

Aufbau und Test eines neuartigen CCD-Kamerasystems zur Kontrolle der Optik eines H.E.S.S.-Cherenkovteleskops

Diplomarbeit

vorgelegt

von

Jan L. R. Dreyling-Eschweiler



Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hamburg
2. März 2010

Gutachter: Prof. Dr. Dieter Horns
Prof. Dr. Caren Hagner

Inhalt

Kurzfassung	iii
Abstract (in English)	iv
1 Einleitung	1
2 Die H.E.S.S.-Teleskope	5
2.1 Übersicht	5
2.2 Optik der H.E.S.S.-Teleskope	8
2.3 Spiegeljustierung der H.E.S.S.-Teleskope	12
2.3.1 Methode	12
2.3.2 Komponenten	13
2.3.3 Ablauf und Status	16
2.3.4 Abbildungsfunktion	21
2.4 Pointing der H.E.S.S.-Teleskope	25
2.5 CCD-Kameras der H.E.S.S.-Teleskope	27
2.5.1 LidCCD	28
2.5.2 SkyCCD	33
2.5.3 Ansteuerung der CCD-Kameras	34
3 Ein neuartiges CCD-Kamerasystem	39
3.1 Motivation und Verbesserungen der LidCCDs	39
3.2 Konzept und Komponenten des CCD-Kamerasystems	43
3.2.1 Der MiniPC	44
3.2.2 Die USB-Kamera	46
3.2.3 Die Ansteuerung des CCD-Kamerasystems	48
4 Aufbau und Tests des CCD-Kamerasystems	51
4.1 Schnittstelle der USB-Kamera	52
4.2 Testmessungen der USB-Kamera	56
4.2.1 Messungen und Ergebnisse mit Objektiv	56
4.2.2 Messungen und Ergebnisse zum Kühlverhalten	63
4.2.3 Messungen und Ergebnisse zum Langzeitverhalten	67
4.2.4 Messungen und Ergebnisse des CCD-Chips	70
4.3 Integration des CCD-Kamerasystems für H.E.S.S.	79
4.3.1 Implementierung der Hardware des CCD-Kamerasystems	80
4.3.2 Ansteuerung des CCD-Kamerasystems	85

5	Zusammenfassung und Ausblick	89
Anhang		93
A	Dateiaufbau der CCD-Kameraschnittstelle	93
B	Methoden der CCD-Kameraschnittstelle	95
Literaturverzeichnis		100
Tabellenverzeichnis		104
Abbildungsverzeichnis		105

Kurzfassung

Aufbau und Test eines neuartigen CCD-Kamerasystems zur Kontrolle der Optik eines H.E.S.S.-Cherenkovteleskops

In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau und der Test eines neuartigen CCD-Kamerasystems beschrieben. Zunächst wird die Bedeutung in der Verwendung von CCD-Kameras für ein Verständnis der Optik der H.E.S.S.-Teleskope aufgezeigt und gleichzeitig geprüft, was für Verbesserungen für die momentane Installation möglich sind. In diesem Zuge wurde ein neuartiges CCD-Kamerasystem entwickelt, welches in der Funktionalität und der verwendeten Technik eine Neuerung zu den CCD-Kameras bei H.E.S.S. darstellt.

Das CCD-Kamerasystem besteht aus zwei Hardwarekomponenten: einer CCD-Kamera zusammen mit einem Rechner. Der hier verwendete Rechner ist ein kompakter, für den Außeneinsatz konzipierter Industrie-PC, der die Kommunikation zwischen CCD-Kamera und der darauf zugreifenden Software regelt. Dafür wurde für die interne Kommunikation – zwischen Rechner und Kamera per USB-Protokoll – eine Schnittstelle in C++ geschrieben und getestet. Gleichzeitig wurde die Leistungsfähigkeit der CCD-Kamera gemessen. Desweiteren wurde die externe Kommunikation – zwischen Kamerasystem und Software per Ethernet-Protokoll – über eine Server-Client-Architektur getestet. Somit wurde das Kamerasystem für eine mögliche Integration für H.E.S.S. vorbereitet.

Abstract

Development and Testing of a novel CCD Camera Sytem for Monitoring the Optics of a H.E.S.S. Cherenkov Telescope

This thesis presents the development and testing of a novel CCD camera system. In the first instance, the application of CCD cameras for a better understanding of the H.E.S.S. telescope optics was investigated. At the same time, possible improvements for the current set-up were considered. To this end, a novel CCD camera system was developed, which provides an innovation to the functions and technology of the current CCD cameras of H.E.S.S..

The novel CCD camera system consists of two components: A CCD camera connected to a computer. The computer used is more compact, portable unit designed for industry, which controls the communication between camera and software. For the internal communication between computer and camera via the USB port a new interface in C++ was developed and tested. Simultaneously, the efficiency of the CCD camera was monitored. Finally, the external communication via the Ethernet protocol between the camera system and the software was examined using a server-client-architecture. As a result, the innovative camera system was prepared for a possible integration into H.E.S.S..

Kapitel 1

Einleitung

*„Technik ist die Anstrengung,
Anstrengungen zu ersparen.“*
(Josié Ortega y Gasset)

Im Jahr 1969 entwarfen Willard S. Boyle und George E. Smith ein Halbleiterbauteil, welches die Welt revolutionieren sollte. Ihre Erstveröffentlichung über diesen Entwurf beginnt mit den Worten (Boyle & Smith 1970):

„A new semiconductor device concept has been devised which shows promise of having wide application. The essence of the scheme is to store minority carriers (or their absence) in a spatially defined depletion region (potential well) at the surface of a homogeneous semiconductor and to move this charge about the surface by moving the potential minimum.“

Dieses Prinzip der Ladungsspeicherung und dessen kontrollierte Bewegung sollte eigentlich zunächst nur der Datenspeicherung dienen. Wenig später stellte sich jedoch heraus, dass diese Bauteile zudem lichtempfindlich¹ sind. Somit kann man ein zur eingestrahnten Lichtmenge proportionales Ladungspaket auf einem definierten räumlichen Bereich speichern. Ordnet man diese Bereiche nach einem Raster an, hat man eine Möglichkeit geschaffen, ein Abbild in Bildelementen (Pixel) des einfallenden Lichts zu erhalten und dieses digital abzuspeichern. Damit war das Halbleiterbauteil mit dem Namen *Charged Coupled Device* (kurz: CCD) erfunden, wofür Boyle und Smith 2009 den Nobelpreis für Physik erhielten.

