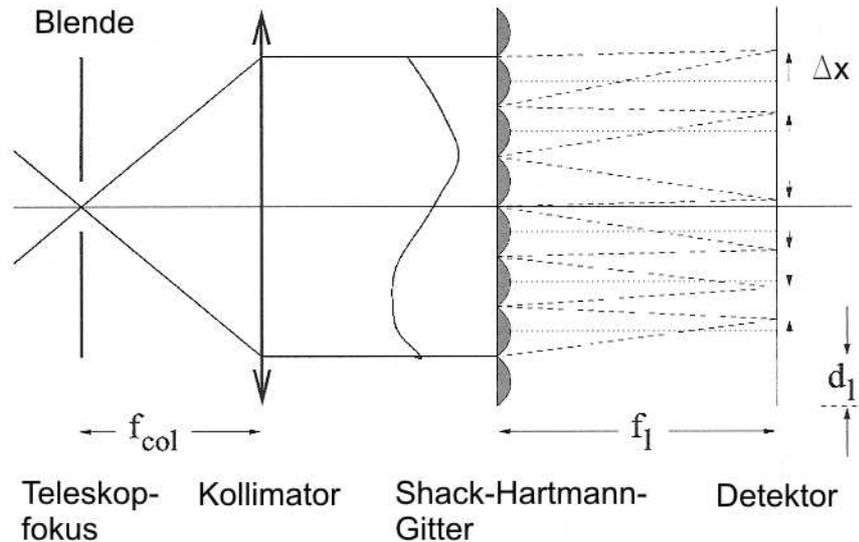


Abbildung 3.38: Zusammenhang zwischen Punktversatz und Wellenfrontfehler

6. Subtraktion a priori vorhandener Fehler wie etwaiger Feldkoma²²
7. Transformation der verbleibenden Fehler in Stellgrößen für die Aktuatoren des Hauptspiegels und die Beinlängen der Sekundärspiegelmontierung

Die Schritte 4 und 5 lassen sich zusammenfassen, wenn die Koeffizienten über die Gradientengleichungen gelöst werden. Eine genauere Erläuterung erfolgt weiter unten.

Zur Verfügung stand ein in Fortran geschriebenes Programm, das im Rahmen einer Diplomarbeit in C-Code umgesetzt wurde und das in die CORBA-basierte Umgebung von ACS einzubinden war. Die ersten 5 Schritte sollten damit abgedeckt sein. Der Versuch, im Rahmen des Tests der Instrumentenplattform gewonnene Aufnahmen von dem vorhandenen Programm auswerten zu lassen, führte jedoch bei manchen Aufnahmen zum Programmabsturz und zu instabilem, nicht reproduzierbarem Fehlverhalten. Damit war klar, dass außer der Portierung in C++ und der Einbindung in ACS eine umfangreiche Fehlersuche nötig war. Außer den üblichen, schwer zu findenden Indexfehlern fand sich ein Fehler mit physikalischer Relevanz.

Die Bestimmung der Position der Abbildung einer Gitterlinse basierte auf der Annahme, dass der hellste Punkt auf der CCD-Kamera das Zentrum einer Abbildung ist, um die herum dann nach weiteren Abbildungen gesucht wurde. Das Verfahren scheitert, wenn der hellste Punkt nicht mit einer Abbildung, sondern mit einem Einfall kosmischer Höhenstrahlung oder einer bis dato unbekannt, fehlerhaften Zelle der CCD-Kamera assoziiert ist. Es scheitert ebenfalls bei langen Belichtungszeiten, weil dann thermisches Rauschen im Kameradetektor im Einzelfall fast zwangsläufig in irgendeiner Zelle dazu führen wird, dass ihr Signal größer ist als das der eigentlichen Quelle - sprich dem Stern oder auch der Referenzlichtquelle.

Der theoretische Abstand der einzelnen Abbildungen der Gitterlinsen ist bekannt — 15 Pixel. Dies wurde ausgenutzt, um Suchzellen zu definieren, nachdem das hellste Pixel gefunden war. Ist das hellste Pixel nicht mit einer Abbildung assoziiert, scheitert das Verfahren komplett.

²²Das HPT ist eigentlich komafrei, der zur Analyse genutzte Stern kann jedoch so weit außerhalb des wissenschaftlichen Bildes liegen, dass Feldfehler auftreten. Diese sind von den gemessenen Fehlern abzuziehen. Wird — wie vorgeschlagen — zunächst auf dem Wissenschaftsobjekt initialisiert, dann der Referenzstern angefahren und sofort eine SHA-Aufnahme gemacht, so sind die Fehler dieser Aufnahme die abzuziehenden Feldfehler.

Wohl um Rechenzeit zu sparen wurden alle Pixel innerhalb einer Suchzelle der Helligkeit nach sortiert und die hellsten Pixel für eine Anpassung an ein Gauß-Profil herangezogen. Auch dieses Verfahren scheitert, wenn ein verrauschtes Pixel innerhalb der Zelle heller als die schwachen Pixel der realen Abbildung sind.

Diese Fehler können vermieden werden, wenn die Umgebung der in Frage kommenden Pixel untersucht wird. Da die gesamte weitere Auswertung davon abhängt, die Abbildungen der Linsen sicher aufzufinden, sei das Verfahren kurz beschrieben. Ein 5 Pixel breiter Rand des Chips wird überhaupt nicht zur Auswertung herangezogen, um etwaige Produktionsfehler oder Randeffekte zu vermeiden. Innerhalb der verbleibenden Fläche wird der Hintergrund aus dem Quadrat (10, 10), (30, 30) bestimmt. In diesem Bereich liegt auf Grund der Geometrie des Shack-Hartmann-Sensors keine Linsenabbildung. Anschließend wird die CCD nach dem ersten Pixel durchsucht, das folgende Anforderungen erfüllt:

- Die Zählrate $z[i, j]$ muss höher als das 5-fache des Hintergrundes sein
- keines der Nachbarpixel darf einen höheren Wert als $z[i, j]$ haben
- jedes der Nachbarpixel hat mindestens den Wert $(1/3)z[i, j]$
- jedes Nachbarpixel hat einen Wert, der höher ist als das Doppelte des Hintergrundes

Wird eine dieser Bedingungen verletzt, wird mit der Suche fortgefahren. Die Bedingungen sind so gewählt, dass ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis gegeben ist und dass die Form annähernd einer Gaußkurve entspricht. Bei einem idealen Abbild im Beugungslimit hätten die unmittelbaren Nachbarn einen Wert von $0.61z[i, j]$, die Nachbarn in der Diagonale von $0, 36z[i, j]$. Fällt das Signal steiler ab, so kann es sich nicht um eine Linsenabbildung handeln.

Erfüllt ein Pixel diese Bedingungen, stehen wahlweise der übernommene Pseudo-Gaußfit, ein 2-dimensionaler Gaußfit per Levenberg-Marquardt-Verfahren oder eine Schwerpunktsbestimmung für die Berechnung des Abbildungszentrums zur Verfügung. In jedem Verfahren wird die Standardabweichung in x- und y-Richtung sowie die lineare Exzentrizität berechnet. Abbildungen mit zu hoher Standardabweichung oder Exzentrizität werden verworfen.

Es ist nicht wichtig, mit welchem Verfahren das Zentrum der Abbildung bestimmt wird, solange bei Referenz- und Sternaufnahme dasselbe Verfahren verwendet wird. Selbst die Differenzen zwischen Gaußfit und Schwerpunktsbestimmung sind marginal. Abgeraten wird vom übernommenen Pseudo-Gaußfit, der, obwohl er Rechnerzeit sparen sollte, auf Grund des Umspeicherns der Werte und deren Sortierung etwa 2 bis 3 mal länger braucht als ein Gaußfit mittels Levenberg-Marquardt. Wie erwartet, ist der mit Abstand schnellste Algorithmus die einfache Schwerpunktsbestimmung.

Ist die erste Abbildung einer Gitterlinse gefunden, lässt sich die Suche nach weiteren Abbildungen erheblich beschleunigen. Der ungefähre Abstand der Abbildungen beträgt 15 Pixel, um diesen Betrag wird weitersgesprungen und in einer quadratischen Suchzelle von 12 Pixeln Kantenlänge die nächste Abbildung gesucht.

Das Verfahren wurde auch mit stark verrauschten, lange belichteten Aufnahmen getestet. Alle qualitativ verwertbaren Linsenbilder wurden gefunden, verzerrte oder nur teilweise belichtete Abbildungen wurden sicher ausgeschlossen.