Auch wenn Boyle und Smith anfangs noch nicht an die digitale Bildbearbeitung dachten, sollten sie dennoch Recht behalten, dass dieses Bauteil vielsprechend für einen großen Anwendungsbereich sein kann (siehe Zitat): Digitalkameras, Videokameras, Webcams, Mobiltelefone mit eingebauter Kamera, Scanner, Barcodeleser

¹Damit ist im Allgemeinen der photoelektrische Effekt gemeint, nach dem ein gebundenes Elektron ein Photon einer bestimmten Wellenlänge bzw. Energie absorbieren kann. Dadurch verändert sich nach dem Energieerhaltungssatz der energetische Zustand des Elektrons. In diesem Fall können Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband des Halbleiters angeregt werden, falls das einstrahlende Photon eine Energie größer der Bandlücke hat. Dadurch entstehen sogenannte Elektron-Loch-Paare im Halbleiter.

usw. haben sich inzwischen in unserem Alltag manifestiert und diesen zusammen mit der Gesamtheit der digitalen Technik revolutioniert.² Zudem gab es durch die digitale Bildverarbeitung in den letzten Jahren für Forschung und Wissenschaft – und nicht zuletzt für das Gebiet der Astronomie – einen enormen Erkenntniszuwachs. Man denke zum Beispiel nur an die hochauflösenden Bilder des Hubble-Weltraumteleskops.

Unser physikalisches Verständnis über den Mikrokosmos hilft in diesem Fall unserem Verständnis über den Makrokosmos: Mit den Technologien und Techniken, die der Mensch auf einer funktionierenden physikalischen Theorie entwickelte, werden neue Gebiete für neue Theorien erschlossen. Die Astronomie hat es dadurch in den letzten Jahren geschafft, immer tiefer in das Weltall zu blicken – man denke zum Beispiel an die Beobachtungen zur Hintergrundstrahlung. Aber es konnten auch astronomische Fenster geöffnet werden, durch die man Bereiche der elektromagnetischen Strahlung zum ersten Mal systematisch beobachtet.

Für die bodengestützte Beobachtung, sowie für die Beobachtung mittels Satelliten im Orbit, wurden Instrumente entwickelt, die γ -Strahlung³ messen können. Das sogenannte Gebiet der γ -Astronomie hat dadurch in den letzten Jahren eine Vielzahl an Strahlungsquellen neu entdecken können – beziehungsweise Quellen bestätigen können, die in einem anderen Wellenlängenbereich bereits entdeckt wurden. Diese rasante Entwicklung ist in Abbildung 1.1 zu erkennen.

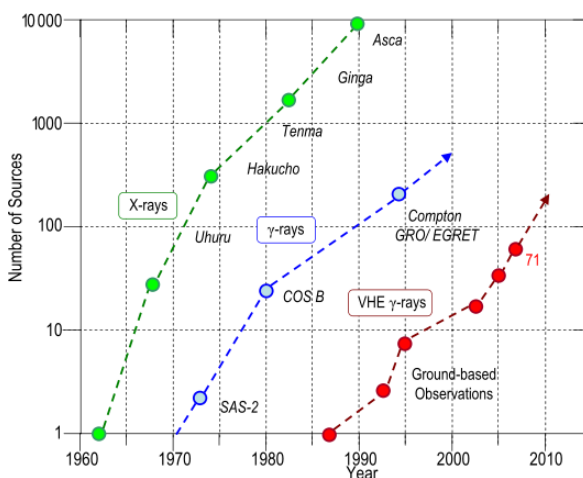


Abbildung 1.1: Neuentdeckte Quellen der Hochenergie-Astronomie: Aufgetragen ist die Anzahl der Quellen (*Number of Sources*) gegen die Zeit (*Year*) für verschiedene Wellenlängenbereiche. [Quelle: Hinton (2007)]

Messungen in diesen Wellenlängenbereichen geben einen Aufschluss über die Vorgänge im Universum. So hat die Astrophysik viele Modelle der Quellen entwickeln und verfeinern können, um die Messergebnisse zu erklären. So kann man heutzutage von astronomischen Objekten wie zum Beispiel Supernova-Überresten, Pulsaren, Aktiven galaktischen Kernen usw. sprechen. Aber auch das junge Gebiet der Astroteilchenphysik zehrt von diesen Beobachtungen: Anhand von Abweichungen zum Standardmodell der Teilchenphysik sucht man beispielsweise nach Evidenzen für Dunkle Materie oder versucht diese Abweichungen mit Phänomenen

²Auch wenn in vielen Mobiltelefonen usw. inzwischen CMOS-Sensoren (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) verwendet werden, beruht diese Entwicklung doch auf dem Prinzip der CCD.

³Damit ist im Allgemeinen hochenergetische elektromagnetische Strahlung gemeint, bei der die Photonen eine Energie von mehr als 0.5 GeV (Giga-Elektronenvolt) haben.

neuartiger Teilchen zu beschreiben.

Wenn man sich die Instrumente für dieses Forschungsgebiet genauer anschaut, sind das ausgeklügelte technische Systeme, die den Blick ins Weltall ermöglichen. So reiht sich auch das *High Energy Stereoscopic System* (kurz: H.E.S.S.) zu den bodengestützten Teleskopsystemen für die γ -Astronomie ein. In Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wird die Funktionsweise dieses Teleskopsystem erläutert. Zur Kontrolle der optischen Eigenschaften der H.E.S.S.-Teleskope werden dabei CCD-Kameras verwendet (Kapitel 2.3, 2.4 und 2.5). Die Technologie des CCD-Sensors findet damit eine spezielle Anwendung am Puls der Wissenschaft.

Nach einem detaillierten Blick stellt sich jedoch heraus, dass die Verwendung der CCD-Kameras in diesem konkreten Fall verbessert bzw. optimiert werden kann (Kapitel 3.1). Denn die Technologien und damit die technischen Möglichkeiten haben sich ebenfalls in den letzten Jahren rasant entwickelt. So wird in dieser Arbeit ein neuartiges CCD-Kamerasystem – mit neusten Hardwarekomponenten – aufgebaut und getestet (Kapitel 3.2 und 4). Es stellt sich heraus, dass damit ein flexibles und ausbaufähiges Modul geschaffen wurde, welches auch für zukünftige Teleskopsysteme hilfreich sein könnte (Kapitel 5). Zukünftige Teleskopsysteme bedeuten einen tieferen und genaueren Blick in das Weltall – für neue Erkenntnisse. In diesem Sinne reiht sich diese Arbeit in den Lauf der Forschung ein, verstandene Technologien und Techniken zu verbinden, um unbekanntes Wissen vielleicht sichtbar zu machen.

★ ★ ★

Anmerkungen

Die Zielsetzung hat sich im Verlauf dieser Arbeit leicht geändert (Kapitel 4.3.2): Ursprünglich war es geplant, mit den neuen Hardwarekomponenten die LidCCD⁴ eines H.E.S.S.-Teleskops während dieser Arbeit auszutauschen. Aufgrund einer zeitlichen Verzögerung der Renovierung der Teleskope konnte das Kamerasystem allerdings nicht an einem H.E.S.S.-Teleskop im Zuge dieser Arbeit eingebaut werden. Zudem hat sich herausgestellt, dass es kurzfristig gesehen eine sinnvollere Verwendung des CCD-Kamerasystems für H.E.S.S. im Hinblick auf H.E.S.S.-Phase II gibt (Kapitel 5). Da die Entwicklung des CCD-Kamerasystems aber an einem zumindest mittelfristigen Austausch der LidCCD orientiert ist, stehen die LidCCDs bei H.E.S.S. thematisch im Fokus des Kapitels 2.

Desweiteren sei angemerkt, dass das Wissen im Bezug auf die CCD-Kameras bei H.E.S.S. sehr fragmentiert ist und bisher vergleichsmäßig wenig davon schriftlich festgehalten wurde. So wusste der Autor zum Beispiel lange Zeit nicht, dass die LidCCD auch und vor allem für das Pointing benutzt wird (Kapitel 2.4). Daher stellt Kapitel 2 zum Teil eine Art Dokumentation über den aktuellen Stand der CCD-

⁴Bei H.E.S.S. gibt es zwei verschiedene Arten von CCD-Kameras, die LidCCD und SkyCCD genannt werden (Kapitel 2.5.1 und 2.5.2).

Kameras dar, was dadurch hoffentlich ein zusätzlicher Mehrwert für die H.E.S.S.-Kollaboration ist.

Abschließend sei angemerkt, dass in der vorliegenden Arbeit Zahlen durchgehend in der englischsprachigen Schreibweise dargestellt werden: Dabei werden Dezimalzahlen mit einem Punkt anstatt mit einem Komma getrennt; und für die Tausendertrennung wird ein Komma anstatt eines Punkts verwendet.

Kapitel 2

Die H.E.S.S.-Teleskope

In diesem Kapitel sollen die für diese Arbeit notwendigen Aspekte des H.E.S.S.-Experiments beschrieben werden. Dabei stehen die optischen Eigenschaften der Teleskope, sowie die Anwendungen und Techniken der CCD-Kameras bei H.E.S.S. im Mittelpunkt.

Nach einer einführenden Übersicht zu H.E.S.S. (Kapitel 2.1) werden die optischen Eigenschaften eines H.E.S.S.-Teleskops beschrieben (2.2). Dabei wurde im Wesentlichen folgende Literatur verwendet: Bernlöhr *et al.* (2003), Cornils *et al.* (2003a) und Cornils *et al.* (2003b). In Kapitel 2.3 wird die Spiegeljustierung der H.E.S.S.-Teleskope vorgestellt. Dabei ist die LidCCD als optische Rückkopplung die zentrale Komponente bei Justiervorgang. In Kapitel 2.4 folgt die zweite Anwendung für CCD-Kameras – das Pointing der Teleskope. Hierbei orientiert sich der Autor hauptsächlich an Überlegungen aus Gillissen (1999) und Cornils (2006). Abschließend werden in Kapitel 2.5 die Hardwarekomponenten der CCD-Kameras und deren Ansteuerung beschrieben – als Ausgangspunkt für den Aufbau eines neuartigen CCD-Kamerasystems (Kapitel 3).

2.1 Übersicht

In Namibia stehen zur Zeit vier baugleiche abbildende Cherenkovteleskope, die zusammen das *High Energy Stereoscopic System* bilden (Abbildung 2.1). Die Teleskope haben jeweils eine Spiegelreflektorfläche von etwa 110 m^2 . Dieser Aufbau dient im Wesentlichen der Untersuchung von hochenergetischer, kosmischer γ -Strahlung.