Ein weiterer, wesentlicher Schritt besteht im Auffinden zueinander gehörender Linsenbilder in der Referenz- und Sternaufnahme. Dies gelingt jedoch zwanglos mit einem Indizierungstrick: ausgehend vom ersten gefundenen Bild in der Referenzaufnahme legt man ein 15 x 15 Pixel großes

Raster über die Daten und merkt sich die Rasterpositionen jeder Abbildung als gerundete, ganze Zahl. Zueinander gehörende Abbilder in der Referenz- und Sternaufnahme müssen identische Rasterpositionen haben. Dieses Verfahren versagt dann, wenn einander eigentlich zugeordnete Abbildungen um mehr als eine halbe Rasterbreite (also 7 bis 8 Pixel) voneinander abweichen. Dafür gibt es 2 mögliche Gründe:

1. optische Fehler des Teleskops
2. zu große Abweichung der Position der Referenz- von der Beobachtungsblende.

Im ersten Fall sind die optischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Shack-Hartmann-Analyse nicht mehr gegeben (siehe Abbildung 3.37). Im zweiten Fall weichen der Strahlengang von der Referenzblende und dem vom Teleskop kommendem Licht viel zu weit voneinander ab und die Instrumentenplattform ist nachzujustieren.

Man kann nun entweder Gleichung 3.46 direkt integrieren, die anfallenden Integrationskonstanten per Methode der kleinsten Fehlerquadrate anpassen und die Zernike-Koeffizienten berechnen, oder man arbeitet mit den Gradienten und bestimmt die Koeffizienten über sie. Es ist unerheblich, ob dabei in kartesischen oder in Polarkoordinaten gerechnet wird. Wichtig ist aber, die Eingangsdaten auf den Aperturradius zu normieren, da die Zernike-Polynome nur auf einem Einheitskreis bzw. auf einem Einheitskreis mit zentraler Abschattung (annulare Zernike-Polynome) orthogonal sind.

Wie im Anhang A dargestellt lassen sich die Abweichungen der Wellenfront von ihrer Idealform als Summe von Zernike-Polynomen darstellen:

$$W = \sum_k a_k Z_k(x, y)$$

Differentiation und Gleichsetzung mit Gleichung 3.46 liefert

$$c \Delta x = \sum_i a_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} \quad c \Delta y = \sum_i a_i \frac{\partial Z_i}{\partial y} \quad \text{mit } c = \frac{1}{2N_{tel}} \frac{f_{col}}{f_l} \quad (3.47)$$

Mit $cx(x, y) = c\Delta x(x, y)$, $cy(x, y) = c\Delta y(x, y)$, $gx(x, y) = \frac{\partial Z_i}{\partial x}$ und $gy(x, y) = \frac{\partial Z_i}{\partial y}$ lassen sich die Gleichungen wie folgt schreiben:

$$\begin{bmatrix} dx(x_1, y_1) \\ dy(x_1, y_1) \\ dx(x_1, y_2) \\ dy(x_1, y_2) \\ \vdots \\ dx(x_m, y_m) \\ dy(x_m, y_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} gx_1(x_1, y_1) & gx_2(x_1, y_1) & \cdots & gx_n(x_1, y_1) \\ gy_1(x_1, y_1) & gy_2(x_1, y_1) & \cdots & gy_n(x_1, y_1) \\ gx_1(x_1, y_2) & gx_2(x_1, y_2) & \cdots & gx_n(x_1, y_2) \\ gy_1(x_1, y_2) & gy_2(x_1, y_2) & \cdots & gy_n(x_1, y_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ gx_1(x_m, y_m) & gx_2(x_m, y_m) & \cdots & gx_n(x_m, y_m) \\ gy_1(x_m, y_m) & gy_2(x_m, y_m) & \cdots & gy_n(x_m, y_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

m ist dabei die Gesamtzahl der assoziierbaren Bilder aus der Referenz- und Sternaufnahme, n die Anzahl der anzupassenden Zernike-Polynome. 3.48 ist ein lineares Gleichungssystem für die unbekanntenen Zernike-Koeffizienten a_i . In kürzerer Matrixschreibweise lautet es

$$\vec{d} = G \cdot \vec{a} \quad (3.49)$$

Das System lässt sich mit Hilfe der Pseudoinversen G^+ lösen, die Lösung liefert die beste Anpassung der Koeffizienten im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate:

$$\vec{a} = G^+ \cdot \vec{d} \quad (3.50)$$

Die Pseudoinverse einer reellen Matrix G ist wie folgt definiert:

$$G^+ = (G^T G)^{-1} G^T \quad (3.51)$$

und erfüllt die Gleichung $A^+ A = E$.

In der Praxis ermittelt man die Pseudoinverse am besten über eine Singulärwertzerlegung von G : $G = USV^T$. Mit diesen Matrizen berechnet sich die Pseudoinverse dann aus

$$G^+ = V (S^T S)^{-1} S^T U^T \quad (3.52)$$

Algorithmen zur Singulärwertzerlegung sind in der einschlägigen Literatur, etwa in William H. Press, hinreichend beschrieben und genau aus dieser Quelle stammte auch der Code für die Singulärwertzerlegung, was sich als eine weitere Fehlerquelle herausstellte. Der Grund ist zwar nicht von physikalischer, aber von praktischer Relevanz, deshalb sei er kurz dargestellt. Eine Singulärwertzerlegung erfordert umfangreiche Rechnungen mit Gleitkommavariablen, die in Fallunterscheidungen benutzt werden. Die in den "Numerical Recipes" angegebenen Programme enthalten in allen mir bekannten Fällen einen Test berechneter Gleitkommazahlen auf Gleichheit mit 0 oder einem anderen Wert. Diese Identität wird insbesondere nach zahlreichen Berechnungen, in denen die Vergleichsvariablen ermittelt werden, auf Grund des "numerischen Rauschens" nicht notwendigerweise erfüllt sein. Das kann und wird zu falschen Ergebnissen führen, deren Ursache kaum noch feststellbar ist.

Sind a und b Gleitkommazahlen, so sollte statt auf $(a == b)$ auf $((a - b)/b < \epsilon)$ getestet werden, wobei ϵ ein dem Problem angepasster Schwellwert ist, mindestens aber die Genauigkeit ist, mit der eine Differenz von 1 aufgrund der internen Repräsentation von Datentypen ermittelt werden kann. In C++ steht dieser Wert für Gleitkommatyp mittels

```
#include <limits>;
numeric_limits<typ>  tlim;
typ lim = tlim.epsilon();
```

zur Verfügung.

Sind die Zernike-Koeffizienten berechnet, so ist die Korrekturfunktion bekannt und muss in Stellwerte für die Hauptspiegelaktuatoren umgesetzt werden. Im Programm erfolgt dies, indem über eine für alle Aktuatoren identische Einflussfunktion der Form

$$e = \exp^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma}}$$

integriert wird. Das Integral wird dann nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate an die berechneten Wellenfrontfehler angepasst. Der Parameter σ wird aus einer Konfigurationsdatei gelesen und ist derzeit gleich 0,1.

Es ist zwar vernünftig, einen exponentiellen Abfall des Einflusses eines Aktuators anzunehmen, jedoch haben die Funktionstests der Aktuatoren mit Hilfe von Pupillenaufnahmen gezeigt, dass es eine erhebliche Rolle spielt, ob ein Aktuator auf einem inneren, mittleren oder äußeren Ring sitzt (siehe Abbildung C.1). Zumindest der Parameter σ für die Standardabweichung wird für jeden Ring anders aussehen.

Ein Problem wird darin bestehen, diese Einflussfunktionen am Teleskop zu bestimmen, weil keine Referenzaufnahme des optimal gestellten Spiegels vorliegt. Mit anderen Worten: es muss mit dem ungestellten Spiegel gearbeitet werden. Setzt man alle Aktuatoren auf mittlere Höhe $0,5h_{max}$,

so kann die dann gemachte SHA-Aufnahme des ungestellten Spiegels als Referenzaufnahme herangezogen werden. Anschließend ist ein Aktuator auf 0, 0, 25, 0, 75, 1, 0, 0, 5, 0 und wieder auf $0,5h_{max}$ zu setzen und jeweils eine Aufnahme zu machen. Die Aufnahmen müssen möglichst zeitnah gemacht werden, damit sich die Position des eingestellten Sterns am Himmel nicht so stark verändert, dass gravitative Verformungen zu Anfang und Ende der Beobachtungsreihe die Punktpositionen auf den SHA-Aufnahmen verändern. Dies soll anhand der dritten Aufnahme bei halber Maximalhöhe kontrolliert werden.

Piezoaktuatoren können eine Hysterese aufweisen. Stellt man einen Aktuator auf 0, 0, 5, 1 und wieder auf $0,5h_{max}$, so wird der Aktuator in den beiden Stellungen bei halber Maximalhöhe tatsächlich eine etwas andere Höhe haben. Ob diese Hysterese beim HPT eine Rolle spielt und wie groß sie ist, muss ebenfalls mit Hilfe von SHA-Aufnahmen abgeschätzt werden. In der oben vorgeschlagenen Messreihe geben die erste und zweite Aufnahme bei halber Maximalhöhe Auskunft über eine eventuell vorhandene Hysterese der Aktuatore, weil dieselbe Position einmal von unten und einmal von oben angefahren wird.

Misst man die Verschiebung der einzelnen Punkte des SHA-Gitters bei unterschiedlichen Aktuatorpositionen, so lässt sich daraus eine Einflussfunktion konstruieren. Sei $\Delta h_i = (0,5h_{max} - h)$ die Abweichung von der Mittenposition eines Aktuators an der Stelle (x_i, y_i) und seien Δx_j sowie Δy_j die gemessenen Abweichungen eines SHA-Punktes an der Stelle (x_j, y_j) , so ist allgemein

$$\Delta x_i = f_j(x_i - x_j, y_i - y_j, \Delta h_j) \quad \Delta y_i = g_j(x_i - x_j, y_i - y_j, \Delta h_j) \quad (3.53)$$

Die Aufgabe besteht dann darin, aus den Messwerten und dem Abstand von Punkten und Aktuator die Funktionen zu bestimmen.

Eine wesentliche Frage ist, ob diese Funktionen linear in h sind, ob also gilt $f(2\Delta h) = 2f(\Delta h) = 2\Delta h f^*$, wobei f^* nur noch von den Abständen abhängt. Ist dies der Fall, erleichtert das die Arbeit ungemein, weil dann die Funktionswerte je Punkt und Aktuator konstant sind und nur einmal ermittelt werden müssen.

Bisher wurde nur ein Aktuator betrachtet. In die Programme fließt die Annahme ein, dass sich die Einflüsse aller Aktuatore auf eine Punktposition linear superponieren:

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{36} f_j(x_i - x_j, y_i - y_j, \Delta h_j) \quad \Delta y_i = \sum_{j=1}^{36} g_j(x_i - x_j, y_i - y_j, \Delta h_j) \quad (3.54)$$

Diese Annahme ist vernünftig, sollte am Teleskop aber mit Hilfe des gezielten Verstellens zweier benachbarter Aktuatore und deren gemeinsamen Einflusses auf die zwischen ihnen liegenden Punktpositionen verifiziert werden.

Ist die Annahme der linearen Superposition zutreffend, und sind die Einflussfunktionen annähernd linear in Δh_j , so lassen sich die Gleichungen wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1(x_1, y_1) \\ \Delta y_1(x_1, y_1) \\ \Delta x_2(x_2, y_2) \\ \Delta y_2(x_2, y_2) \\ \vdots \\ \Delta x_m(x_m, y_m) \\ \Delta y_m(x_m, y_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, y_1) & f_2(x_1, y_1) & \cdots & f_{36}(x_1, y_1) \\ g_1(x_1, y_1) & g_2(x_1, y_1) & \cdots & g_{36}(x_1, y_1) \\ f_1(x_2, y_2) & f_2(x_2, y_2) & \cdots & f_{36}(x_2, y_2) \\ g_1(x_2, y_2) & g_2(x_2, y_2) & \cdots & g_{36}(x_2, y_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(x_m, y_m) & f_2(x_m, y_m) & \cdots & f_{36}(x_m, y_m) \\ g_1(x_m, y_m) & g_2(x_m, y_m) & \cdots & g_{36}(x_m, y_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \vdots \\ \Delta h_{36} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

oder in Matrixschreibweise:

$$\vec{d} = F \cdot \vec{h} \quad (3.56)$$

Bestimmt man den Differenzvektor aus der Referenzaufnahme und einer Sternaufnahme, so eröffnet Gleichung 3.56 eine alternative Steuerungsmöglichkeit. Da sich das System direkt über die Pseudoinverse F^+ lösen lässt, ergibt sich eine Möglichkeit, die Stellpositionen unmittelbar aus dem Versatz der Punkte des Shack-Hartmann-Gitters zu ermitteln.

Die bisherige Steuerung zur Wellenfrontkorrektur betrachtet das Problem sozusagen durch die optische Brille. Sie behandelt es als ein optisches System, dessen Abbildungsfehler im Rahmen der optischen Theorie analysiert werden, was zu Fehlerkoeffizienten (Seidel oder Zernike) führt, die dann wieder in mechanische Stellgrößen für die Aktuatoren umgewandelt werden müssen.

Bei einer mechanischen Sicht handelt es sich um ein System, das über eine ideale und eine reale Position von Abbildungspunkten des Shack-Hartmann-Gitters verfügt und es geht nur darum, mit Hilfe von Aktuatoren die realen Punkte an ihre idealen Positionen zu verschieben. Ist der Einfluss der Aktuatoren auf die Position der Abbildungspunkte bekannt, lässt sich das Problem sozusagen rein mechanisch ohne den Weg über die optische Theorie lösen.

Im Falle des HPT kann man sich den Weg über die optische Theorie nicht gänzlich sparen, da dann Koma verursachende Fehlstellungen des Sekundärspiegels über den Hauptspiegel ausgeglichen werden würden. Für die Beobachtung selbst spielt das keine Rolle, das HPT würde dann als komafreier Schiefspiegler betrieben. Allerdings wächst die fehlerstellungsbedingte Koma recht schnell an und wird dann die Kompensationsmöglichkeit durch die Hauptspiegelaktuatoren überschreiten. Für schnelle Korrekturen ist die Kompensation der Koma per Hauptspiegel aber durchaus eine Alternative, da sich die Hauptspiegelaktuatoren erheblich schneller verstellen lassen als der Sekundärspiegel mit seinen genauen, aber mit langsamer Geschwindigkeit fahrenden Motoren.

Die Komafehler lässt man von der Software am besten in Seidelkoeffizienten umrechnen. Der Zusammenhang wird hergestellt, indem die Hamiltonfunktion zum einen per Seidelkoeffizienten, zum anderen per Zernike-Polynom dargestellt wird. Durch Koeffizientenvergleich der entsprechenden Terme ergibt sich der Zusammenhang (a_{31} ist der berechnete Zernike-Koeffizient)

$$S_{II} = 6\sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot a_{31} \quad (3.57)$$

Die Koma hat einen Winkelanteil und einen lateralen Anteil. Laut Wilson (2001) gilt für eine laterale Verschiebung um δ und eine Verkipfung um δu :

$$dS_{II}(\delta) = \frac{1}{32} \cdot \frac{(m_2 + 1)^2}{N^3} \cdot [(m_2 - 1) - (m_2 + 1)b_{sM2}] \cdot \delta \quad (3.58)$$

$$dS_{II}(\delta u) = \frac{1}{16} \cdot \frac{L(m_2^2 - 1)}{N^3} \cdot \delta \quad (3.59)$$

Mit den Daten aus den Tabellen in Kapitel 3.1 folgt:

$$dS_{II}(\delta) = -3,986 \cdot 10^{-3} \cdot \delta \quad S_{II}(\delta u) = 3.586 \text{ mm} \cdot \delta u \quad (3.60)$$

Der Komawinkel ist für Zernike-Polynome und Seidelkoeffizienten identisch und kann direkt aus der Shack-Hartmann-Analyse übernommen werden. Je nach Position der SHA-Kamera ist ein konstanter Betrag auf den Winkel zu addieren. Diese Konstante ist nach jeder Demontage der Kamera neu zu bestimmen.

Ist die Idealposition für den zenitnahen Bereich einmal gefunden bzw. wurde einmal auf das Wissenschaftsobjekt initialisiert, so sollte Koma anschließend nur durch eine Rotation um den Krümmungsmittelpunkt des Sekundärspiegels ausgeglichen werden, um Verschiebungen von Objekten im Wissenschaftsfokus zu vermeiden. Mit Hilfe des Krümmungsradius des Sekundärspiegels

lässt sich die Verschiebung gemäß $\delta = r_2 \cdot \delta u$ in einen Rotationswinkel umrechnen. Addiert man beide Komaterme, so folgt mit $r_2 = 3009,84mm$ insgesamt:

$$S_{II} = -8,411 \text{ mm} \cdot \delta u \quad (3.61)$$

Kapitel 4

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Hexapod-Teleskop aus dem Stadium isolierter Komponenten herausgeführt und zu einem soweit funktionsfähigen System vorangetrieben, dass nach Installations- und Integrationstests ein astronomischer Betrieb in unmittelbare Nähe gerückt ist. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die weiteren Entwicklungen gegeben werden.

4.1 Ergebnisse

Der zunächst fragliche Schliff des Hauptspiegels des HPT konnte eindeutig geklärt werden: es handelt sich um einen hyperbolisch geschliffenen Spiegel, die zuvor indirekt erschlossene Parabelform passt nicht zur Fokusposition des Teleskops.