Durch wenig Streulicht und häufige klare Sicht bietet der Standort im Khomas-Hochland gute Bedingungen für optische Himmelsbeobachtungen. Außerdem kann man von dort den Südhimmel und damit die Region um das galaktische Zentrum unserer Milchstraße beobachten. In mondlosen Nächten können die Teleskope Cherenkovlicht von Luftschauern beobachten und bilden diese jeweils mit ihrer Photomultiplikamera (Hauptkamera) ab. Ein Cherenkovlichtkegel entsteht, wenn ein Primärteilchen der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft und so ein Teilchenschauer¹ auslöst. Diese Sekundärteilchen strahlen dabei Cherenkovlicht

¹Damit ist ein sogenannter ausgedehnter Luftschauer gemeint.



Abbildung 2.1: Eine Panoramaaufnahme des H.E.S.S.-Teleskopsystems: Von links nach rechts sieht man die vier Teleskope: das dritte (CT04), das erste (CT03), das vierte (CT01) und das zweite (CT02) H.E.S.S.-Teleskop. Die Teleskope im Khomas-Hochland (1800 m über NN) in Namibia sind etwa 100 Kilometer von der Hauptstadt Windhoek entfernt. Ge-nauer Standort: $23^{\circ}16'18''$ südlich, $16^{\circ}30'1''$ östlich. [Photo: H.E.S.S.-Kollaboration]

ab, da sie im Medium Atmosphäre schneller als die dazugehörige Ausbreitung von Licht sind.

Die Teleskope sind in den Ecken eines Quadrats mit einer Kantenlänge von 120 Metern angeordnet. Mit dieser Anordnung (*array*) ist es zusätzlich möglich Luftschauer stereoskopisch abzubilden. Ein zentrales Triggersystem gewährleistet, Luftschauerereignisse von immer mindestens zwei Teleskopen aufzuzeichnen.² Somit ist eine räumliche Schauerrekonstruktion – im Gegensatz zu einer zweidimensionalen bei nur einem Teleskop – möglich. Dadurch erhält man eine bessere Winkel- und Energieauflösung als bei einem einzelnen Teleskop. Zusätzlich werden Untergrundereignisse besser unterdrückt.

Bevor im nächsten Abschnitt 2.2 näher auf die optischen Eigenschaften eines einzelnen Teleskops eingegangen wird, soll hier die Leistungsfähigkeit des Teleskopsystems benannt werden. Mit H.E.S.S. läßt sich γ -Strahlung in einem Energiefenster von 100 GeV bis zu 100 TeV beobachten. Eingeschränkt wird dieser Energiebereich nach unten im Wesentlichen durch die Größe der Spiegelreflektorfläche eines Teleskops und durch Fluktuationen von Luftschauer³ – nach oben durch die effektive Fläche der gesamten Teleskop-Anordnung, da höher energetische Ereignisse in ihrer Häufigkeit abnehmen. Die Energie und die Herkunftsrichtung von primären γ -Photonen kann H.E.S.S. mit einer Auflösung von $\Delta E/E \simeq 15\%$ bzw. $\delta\theta \simeq 0.1^{\circ}$ bestimmen.

H.E.S.S. wird von einer internationalen Forschungskollaboration betrieben: Die H.E.S.S.-Kollaboration besteht aus 31 Forschungseinrichtungen aus 12 Ländern und aus etwa 200 Wissenschaftlern und Mitarbeitern. Im Juni 2002 war das erste Teleskop (CT03) komplett fertig gestellt und wurde in Betrieb genommen. Seit Ende 2003 wird mit allen vier Teleskopen gemessen. Bis heute hat die H.E.S.S.-Kollaboration mit dem Teleskopsystem wichtige Entdeckungen machen können. Durch ein vergleichsweise großes Gesichtsfeld (*field of view*) von 5° (Kapitel 2.2) konnte man erstmals die Morphologie ausgedehnter Quellen im hochenergetischen γ -Bereich studieren, wie beispielsweise die Schale eines Supernovaüberrests (Aharonian *et al.* 2004). Außerdem konnte H.E.S.S. inzwischen 56 neue Quellen entdecken

²Das Triggersystem wird in dieser Arbeit nicht näher beschrieben; dafür siehe zum Beispiel Funk *et al.* (2004).

³Damit sind Luftschauer als Hintergrund gemeint, die beispielsweise durch geladene Leptonen, wie Elektronen als Primärteilchen, induziert werden.

(H.E.S.S.-Kollaboration 2010).

Das Ziel bodengestützter Cherenkovteleskope⁴ ist es, Luftschauer ausreichend gut aufzulösen. Dadurch werden zwei wesentliche Aspekte für zukünftige Teleskope und Teleskopsysteme verfolgt: die untere Energieschwelle zur Detektion von γ -Strahlung weiter zu senken,⁵ und gleichzeitig die Sensitivität für höhere Energien zu verbessern. Daher war ursprünglich in Phase II von H.E.S.S. geplant, die Teleskopanordnung auf insgesamt 16 Teleskope zu erweitern. Dabei sollten um die 4 bestehenden CTs 12 weitere Teleskope gleichen Typs gebaut werden, so dass ein gleichförmiges Raster von 4 mal 4 Teleskopen entsteht. Die Kollaboration hat sich aber 2005 dafür entschlossen, zu den 4 Teleskopen ein grösseres Teleskop (H.E.S.S. II) in die Mitte der quadratischen Anordnung zu bauen (Vincent *et al.* 2005). Mit einem Reflektordurchmesser von 27 Metern von H.E.S.S. II soll so die Energieschwelle des gesamten Systems auf bis zu 20 GeV herabgesetzt werden. Momentan ist noch unklar, wann H.E.S.S. II fertiggestellt wird und in den Betrieb geht.

⁴Neben H.E.S.S. gab und gibt es folgende Projekte: HEGRA, Whipple, Durham, CAT, CANGAROO, VERITAS, MAGIC.

⁵Damit versucht man an den sensitiven Energiebereich von γ -Strahlung anzuschliessen, der von satellitengestützten Experimenten, wie EGRET oder FERMI, abgedeckt wird.