Die Funktion der Hauptspiegelaktuatoren wurde getestet. Defekte in der Verstärkerendstufe zweier Aktuatoren konnten repariert werden. Die Aktuatortests erbrachten den wichtigen Hinweis, dass die Wirkung eines einzelnen Aktuators weit über die Hälfte der Distanz zu seinem nächsten Nachbarn hinausreicht. Bei der Korrektur des Hauptspiegels ist dies entsprechend zu berücksichtigen. Die Einflussfunktionen der einzelnen Aktuatoren lassen sich mit Hilfe von Shack-Hartmann-Aufnahmen und deren Analyse bestimmen.

Die Motoren für die Positionierung des Sekundärspiegels wurden getestet und kalibriert. Ein Steuerungsmodell für den Sekundärspiegel wurde entwickelt und realisiert.

Die für die Nachführungskorrektur und die Shack-Hartmann-Analyse wesentliche Instrumentenplattform wurde getestet und kalibriert. Die Linsen des Shack-Hartmann-Gitters arbeiten am Beugungslimit. Die Abbildung auf der Nachführungskamera ist nicht beugungsbegrenzt — wie dargestellt, spielt dies für die Nachführungskorrektur aber keine Rolle. Die Position der Abbildungen der Referenzlichtquelle und des zu analysierenden Strahlenbündels weisen durch einen Versatz der Referenz- und Beobachtungsblende eine unkritische Positionsdifferenz von 1 Pixel ($20\ \mu\text{m}$) auf der SHA-Kamera auf. Diese Differenz wird vom gewählten numerischen Verfahren zur Shack-Hartmann-Analyse berücksichtigt und korrigiert.

Die optischen Fehler des unkorrigierten Teleskops wurden anhand von Pupillenaufnahmen bestimmt. Sie liefern einen Wert für den maximal notwendigen Aktuatorhub zur Korrektur dieser Fehler. Für die optischen Fehler 3. Ordnung wurden die in Tabelle 4.1 wiedergegebenen Werte gemessen. Koma und sphärische Aberration sind unkritisch. Die sphärische Aberration kann durch die Aktuatoren ausgeglichen werden, sie kommt zum Teil aber auch durch eine Fehlstellung des Sekundärspiegels zustande. Die Koma kann bis auf einen Rest, der dem ungestellten Hauptspiegel zuzuordnen ist, durch Bewegen des Sekundärspiegels beseitigt werden. Anlass zur Sorge bereitet

allerdings der große Astigmatismus, der bei einem maximalen Aktuatorhub von $20 \mu\text{m}$ nur knapp ausgeglichen werden kann.

Astigmatismus	$(19,3 \pm 0,8) \mu\text{m}$
Koma	$(26,9 \pm 9,5) \mu\text{m}$
sphärische Aberration	$(1,20 \pm 0,09) \mu\text{m}$

Tabelle 4.1: Astigmatismus, Koma und sphärische Aberration des HPT

Die Koma kommt hauptsächlich durch leichte Fehlstellung des M2 zustanden, der wegen fehlender Mittenmarkierung nicht exakt mittig positioniert werden konnte. Die sphärische Aberration kommt teils durch die Fehlstellung des M2, teils durch den Hauptspiegel zustanden. Der Astigmatismus muss mit Hilfe der Hauptspiegelaktuatoren korrigiert werden. Ein maximaler Aktuatorhub von $20 \mu\text{m}$ reicht knapp aus.

Sowohl in Bochum, als auch in Chile konnte ein Positionierungsmodell mit einfachen harmonischen Funktionen aufgestellt werden. Bedingt durch Aufstellungsfehler beträgt die anfängliche Positioniergenauigkeit 1 bis 2 Grad. Die als Wissenschaftskamera verwendete ST9 hat einen Bildfeldradius von 3 Bogenminuten. Um die Positionierung schrittweise zu verbessern, ist es zunächst notwendig, mit einfachen Methoden ein Modell zu erstellen, das es erlaubt, die Position eines Zielsterns auf 3 Bogenminuten genau zu treffen. Danach lässt sich mit Hilfe der Kamera das Positionierungsmodell weiter verbessern. Das während der Tests in Bochum erstellte Modell erreicht eine Genauigkeit von 3 Bogenminuten, entspricht also der für den Kameraeinsatz erforderlichen Genauigkeit. Auf Grund der Encoderdrift ist die Genauigkeit des Modells für Chile noch unbekannt, dürfte aber nicht wesentlich darüber liegen. Für ein verbessertes Modell sind weitere Messungen ohne Encoderdrift erforderlich. Ziel weiterführender Messungen ist dann eine Verbesserung des Positionierungsmodells auf deutlich unterhalb 1 Bogenminute, idealerweise im einstelligen Bogensekundenbereich.

4.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden erstmals Sternaufnahmen mit dem HPT gemacht und ausgewertet. Vor einer Aufnahme des regulären Beobachtungsbetriebes sind jedoch noch weitere Messungen durchzuführen. Das Positionierungsmodell ist nach Beseitigung der Encoderdrift zu verfeinern, die optischen Fehler sind anhand von Pupillenaufnahmen erneut zu vermessen, insbesondere der Astigmatismus des ungestellten Hauptspiegels sollte genau bestimmt werden. Parallel dazu sollten die optischen Fehler mit Hilfe der Shack-Hartmann-Analyse berechnet und die Ergebnisse mittels aus Pupillenaufnahmen gewonnenen Werten verglichen werden.

Die Einflussfunktionen der Hauptspiegelaktuatoren müssen vermessen und in die Programme zur Shack-Hartmann-Analyse eingebaut werden. Sind sie bekannt, sollte versucht werden, ob die in dieser Arbeit vorgeschlagene direkte Korrektur des Hauptspiegels nicht schneller zum Ziel führt.

Eine optimale Nachführungskorrektur erfordert die Trennung von Positionierungsfehlern am Himmel (Azimut und Elevation oder auch Rektaszension und Deklination) und Nachführungsfehlern in der zur Kompensation der Bildfelddrehung eingesetzten Polarisationsbewegung des HPT. Mit Hilfe der Nachführungskamera lassen sich Positionierungsfehler und Fehler bei der Kompensation der Bildfelddrehung nur dann voneinander trennen, wenn zwei Quellen gleichzeitig ausgewertet werden. Ist nur eine geeignete Quelle im Bildfeld der Kamera, ist eine Trennung nicht mehr möglich. Beseitigen lässt sich dieses Manko durch eine einfache Weitfeldkamera, die an der Seite des

HPT montiert wird und deren Blickrichtung einen großen Winkel zur optischen Achse des HPT hat (40 bis 60 Grad).

Die Lösung, auf der Instrumentenplattform Klappen zu verwenden, um zwischen Referenz- und Beobachtungsblende umzuschalten, hat sich als nicht optimal erwiesen. Der Mechanismus erfordert große Schaltströme und zudem ein aktives Halten der Klappen durch einen Elektromagneten. Versuche mit Permanentmagneten erwiesen sich als unbefriedigend. Entweder wurden die Blendenklappen nicht zuverlässig gehalten, oder die erforderlichen Schaltströme wurden zu groß. Wünschenswert wäre eine Lösung, bei der die Blenden auf einem Schieber angebracht sind, der durch einen Motor in die entsprechende Position gebracht werden kann. Die Positionierung der Blenden entlang der optischen Achse (gemeinsame Fokusposition) sowie senkrecht zur Schieberbewegung sollte durch Mikrometerschrauben möglich sein.

Aufgrund der vorhergesagten guten Abbildungsqualität und der Polarisationsseigenschaften des HPT sollten Weitfeldaufnahmen in mehreren Filtern sowie Polarisationsstudien Vorrang haben. Ein bedeutendes zusätzliches Instrument wird der in Kürze fertiggestellte Echelle-Spektrograph sein. Dadurch könnte der wichtigste Einsatz des HPT, im Zusammenspiel mit weiteren Monitor-Teleskopen, bei der Spektroskopie liegen. Die Monitor-Teleskope suchen den Himmel nach variablen Objekten ab, deren Natur dann mit Hilfe eines am HPT aufgenommenen, hochaufgelösten Spektrums näher bestimmt wird. Zu nennen sind hier insbesondere die beiden VYSOS-Teleskope¹, von denen eines auf Hawaii und eines gleich neben dem HPT steht. Das zur Steuerung des HPT eingesetzte ACS-Softwarepaket erlaubt es, vom VYSOS Beobachtungsprogramm direkt auf das Beobachtungsprogramm des HPT einzuwirken, wenn das VYSOS-Teleskop ebenfalls an ACS angebunden wird.

Eine reizvolle Aufgabe für die Zukunft besteht darin, die Daten der robotisch arbeitenden VYSOS-Teleskope automatisch auszuwerten und nach interessanten Objekten zu durchsuchen, etwa mögliche extrasolare Planetentransits. Ob es sich bei dem gefundenen Kandidaten dann tatsächlich um einen Planetentransit handelt, kann letztendlich nur durch ein Spektrum entschieden werden, wie es am HPT gewonnen werden kann. Wie im letzten Abschnitt dargestellt, ließe die Aufnahme von Spektren interessierender Objekte durch eine Kopplung beider Teleskope automatisieren.

¹VYSOS = Very Young Stellar Object Survey

Anhang A

Bildfehlertheorie

Hier soll nur eine kurze Darstellung der wesentlichen Elemente der Bildfehlertheorie gegeben werden. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in der Literatur, etwa Wilson (2004) und Max Born (1965).

In einem Koordinatensystem mit dem Ursprung im Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene kann jede Oberfläche eines zentrierten optischen Systems durch die Gleichung

$$z = \frac{c}{2}y^2 + a_1y^4 + a_2y^6 + \dots \quad (\text{A.1})$$

dargestellt werden. Darin ist $c = 1/r$ und r der Krümmungsradius der Fläche und die a_i sind Konstanten. Diese Gleichung lässt sich ebenfalls als Form einer Wellenfront auffassen. Ein idealer Bildpunkt kommt durch eine sphärische Wellenfront zustande. Fasst man die Reflexion als Spezialfall der Refraktion auf, so gilt Snellius Brechungsgesetz:

$$n' \sin i' = n \sin i$$

Die Reihenentwicklung des Sinus führt auf

$$n' \left(i' - \frac{i'^3}{3!} + \frac{i'^5}{5!} \dots \right) = n \left(i - \frac{i^3}{3!} + \frac{i^5}{5!} \dots \right) \quad (\text{A.2})$$

Berücksichtigt man nur den ersten Term der Entwicklung, so führt dies zur Gaußschen Optik im paraxialen Bereich. Die Berücksichtigung des nächsten Terms führt zur Bildfehlertheorie 3. Ordnung mit den 5 Bildfehlern sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus, Bildfeldkrümmung und Verzerrung.

A.1 Hamiltonfunktion und Seidelkoeffizienten

Ausgehend von der Symmetrie eines zentrierten optischen Systems bezüglich seiner optischen Achse publizierte Hamilton 1833 eine Analyse zur Form der die Wellenfrontfehler beschreibenden Funktion. Diese Hamiltonfunktion¹ hängt nur von 3 Parametern ab: dem azimuthalen Winkel ϕ , dem normalisierten Aperturradius ρ (1 am Rand) und dem normalisierten Feld σ (1 auf dem Rand). Hamilton zeigte, dass die Wellenfrontfehler auf Grund der Symmetrie nur von

$$\rho^2, \sigma^2, \rho\sigma \cos \phi$$

¹Die Hamiltonfunktion der Optik hat nichts mit der gleichnamigen Funktion der theoretischen Mechanik zu tun.

abhängen kann. Seine Funktion kann geschrieben werden als

$$W(\rho, \sigma, \phi) = \sum_{(l+n)} k_{(m+n),n} \sigma^{(l+n)} \rho^{(m+n)} \cos^n \sigma \quad (\text{A.3})$$

Darin sind l , m positive, gerade Zahlen oder Null, n ist positiv oder Null. Die Ordnung des jeweiligen Wellenfrontfehlers ist definiert als

$$N_H = (\text{Summe der Ordnung von } \sigma \rho) - 1 \quad (\text{A.4})$$

Die Hamiltonfunktion ist von großem theoretischem Wert, sie wird in der Praxis im direkten Nutzen aber selten gebraucht, weil die Koeffizienten k unbekannt sind und nicht durch Designparameter ausgedrückt werden können. Dieses Problem wurde von Seidel gelöst. Für optisch aktive Flächen ν sei

η, η'	Höhe des Hauptstrahls im Objekt- bzw. Bildraum
u, u'	Öffnungswinkel im Objekt- bzw. Bildraum
y_ν	Höhe des paraxialen Strahls in der Hauptebene
$\frac{A_\nu}{A_\nu}$	$n' i'_\nu = n i_\nu$ Snellius Gesetz für paraxiale Strahlen
$\frac{\bar{A}_\nu}{\bar{A}_\nu}$	$n' i'_{pr\nu} = n i_{pr\nu}$ Snellius Gesetz für paraxiale Strahlen
$\Delta \left(\frac{u}{n} \right)_\nu$	$\left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right)_\nu$ der aplanatische Parameter
H_ν	$n'_\nu u'_\nu \eta'_\nu = n_\nu u_\nu \eta_\nu$ die Lagrange-Invariante
$(p_c)_\nu$	$c_\nu \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right)_\nu = c_\nu \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_\nu$ die Petzval-Summe der Oberfläche ν
τ_ν	$c_\nu^3 (n'_\nu - n_\nu) b_{s\nu} y_\nu^4$ der Einfluss der asphärischen Form im Sinne der Schwarzschild-Konstante $b_{s\nu}$
$(HE)_\nu$	$\left(\frac{y_{pr}}{y} \right)_\nu$ der Effekt der Pupillenposition in Bezug auf die Oberfläche ν

Die Koeffizienten dritter Ordnung der Hamiltonfunktion lassen sich dann wie folgt durch die Seidel-Koeffizienten ausdrücken:

sphärische Aberration	$\Sigma S_I = -[\Sigma_\nu a^2 y \Delta(u/n)] + \Sigma_\nu \tau$
Koma	$\Sigma_{II} = -[\Sigma_\nu A \bar{A} y \Delta(u/n)] + \Sigma_\nu (HE) \tau$
Astigmatismus	$\Sigma_{III} = -[\Sigma_\nu \bar{A}^2 y \Delta(u/n)] + \Sigma_\nu (HE)^2 \tau$
Feldkrümmung	$\Sigma_{IV} = -[\Sigma_\nu H^2 P_c] + \Sigma_\nu (HE) \tau$
Verzerrung	$\Sigma_V = -[\Sigma_\nu (\bar{A}/A) (H^2 P_c + \bar{A}^2 y \Delta(u/n))] + \Sigma_\nu (HE)^3 \tau$

(A.5)

Mit Hilfe dieser Koeffizienten und nicht normierten Strahlhöhen y_1, y_{m1} (auf dem Rand der Apertur) lässt sich die Funktion für Wellenfrontfehler dritter Ordnung wie folgt schreiben:

$$W'_3(y_1, \eta') = \frac{1}{8} \left(\frac{y_1}{y_{m1}} \right)^2 \Sigma S_I + \frac{1}{2} \left(\frac{y_1}{y_{m1}} \right)^3 \left(\frac{\eta'}{\eta'_m} \right) \Sigma S_{II} \cos \phi + \frac{1}{4} \left(\frac{y_1}{y_{m1}} \right)^2 \left(\frac{\eta'}{\eta'_m} \right)^2 \left[(3 \Sigma S_{III} + \Sigma S_{IV}) \cos^2 \phi + (\Sigma S_{III} + \Sigma S_{IV}) \sin^2 \phi \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{y_1}{y_{m1}} \right) \left(\frac{\eta'}{\eta'_m} \right)^3 \Sigma S_V \cos \phi \quad (\text{A.6})$$

A.2 Zernike-Polynome

Die Hamiltonfunktion ist nichtlinear und insbesondere nicht orthogonal. 1934 publizierte Zernike ein nach ihm benanntes System von orthogonalen Polynomen, die einzeln eine optimale Anpassung der Daten nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch ein Polynom des Grades n

darstellen. Auf einem Einheitskreis genügen sie der Orthogonalitätsbedingung

$$\int_{x^2+y^2 \leq 1} \int V_\alpha^*(x, y) V_\beta(x, y) dx dy = A_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta}$$

mit den Normierungskonstanten $A_{\alpha\beta}$ und dem Kroneckersymbol $\delta_{\alpha\beta}$. Ebenso wie die Hamiltonfunktion müssen die Lösungen axialsymmetrisch sein. Ist ρ wieder der normierte Pupillenradius und ϕ der azimutale Winkel, so müssen die Lösungen vom allgemeinen Typ

$$V(\rho \cos \phi, \rho \sin \phi) = R(\rho) e^{il\phi} \quad n \geq |l|$$

sein. Wenn V vom Grade n in den Variablen x und y ist, so ist $R(\rho)$ ebenfalls vom Grade n und enthält keine Terme vom Grad kleiner $|l|$. Emil Wolf zeigte, dass diese Funktionen normiert sind und wie folgt ausgedrückt werden können:

$$V_n^{\pm m}(\rho \cos \phi, \rho \sin \phi) = R_n^m(\rho) e^{\pm im\phi} \quad m = |l|, 0$$

Mit der Normierung $R_n^\pm(1) = 1$ folgt die explizite Form der radialen Polynome:

$$R_n^\pm(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{1}{2}(n-m)} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{(n-2s)} \quad (\text{A.7})$$

Die folgende Tabelle enthält die Zernike-Polynome nach sin- und cos-Termen getrennt bis zum Grad 3.