2.2 Optik der H.E.S.S.-Teleskope

In Abbildung 2.2 ist der Aufbau eines H.E.S.S.-Teleskops zu sehen. Die Grundstruktur der Teleskope basiert auf einer stabilen Stahlkonstruktion mit einer Altitude-Azimuth-Montierung. Somit kann das Teleskop in jede Himmelsrichtung auf zwei Weisen ausgerichtet werden.⁶ Die zwei Teleskopachsen werden von Servomotoren angetrieben, welche eine Winkelgeschwindigkeit von etwa 100°/min haben. Das Gesamtgewicht eines Teleskops beträgt 62 t. Die Hauptkamera hat ein Gewicht von etwa 2 t.



Abbildung 2.2: Nahaufnahme eines H.E.S.S.-Teleskops: Zu sehen ist die rote Stahlkonstruktion, rechtsseitig die 380 Spiegelfacetten in der Reflektorebene (*dish*) und links die Hauptkamera, die durch die vier Stahlarme in der Fokalebene gehalten wird. Unten rechts ist die weiße Elektronikhütte (*electronic hut*) zu sehen, in der die Kabelverbindungen vom Teleskop zusammenlaufen und sich diverse Steuerungseinheiten befinden. Diese steht auf der Teleskopkonstruktion und dreht sich somit mit. Links unten befindet sich eine Schutzhütte, in der die empfindliche Hauptkamera tagsüber untergebracht ist – die Parkposition der Teleskope. [Photo: H.E.S.S.-Kollaboration]

Die H.E.S.S.-Teleskope sind abbildende Beobachtungsinstrumente⁷, was bedeutet, dass die Teleskope Abbilder – in diesem Fall – von Luftschauern aufnehmen. Luftschauer sind relativ lichtschwach und können mit bloßem Auge nicht gese-

⁶Man spricht hier dann vom *normal* und *reverse mode* des Teleskops.

⁷Damit ist hier gemeint: abbildende (*imaging*) Instrumente im Gegensatz zu nicht-abbildenden (*non-imaging*). Während abbildende Instrumente sich hauptsächlich auf die Winkelauflösung der Signale konzentrieren, steht bei nicht-abbildenden Instrumenten die räumliche und zeitliche Auflösung im Vordergrund. Daher decken nicht-abbildende Anordnungen auch meist eine größere Detektionsfläche ab – vergleiche zum Beispiel das AUGER-Experiment (www.auger.org).

hen werden. Das liegt zum einen an der Kürze der Emmisionszeit, zum anderen an der relativ geringen Anzahl von Photonen. Ein Schauer entwickelt sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit und das Cherenkovlicht erreicht in einem kurzen Blitz von nur wenigen Nanosekunden den Erdboden. Daraus ergibt sich, dass man sehr sensitive und schnelle Lichtdetektoren in der Fokalebene eines Teleskops braucht. Dafür sind Photomultiplier geeignet. Außerdem sollte ein Teleskop möglichst viel Licht sammeln. Um eine große Spiegelfläche zu erhalten, bietet es sich, an den Reflektor aus vielen einzelnen Facetten aufzubauen. Die Hauptaufgabe der Teleskope ist es also, das Cherenkovlicht von Luftschauern zu sammeln und auf eine Kamera aus Photomultipliern zu fokussieren, und somit das Bild eines Luftschauers ausreichend gut aufzulösen.⁸ Damit sind die wesentlichen optischen Eigenschaften eines Teleskops benannt: die Reflektorfläche, die Fokallänge⁹ sowie die Gesamtgröße der Bildfläche (Hauptkamera) und die Größe der einzelnen Pixel (Photomultiplier).

Der Reflektor besteht aus 380 runden Spiegelfacetten, die alle identisch geschliffen sind und einen Durchmesser von 60 cm haben. Damit ergibt sich eine gesamte **Reflektorfläche** von 107 m². Die Spiegel sind hexagonal angeordnet und somit hat der gesamte sechseckige Reflektor einen Innendurchmesser von $d = 12.6$ m. Frisch beschichtete Spiegel haben eine Reflexivität von mindestens 80% in einem Wellenlängenbereich von 300 bis 600 nm. Aus Erfahrungen mit HEGRA¹⁰ und einigen Tests nimmt die Reflexivität mit 3-4% pro Jahr ab. Sodaß man daraus abschätzt, daß die Spiegel alle 5 Jahre erneuert werden müssen, um die Leistungsfähigkeit der Teleskope zu gewährleisten (Kapitel 5).

Die Spiegel sind hexagonal und nach dem Davies-Cotton-Design angeordnet (Davies & Cotton 1957). Das bedeutet, dass alle Spiegelfacetten die gleiche Fokallänge haben, diese identisch mit der Fokallänge des gesamten Reflektors und Teleskops sind, und dass die einzelnen Spiegelemente sphärisch mit der Fokallänge als Radius in der Reflektorebene angeordnet sind. Die **Fokallänge** f der H.E.S.S.-Teleskope und damit der einzelnen Spiegel beträgt $f = 15.00 \pm 0.25$ m. Einerseits kommt eine Wellenfront bei einer solchen Anordnung im Gegensatz zu einem Parabolspiegel nicht mehr isochron an, sondern verteilt sich auf ein Zeitintervall von etwa 5 ns. Da die Integrationszeit der Hauptkameras der H.E.S.S.-Teleskope 16 ns beträgt, kann man davon ausgehen, dass das gesamte Signal aufgenommen wird. Andererseits hat das Davies-Cotton-Design den großen Vorteil, daß Signale, welche nicht parallel zur optischen Achse (*off-axis*) ankommen, besser fokussiert werden im Vergleich zu einer parabolischen Spiegelanordnung. Das ist entscheidend, um ein großes Gesichtsfeld zu gewährleisten. Das Öffnungsverhältnis beträgt damit $f/d \approx 1.2$ und ist ein Kompromiss zwischen einer ausreichenden Qualität achsenferner Bilder und steigender Kosten für die Stahlkonstruktion bei einer größeren Fokallänge, was ein größeres Drehmoment auf das Teleskop durch die 2 t schwere Hauptkamera zur Folge hätte.