Nr	n	m	$n+m$	Polynom	klassischer Wellenfrontfehler
0	0	0	0	1	Konstante
1	1	1	2	$\rho \cos \phi$	Verkippung
2	1	1	2	$\rho \sin \phi$	Verkippung
3	2	0	2	$2\rho^2 - 1$	Defokus
4	2	2	4	$2\rho^2 \cos 2\phi$	Astigmatismus 3. Ordnung
4	2	2	4	$2\rho^2 \sin 2\phi$	Astigmatismus 3. Ordnung
6	3	1	4	$2(3\rho^2 - 1)\rho \cos \phi$	Koma 3. Ordnung
7	3	1	4	$2(3\rho^2 - 1)\rho \sin \phi$	Koma 3. Ordnung
8	4	0	4	$26\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	sphärische Aberration

Tabelle A.1: Zernike-Polynome und klassische Bildfehler bis zur 3. Ordnung

Mit den Zernike-Koeffizienten a_i lässt sich der Wellenfrontfehler dann darstellen als

$$W' = \sum_i a_i Z_i \quad (\text{A.8})$$

Diese Zernike-Polynome sind auf einem vollständigen Einheitskreis definiert, die Pupille eines Teleskops weist jedoch eine zentrale Abschattung durch den Sekundärspiegel auf. Auf einer solchen Pupille sind die Polynome nicht mehr orthogonal. Davon betroffen ist nur der Radialteil der Polynome. Ist ϵ die in Tabelle 3.1 definierte Abschattungsrate, so lassen sich durch einen Gram-Schmid-Orthonormalisierungsprozess annuläre Zernike-Polynome berechnen, die auf einer Pupille mit Abschattung orthogonal sind. Die Orthonormalitätsbedingung lautet dann:

$$\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\rho=\epsilon}^1 Z_{kl}(\rho, \epsilon, \phi) Z_{nm}(\rho, \epsilon, \phi) \rho d\rho d\phi = (1 - \epsilon^2) \delta_{kn} \delta_{lm}$$

Nr	Polynom	klassischer Wellenfrontfehler
1, 2	$\frac{2r}{\sqrt{1+\epsilon^2}}$	Verkippung
3	$\sqrt{3} \frac{2r-(1+\epsilon^2)}{(1-\epsilon^2)}$	Defokus
4, 5	$\frac{\sqrt{6r^2}}{\sqrt{1+\epsilon^2+\epsilon^4}}$	Astigmatismus 3. Ordnung
6, 7	$\sqrt{8} \frac{3r^3(1+\epsilon^2)-2r(1+\epsilon^2+\epsilon^4)}{(1-\epsilon^2)\sqrt{(1+\epsilon^2)(1+4\epsilon^2+\epsilon^4)}}$	Koma
3	$\sqrt{5} \frac{6r^4-6r^2(1+\epsilon^2)+(1+\epsilon^2+\epsilon^4)}{(1-\epsilon^2)^2}$	sphärische Aberration

Tabelle A.2: Radialteil annularer Zernike-Polynome

Tabelle A.2 enthält den modifizierten Radialteil.

Die Orthogonalität der annularen Zernike-Polynome stellt sicher, dass die Koeffizienten unabhängig voneinander und unabhängig von der Gesamtzahl der verwendeten Polynome angepasst werden können.

Anhang B

Bildanhang

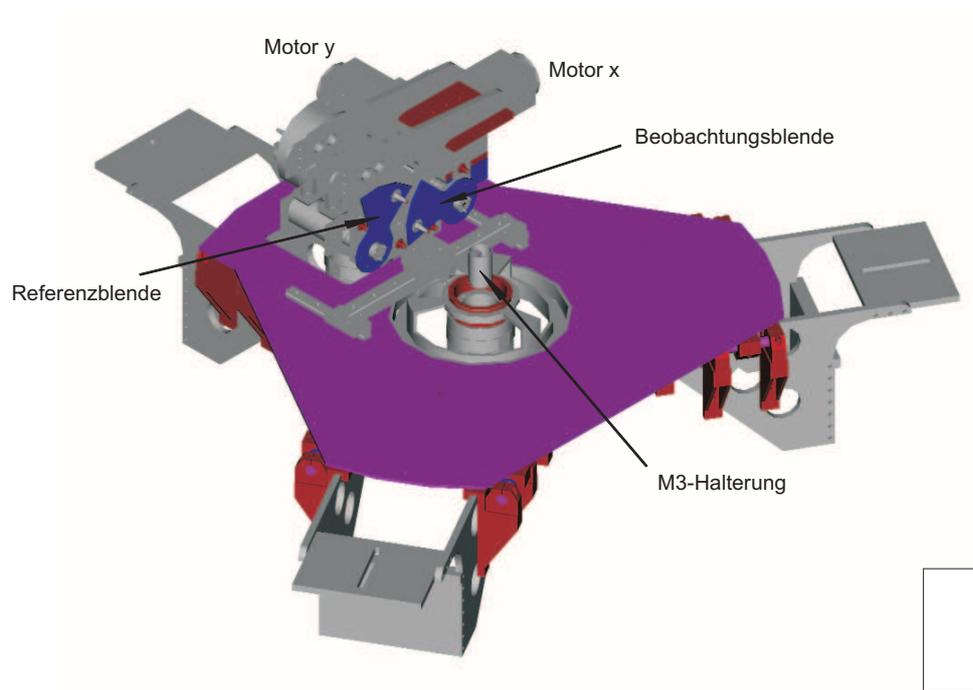


Abbildung B.1: Instrumentenplattform in isometrischer Darstellung

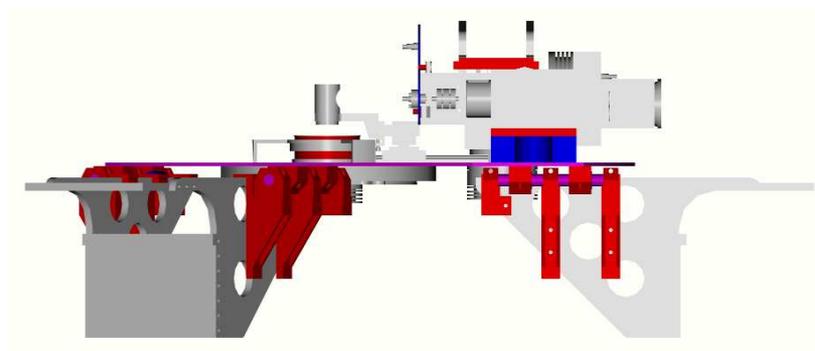


Abbildung B.2: Instrumentenplattform von der Seite gesehen

Anhang C

Tabellenanhang

C.1 Geometrie und Positionsdaten der Kardanpunkte des HPT

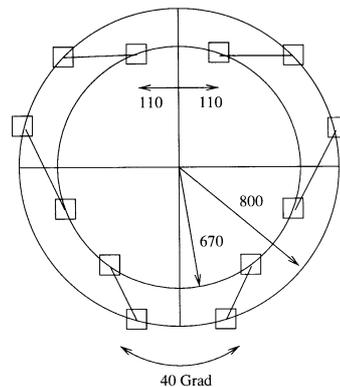


Abbildung C.1: Geometrie und Positionen der Kardanpunkte der Hauptmontierung. Die unteren Kardane sind im Außenkreis, die oberen im Innenkreis. Quelle: Technische Zeichnung Vertex Antennentechnik

Das HPT hat keinen festen, sondern einen beweglichen Fangspiegel, der sich 20 mm um seinen mittleren Abstand bewegen lässt. Die weiteren, vom Scheitelabstand abhängigen optischen Parameter sind also variabel. Der jeweils für den minimalen und maximalen Scheitelabstand gültige Wert ist in Tabelle 3.2 angegeben.

i	unten		oben	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	751.754	273.616	425.717	517.364
2	-138.919	787.846	235.191	627.364
3	-612.836	514.230	-660.908	110.000
4	-612.836	-514.230	-660.908	-110.000
5	-138.919	-787.846	235.191	-627.364
6	751.754	-273.616	425.717	-517.364

Tabelle C.1: Komponenten Kardanvektoren \vec{u}_i und \vec{o}_i . Gemessen im jeweils fest mit der Ebene verbundenen System mit dem Ursprung im Mittelpunkt der jeweiligen Kardanebene. In diesen System sind die z-Komponenten einheitlich 0.

i	unten		oben	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	800.000	0.000	205.548	91.515
2	400.000	692.820	182.029	132.252
3	-400.000	692.820	-182.029	132.252
4	-800.000	0.000	-205.548	91.515
5	-400.000	-692.820	-23.519	-223.767
6	400.000	-692.820	23.519	-223.767

Tabelle C.2: Komponenten der Kardanvektoren der Sekundärspiegelmontierung

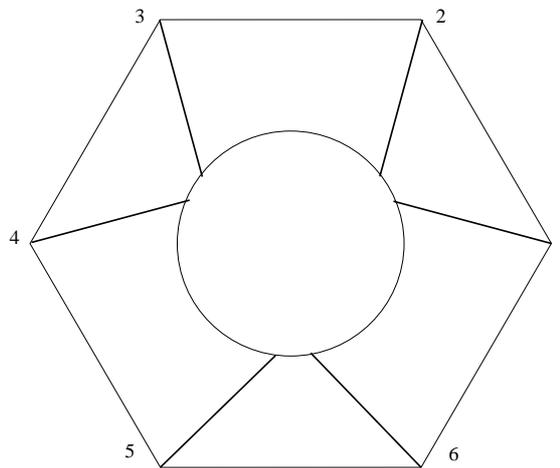


Abbildung C.2: Geometrie und Positionen der Kardanpunkte der Montierung des Sekundärspiegels. Die unteren Kardanen sind im Außenkreis, die oberen im Innenkreis. Der Winkel zwischen den unteren Kardanpunkten beträgt jeweils 60 Grad. Der Mittelpunkt zwischen 2 oberen Kardanen ist um 30 Grad gegen die unteren Kardanen versetzt. Die Beine laufen oben nicht in einem Punkt zusammen, sondern weichen um ± 6 Grad ab. Die unteren Kardanen liegen auf einem Kreis mit 800 mm, die oberen auf einem Kreis mit 225 mm. Auf Grund des Fehlens genauer Konstruktionsunterlagen ist der obere Kardanradius sowie der Deviationswinkel von ± 6 Grad ungenau.

Datum	Stern	Sternzeit	h							
			ref Ra	ref Dec	cmd Az	cmd El	ref Az	ref El	offset Az	offset El
21.02.	Betelgeuse	6:21:56	5:55:11	7:24:25	-9:44:49.64	57:25:41.25	-12:21:27.54	57:20:40.73	2:36:37.90	0:05:00.51
	Bellatrix	6:31:04	5:25:08	6:20:59	-26:53:15.46	55:10:22.97	-29:33:28.59	55:08:32.16	2:40:13.13	0:01:50.81
	Rigel	6:44:25	5:14:33	-8:12:06	-53:48:21.06	63:01:00.28	-56:25:47.58	63:00:32.37	2:37:26.52	0:00:27.91
	Saiph	6:59:36	5:47:46	-9:40:11	-49:22:30.41	67:18:11.25	-51:58:48.41	67:18:41.11	2:36:17.99	-0:00:29.86
	Arnep	7:18:49	5:32:44	-17:49:20	-77:11:31.07	64:25:34.85	-79:49:31.32	64:25:08.67	2:38:00.25	0:00:26.19
	Phaet	7:34:56	5:39:39	-34:04:27	-114:45:41.21	63:14:58.42	-117:26:22.26	63:15:46.08	2:40:41.05	-0:00:47.66
	Canopus	7:48:06	6:23:57	-52:41:57	-153:12:52.19	57:41:07.56	-155:57:57.15	57:43:17.14	2:45:04.96	-0:02:10.97
	Suhail	8:15:45	8:09:32	-47:20:12	-174:24:53.12	67:11:07.94	-177:16:34.74	67:13:59.37	2:51:41.63	-0:02:51.42
	Avior	8:58:05	8:22:31	-59:30:35	-169:24:19.63	54:28:46.72	-172:13:57.91	54:32:46.03	2:49:38.28	-0:03:59.31
	Beta 9	18:37	9:13:12	-69:43:01	-176:29:23.38	44:48:06.34	-179:20:15.87	44:53:10.39	2:50:52.49	-0:05:04.05
	Vel Mu	9:36:14	10:46:46	-49:25:12	158:26:56.70	61:36:30.53	155:30:27.73	61:37:43.67	2:56:28.97	-0:01:13.14
22.02.	Sirius	6:25:02	6:45:29	-16:43:24	34:11:14.19	80:54:50.64	32:13:17.52	80:47:24.67	1:57:56.66	0:07:25.97
	Saiph	6:48:19	5:47:46	-9:40:11	-44:07:10.89	69:14:23.89	-46:36:15.52	69:15:24.77	2:29:04.63	-0:01:00.88
	Rigel	7:47:39	5:14:33	-8:12:06	-69:48:46.01	50:00:19.70	-72:27:51.05	49:59:44.92	2:39:05.04	0:00:34.78
	Bellatrix	7:58:19	5:25:08	6:20:59	-52:44:13.07	41:35:36.72	-55:22:36.85	41:33:28.75	2:38:23.78	0:02:07.97
	Betelgeuse	8:07:25	5:55:11	7:24:25	-46:46:05.41	44:38:03.43	-49:25:49.19	44:36:03.29	2:39:43.78	0:02:00.13
	Alhena	8:22:12	6:37:43	16:23:57	-31:46:55.54	41:47:22.04	-34:28:10.84	41:44:42.05	2:41:15.31	0:02:38.06
	Procyon	8:37:42	7:39:18	5:13:23	-24:45:01.80	57:00:45.74	-27:24:49.68	56:58:25.42	2:39:47.88	0:02:20.33
	Saturn	8:55:45	9:33:31	15:53:38	16:37:26.53	48:33:05.12	13:46:01.75	48:29:00.08	2:51:24.77	0:04:05.05
	Regulus	9:11:02	10:08:22	11:58:02	25:26:17.44	50:55:26.03	22:33:31.04	50:51:28.84	2:52:46.41	0:03:57.20
	Alphard	9:44:07	9:27:35	-8:39:31	-12:00:19.13	73:37:37.59	-14:36:16.02	73:34:57.11	2:35:56.89	0:02:40.48
	Lambda 41	10:28:24	10:10:35	-12:21:16	-17:12:03.02	77:05:48.37	-19:47:16.14	77:03:14.11	2:35:13.12	0:02:34.26
	Gienah	10:45:50	12:15:49	-17:32:31	78:40:45.18	68:01:14.76	75:44:57.45	67:53:41.96	2:55:47.73	0:07:32.80
	Algorab	10:51:57	12:29:52	-16:30:57	78:12:17.93	65:52:07.76	75:13:47.75	65:44:56.83	2:58:30.19	0:07:10.94
	Beta 9	10:59:48	12:34:23	-23:23:48	94:45:36.87	68:29:47.38	91:43:38.03	68:23:43.26	3:01:58.84	0:06:04.12
	Minkar	11:07:37	12:10:08	-22:37:11	88:24:28.31	75:40:20.90	85:19:38.78	75:33:18.26	3:04:49.52	0:07:02.64
	Spica	11:19:32	13:25:12	-11:09:41	74:17:37.27	57:28:01.31	71:21:27.36	57:20:39.71	2:56:09.91	0:07:21.60
	Menkent	11:37:25	14:06:41	-36:22:16	122:11:37.59	56:08:04.53	119:11:05.41	56:00:47.48	3:00:32.18	0:07:17.05
Gacrux	11:55:37	12:31:10	-57:06:50	174:11:23.19	56:50:31.43	171:10:25.47	56:51:56.48	3:00:57.72	-0:01:25.05	
Mimosa	12:02:46	12:47:43	-59:41:19	173:22:38.10	54:01:21.96	170:21:32.14	54:03:03.51	3:01:05.97	-0:01:41.55	
Acrux	12:31:05	12:26:31	-63:07:21	-176:13:09.73	51:26:11.55	-179:10:13.19	51:28:40.12	2:57:03.46	-0:02:28.57	
Delta	12:36:51	12:15:09	-58:44:56	-172:03:49.80	55:36:04.96	-175:00:53.26	55:38:33.53	2:57:03.46	-0:02:28.57	
Beta 9	12:57:08	12:34:23	-23:23:48	-75:55:07.99	84:33:30.24	-78:08:38.49	84:40:06.68	2:13:30.50	-0:06:36.44	