Die Hauptkamera besteht aus 960 Detektorelementen, befindet sich in der Fokalebene des Reflektors (*dish*) und bildet somit die Bildebene des Teleskops (Ab-

⁸Luftschauer haben eine charakteristische Ausdehnung von 1° bis 2°.

⁹Synonym für Brennweite.

¹⁰HEGRA (*High Energy Gamma Ray Astronomy*) war das erste stereoskopische System und war von 1997 bis 2002 in Betrieb (www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CT).

α ist mit der Bildlänge a und der Fokallänge f gegeben durch

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \frac{a}{2 \cdot f} . \quad (2.1)$$

Damit beträgt die Größe eines Pixels bzw. dessen Sichtfeld etwa 0.16° (2.8 mrad). Betrachtet man die gesamte Anordnung der Detektorelemente (Abbildung 2.3b), so ist die Bildfläche die Fläche eines Kreises mit einem Durchmesser von 1.31 m, der die Elemente einschliesst. Damit beträgt die **Gesamtgröße der Bildfläche** bzw. das Gesichtsfeld der H.E.S.S.-Teleskope etwa 5° (87.3 mrad).

2.3 Spiegeljustierung der H.E.S.S.-Teleskope

Die Größe eines Kamerapixels (0.16°) bestimmt die Anforderung an die Ausrichtung der Spiegelfacetten: Eine im Unendlichen gelegene, punktförmige Lichtquelle sollte von allen 380 Spiegeln so fokussiert werden, dass das Abbild ausreichend gut innerhalb eines Kamerapixels liegt. Mit welcher Methode man dies bei H.E.S.S. erreicht, was die Komponenten für die Spiegeljustierung sind und leisten, und wie eine Justierprozedur abläuft, wird in diesem Kapitel beschrieben. Außerdem wird auf den Zeitbedarf einer Spiegeljustierung eingegangen, da eine Optimierung mit einer neuen LidCCD in Aussicht steht. Abschließend wird auf die Abbildungsfunktion eingegangen, die für eine quantitative Analyse der Optik eines H.E.S.S.-Teleskops benutzt wird, und gleichzeitig das Ergebnis der Spiegeljustage darstellt.

2.3.1 Methode

Die Teleskope von HEGRA hatten je 30 Spiegelemente. Aufgrund der geringen Anzahl wurden diese Spiegel von Hand verkippt und justiert. Dazu wurde das Teleskop auf eine Lampe auf einem Berg, der etwa 900 Meter entfernt war, gerichtet. Die reflektierten Lichtpunkte der einzelnen Spiegel wurden als Referenz benutzt, inwieweit man die Spiegel verstellen musste, damit man am Ende ein fokussiertes Teleskop hatte. Dafür musste die Lampe so hell sein, dass das menschliche Auge die Lichtpunkte auf einem weißen Schirm sehen konnte.

Bei H.E.S.S. ist bei 380 Spiegelfacetten eine Einstellung per Hand sehr mühselig. Daher wurde von Anfang an geplant, einen automatisierten Justiervorgang zu verfolgen. Die Realisierung der automatischen Spiegeleinstellung (Überlegungen und Software) führte zum großen Teil Cornils (2006) durch. Dabei wurde die Idee von Hofmann (1998) verfolgt, die Spiegelfacetten anhand von Sternabbildern auszurichten.¹⁴

Der prinzipielle Ablauf einer Spiegelausrichtung mittels Sternbildern funktioniert wie folgt (Abbildung 2.4a): Richtet man das Teleskop auf einen optisch sichtbaren Stern, erzeugt jeder Spiegel ein individuelles Abbild in der Fokalebene des Teleskops. Diese Abbilder sind im allgemeinen Fall eines unfokussierten Teleskops beliebig in der Fokalebene verteilt. Um diese Verteilung der Abbilder zu erhalten, benutzt man den Deckel der Hauptkamera (*lid*) als Schirm. Eine CCD-Kamera ist auf diesen fokussiert und kann somit die Abbilder der Sterne aufnehmen. Die CCD-Kamera ersetzt im Vergleich zu HEGRA das menschliche Auge und ist somit die optische Rückkopplung im Justiervorgang. Diese CCD-Kamera wird bei H.E.S.S. und in dieser Arbeit LidCCD genannt, da diese auf den *lid* schaut.

Macht man nun ein Bild eines solchen Abbilds eines Sterns, bewegt danach eine bestimmte Spiegelfacetten und betrachtet das resultierende Bild wieder, so hat sich das individuelle Sternabbild dieses einen Spiegels in eine bestimmte Richtung und

¹⁴Bei H.E.S.S. wurde diese Methode der Spiegeleinstellung zum ersten Mal in der jungen Geschichte der Cherenkovastronomie angewendet. Neben dieser Methode und der bei HEGRA sei noch eine Methode erwähnt, wie sie bspw. an den MAGIC-Teleskopen (MAGIC-Kollaboration 2010) verwendet wird. Bei den MAGIC-Teleskopen ist an jeder Spiegelfacetten ein Laserpointer angebracht. Somit erhält man ein optisches Referenzsignal zur jeweiligen Spiegelbewegung.

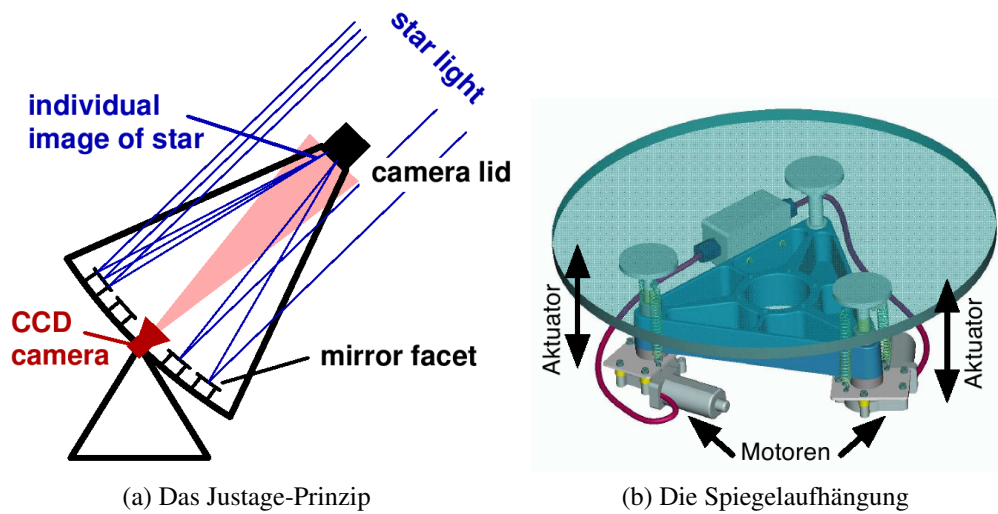


Abbildung 2.4: Links: Schematische Darstellung des Prinzips zur Justierung der der Spiegel. Rechts: Die Spiegelaufhängung samt Aktuatoren und Motoren. [Zeichnungen aus Cornils (2006)]

um eine bestimmte Länge auf dem Schirm bewegt. Somit erhält man einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Bewegung der Facette und Bewegung des Abbilds auf dem Schirm. Macht man das für jeden Spiegel, kann man die individuellen Abbilder alle auf einen Punkt in der Fokalebene bringen und somit das Teleskop fokussieren.

Der Vorteil dieser Justiermethode ist, dass die Teleskope in einer typischen Beobachtungssituation justiert werden. Durch die Verwendung einer natürlichen, unendlich entfernten Punktlichtquelle, überprüft man gleichzeitig den optischen Weg des Cherenkovlichts von Luftschauern. Dadurch, dass man Sterne verwendet, die in einem Elevationsbereich¹⁵ von 55° bis 75° liegen, wird außerdem der Effekt der Verformung durch das Drehmoment der Hauptkamera auf die Abbildungsqualität im Arbeitsbereich des Teleskops minimiert. Ein weiterer Vorteil ist, dass man stets die Abbildungsqualität der einzelnen Spiegel, sowie des fokussierten Teleskops kontrollieren kann. Darauf wird in Kapitel 2.3.4 näher eingegangen.

2.3.2 Komponenten

In diesem Kapitel sollen die benötigten Komponenten zur Spiegeljustierung mit ihren relevanten Eigenschaften vorgestellt werden: Justiersterne, Spiegel, Kameradeckel, Spiegelaufhängung aus Aktuatoren und Motoren, Steuerungselektronik, sowie die Steuerungssoftware. Die LidCCD als optische Rückkopplung wird als zentraler Punkt dieser Arbeit separat in Kapitel 2.5.1 detailliert behandelt.

Die **Justiersterne** müssen einige Bedingungen erfüllen, um eine erfolgreiche Spiegeleinstellung durchführen zu können: Sie müssen hell genug sein, damit die Belichtungszeiten der LidCCD nicht zu lang sind; sie sollten so gewählt werden, dass diffuses Hintergrundlicht, wie etwa von der Milchstraße, minimiert wird; und

¹⁵Mit Elevation ist der Erhebungswinkel bzw. der Winkel der Altitude des Teleskops gemeint.

sie sollten für eine längere Zeit im Elevationsbereich von 55° bis 75° sichtbar sein, um eine konstante Nachführung und wenige Umpositionierungen des Teleskops zu gewährleisten. In Abbildung 2.5 ist die Abfolge der zehn Sterne zu sehen, die für die automatische Spiegeljustierung bei H.E.S.S. verwendet werden. Ihre visuellen Helligkeiten variieren zwischen 1.99^m bis -1.44^m und decken 83% eines siderischen Tages ab.

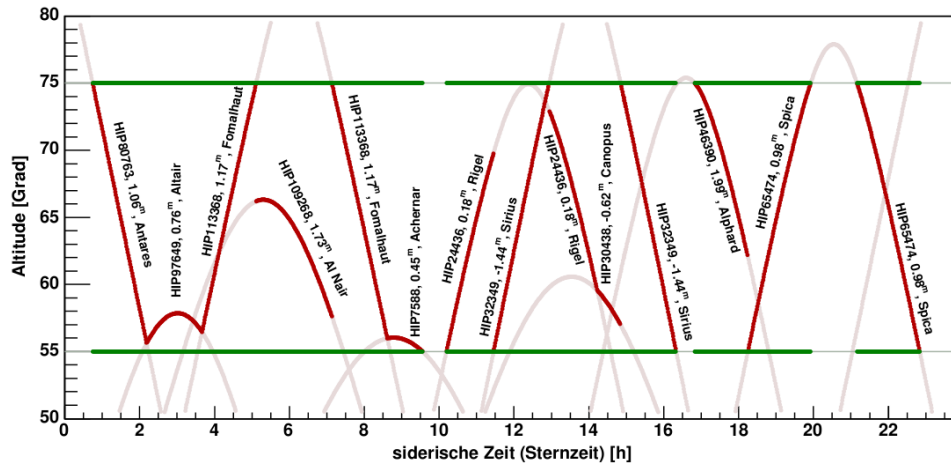


Abbildung 2.5: Abfolge der verwendeten Justiersterne bei H.E.S.S. während eines siderischen Tages. [Zeichnung aus Cornils (2006)]

Ist das Teleskop auf einen der Justiersterne gerichtet, wird das Licht von jedem einzelnen **Spiegel** reflektiert. Wie bereits erwähnt haben die 380 Spiegelfacetten alle eine Fokallänge von 15 m und einen Durchmesser von 60 cm. Sie sind aus sphärisch geschliffenem Glas gefertigt, besitzen eine Reflexionsschicht aus Aluminiumbedampfung und sind mit einer Quarzschicht versiegelt. Dabei soll die Abbildungsqualität der Spiegel derart sein, dass sich im Fokus 80% des reflektierten Lichts innerhalb eines Kreises von 1 mrad Durchmesser befindet:¹⁶ $d_{80\%} \leq 0.057^\circ$ ($3.44'$ bzw. 1 mrad).