Tabelle C.3: Quellen und Messwerte für das Pointingmodell am OCA, Teil 1

Datum	Stern	Sternzeit	ref Ra	ref Dec	cmd Az	cmd El	ref Az	ref El	offset Az	offset El
28.02.	Sirius	8:20:59	6:45:29	-16:43:24.00	-72:33:56.73	66:18:06.72	-75:08:01.01	66:21:37.05	2:34:04.28	-0:03:30.33
	Rho 15	8:40:05	8:07:33	-24:18:15	-87:00:24.62	82:35:22.19	-89:24:49.05	82:35:28.82	2:24:24.43	-0:00:06.63
01.03.	Asmidiske	8:12:49	7:49:18	-24:51:35.00	-91:45:38.18	84:37:44.41	-94:01:42.92	84:39:19.18	2:16:04.74	-0:01:38.17
	Rho 15	8:18:26	8:07:33	-24:18:15	-81:46:58.55	87:29:39.08	-83:47:08.22	87:30:24.47	2:00:09.68	-0:00:45.39
	Alphard	8:46:19	9:27:35	-8:39:31	36:19:16.87	71:19:36.41	33:27:27.81	71:16:10.65	2:51:49.06	0:03:25.76
	Regulus	9:09:51	10:08:22	11:58:02	25:54:20.55	50:48:46.16	22:59:02.01	50:45:15.86	2:55:18.54	0:03:30.29
	Zosma	9:41:35	11:14:07	20:31:24	31:34:16.15	39:42:01.38	28:30:55.99	39:35:30.49	3:03:20.16	0:06:30.88
	Zosma	9:44:48	11:14:07	20:31:24	30:38:55.88	40:03:44.74	27:38:38.83	39:56:09.12	3:00:17.06	0:07:35.62

Tabelle C.4: Quellen und Messwerte für das Pointingmodell am OCA, Teil 2

Literaturverzeichnis

- Bleul, H.: 2001, *Untersuchung zur Regelung der aktiven Optik des Hexapod-Teleskops*, Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum
- Jürges, T.: 2004, *Entwurf und Realisierung einer Nachführungskorrektur für Teleskope mit mehr als zwei Bewegungsfreiheitsgraden*, Diplomarbeit an der Universität Duisburg - Essen
- K. Pausch, K.-H. S.: 1992, *VDI Berichte 917*, VDI
- Kimmel, N.: 2003, *Realisierung einer aktiven Optik für das Hexapod-Teleskop*, Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum
- Kühlke, D.: 2004, *Optik*, Verlag Harri Deutsch GmbH
- Max Born, E. W.: 1965, *Principles of Optics*, Pergamon Press
- Neisius, B.: 1991, *Dynamische Simulation eines Hexapod-Teleskops unter Berücksichtigung nicht-linearer Reibung in den Antrieben*, Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum
- Panek, R.: 2004, *Das Auge Gottes — Das Teleskop und die lange Entdeckung der Unendlichkeit*, dtv
- Raffin, P. A., Martin, R. N., Huang, Y.-D., Patt, F., Romeo, R. C., Chen, M.-T., and Kingsley, J. S.: 2004, Vol. 5495, pp 159–167, SPIE
- Teichmann, J.: 1985, *Wandel des Weltbildes — Astronomie, Physik und Meßtechnik in der Kulturgeschichte*, rororo
- Vertex: 1993, *Entwicklungsprojekt Hexapod-Teleskop, Endsachbericht*, Vertex Antennentechnik
- von Düsterlohe, A. B.: 2002, *Kinematik, Geometrie und Mathematik des Hexapod Teleskops*, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum
- William H. Press, Saul A. Teukolsky, e. a., *Numerical Recipes in C*
- Wilson, R. N.: 2001, *Reflecting Telescope Optics II*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- Wilson, R. N.: 2004, *Reflecting Telescope Optics I*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

Lebenslauf

Name:

Martin Paegert

Anschrift:

Akademiestr. 34

D-44789 Bochum

Tel.: +49-(0)234-313874

email: map@astro.rub.de

Persönliche Angaben:

Staatsangehörigkeit : Deutsch

Geburtstag : 10. September 1958

Geburtsort : Kamen

Berufliche Tätigkeiten:

2003 – heute : wissenschaftlicher Mitarbeiter am AIRUB

1999 – 2003 : Produktmanager bei der Technidata GmbH, Erfurt

1991 – 1999 : freiberuflicher Projektleiter bei der Gellrich GmbH, später
Laufenberg Labor Informationssysteme GmbH & Co KG

1989 – 1991 : freiberuflicher Projektleiter bei der Gellrich KG, Bochum

1985 – 1988 : freiberuflicher EDV-Berater bei der Thyssengas AG, Duisburg

Ausbildung:

1997 : Diplom in Physik an der Ruhr-Universität Bochum

1979 : Abitur am Städtischen Gymnasium Bergkamen

Sprachkenntnisse:

Deutsch und Englisch : fließend in Wort und Schrift

Danksagung

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle aufrichtig danken.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Rolf Chini, dem ich die Chance verdanke, aus der Industrie in die Astronomie zurückzukehren. Ein glücklicher Zufall führte mich im März 2003 in sein Büro und Prof. Chini nahm sich die Zeit für ein ausführliches Gespräch. Danach ging ich mit dem Angebot und der Überlegung nach Hause, doch noch in der Astronomie zu promovieren. Ohne seine Bereitschaft, auch ungewöhnliche Wege zu gehen und Wiedereinsteigern eine Chance zu geben, wäre es nicht zu dieser Doktorarbeit gekommen. Und ohne seine Tipps, wie man mit einfachen Mitteln zu ersten Beobachtungen und Ergebnissen kommt, hätte die Erstellung der ersten Pointingmodelle erheblich länger gedauert.

Ohne die Bereitschaft meiner Frau Renate, diesen Weg mit mir zu gehen, hätte ich die Überlegung sicher nicht vertieft, sondern wäre in der Industrie geblieben. Sie hat auf manchen Urlaub, Ausflug und schönen Abend verzichten müssen, dies und mehr aber klaglos mitgetragen. Zudem hat sie diese Arbeit von der alten auf die neue Rechtschreibung umgestellt und mit geübtem Blick jeden Fehler gefunden.

Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Theodor Schmidt-Kaler, der sich sofort als Gutachter für diese Doktorarbeit zur Verfügung stellte. Darüber hinaus gilt ihm mein Dank dafür, das Hexapod-Projekt initiiert und den Bau des Teleskops betreut zu haben.

Obwohl er offiziell nicht mit dem Hexapod-Projekt befasst war, hat Prof. Dr. Wolfhard Schlosser das Projekt mit großer Anteilnahme begleitet und hatte stets ein offenes Ohr und stand mir mit seiner großen optischen Erfahrung sowie mit Rat und Tat zur Seite. Ohne seine Hilfe wären die optischen Probleme nur schwer lösbar gewesen und ich wäre im optischen Labor so manches Mal verzweifelt. Für seine Hilfe möchte ich mich besonders herzlich bedanken.

Klaus Weißbauer hat klaglos sämtliche Umkonstruktionen der Plattform und Blendenhalterung entworfen und bei der Werkstatt in Auftrag gegeben. Dafür gebührt ihm mein Dank.

Es mag ungewöhnlich sein, aber ich möchte mich auch bei Dipl. Ing. Annette Chini bedanken, die das Kontrollgebäude des HPT entwarf und die Atacama um ein architektonisches Kunstwerk und ein bewohnbares Schmuckstück bereichert hat. Die Gebäude des VLT sind größer, aber das des HPT ist schöner.

Mein Dank gilt auch Dr. habil. Martin Haas, der diese Arbeit mehrfach Korrektur gelesen hat und der mir mit wertvollen Formulierungshilfen zur Seite stand.

Ohne die freundschaftliche Zusammenarbeit mit Dr. Roland Lemke auch und gerade in schwierigen Phasen des Projektes, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich bedanke mich für viele gemeinsam durchwachte Nächte am Teleskop, anregende wie beruhigende Gespräche, seine Geduld und dafür, immer ein Ohr an der Hardware des Teleskops zu haben und notfalls noch vor dem Frühstück einen Kernel zu kompilieren. Abgesehen davon macht die gemeinsame Arbeit einfach

Spaß. So manche Idee, wie die, einen allgemein einsetzbaren Mount zu schreiben verfolgt mich mit Sicherheit noch weit über diese Promotion hinaus, ich habe sie nur erstmal ruhen lassen.

Obwohl nicht mehr am Astronomischen Institut gilt dies auch für Dipl. Phys. Thomas Jürges. Sämtliche in dieser Arbeit ausgewerteten Fotos entstanden in gemeinsamen Nächten am Teleskop. Dank auch für viele, oft leidenschaftlich, aber immer mit Humor geführte Debatten und - wenn nötig - für kunstgerechtes, gemeinsames Fluchen auf der Suche nach besonders vertrackten Fehlern.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation eigenständig und ohne andere als die angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Bochum, den 15.06.2007

Martin Paegert