Damit bildet jeder Spiegel den Stern als ausgedehnten Lichtfleck auf den **Kameradeckel** der PMT-Kamera ab. Dieser dient bei der Justierung als Schirm. An der PMT-Kamera sind zusätzlich in den Ecken jeweils zwei – also insgesamt acht – Positions-Leuchtdioden (kurz: Positions-LEDs) angebracht (siehe Abbildung 2.11). Damit erhält man eine Information darüber, wie die Sternabbilder relativ zur Kamerageometrie liegen.¹⁷ Zu beachten ist, dass der Abstand von der Oberseite des Kameradeckels zu der Ebene, in der die Eintrittsöffnungen der *Winston Cones* liegen, 28 mm beträgt. Werden die Spiegelfacetten nun auf den Kameradeckel fokussiert, so hat die Ebene der Eintrittsöffnungen der Hauptkamera einen Fokus von etwa 8 km. Dadurch wird die Abbildungsleistung der Teleskope verbessert, wenn man davon ausgeht, dass ein Großteil der Schauer in einer Höhe von etwa 10 km ihr Maximum erreichen.¹⁸

¹⁶Diese Größe wird in Kapitel 2.3.4 zur Abbildungsfunktion erläutert.

¹⁷Dies ist für die Bestimmung der genauen Ausrichtung der H.E.S.S.-Teleskope relevant (Kapitel 2.4).

¹⁸10 km von Null entspricht dann etwa dem Fokus von 8 km und der Lage der Teleskope von

Jeder Spiegel ist an drei Punkten an einer **Spiegelaufhängung** fixiert (Abbildung 2.4b), die wiederum am Stahlgerüst des Teleskops befestigt ist. Zwei der drei Punkte sind durch Motoren über sogenannte **Aktuatoren** in ihrer Höhe verstellbar, so dass man den Spiegel genügend weit zur Fokussierung in alle Richtungen verkippen kann. Ein Aktuator hat ein Gewinde mit einer Steigung von 0.75 mm pro Umdrehung. Damit man den Spiegel spannungsfrei verkippen kann, ist der Auflagepunkt des ersten Aktuators in einer Dimension parallel zur Spiegelebene beweglich, der Auflagepunkt des zweiten in zwei Dimensionen parallel dazu. Zugfedern sorgen für die notwendige Stabilität und verringern dadurch gleichzeitig das mechanische Spiel der Aktuatoren. Der dritte Befestigungspunkt ist nicht beweglich, hat jedoch ein Kugelgelenk, um die Verkipfung durch die Aktuatoren auszugleichen.

Als **Motoren** kommen Gleichspannungsmotoren¹⁹ aus der Automobilindustrie zum Einsatz, die ursprünglich als Fensterhebermotoren hergestellt wurden. Die Umdrehung kann man durch Hallsensoren auf der Motorwelle über sogenannte Hallimpulse (*Hall-Counts*) angeben. Durch ein Schneckengetriebe erhält man eine Auflösung von 220 Hallimpulsen pro Umdrehung. Dadurch erhält man eine Auflösung für Aktuator und Motor von

$$\frac{0.75 \text{ mm pro Umdrehung}}{220 \text{ Hallimpulse pro Umdrehung}} = 3.41 \mu\text{m pro Hallimpuls}.$$

Umgerechnet auf die Reflexion in der Fokalebene²⁰ entspricht dies einem Bildwinkel von 5.36'' (0.026 mrad). Der Gesamthub der Aktuatoren beträgt etwa 2.8 cm, was umgerechnet einem Bildwinkel von $\pm 6.1^\circ$ (± 107 mrad) entspricht.

Zur Ansteuerung der Aktuatormotoren werden die 380 Spiegelmodule (Spiegel mit Spiegelaufhängung) in 12 Segmente á 32 Spiegelmodulen bzw. 64 Motoren unterteilt. Jeweils ein Branchkabel durchläuft auf eine bestimmte Weise ein solches Segment und an sogenannten Branchknoten sind die Spiegelmodule angeschlossen. Die 12 Branchkabel der jeweiligen Segmente sind mit der zentralen Steuereinheit in der Elektronikhütte verbunden. Durch Adressleitungen in den Branchkabeln, kann man so einen bestimmten Motor eines Segments ansteuern. Die Steuereinheit ist an einen Rechner (VMEbus) angeschlossen und damit über Ethernet im lokalen Rechnernetzwerk ansprechbar. Für weitere Details zur **Steuerungselektronik** sei hier auf folgende Dokumente verwiesen: Kapitel 4 in Cornils (2001), Kapitel 3.1.2.1 in (Cornils 2006) sowie das technische Handbuch von Riege *et al.* (2000).

Die **Steuerungssoftware**, mit der die automatische Spiegeljustierung durchgeführt wird, heißt *Mirror Alignment Control System* (kurz: MACS). MACS ist ein eigenständiges Programm und damit unabhängig von der übrigen Software bei H.E.S.S. (Kapitel 2.5.3). Die Software ist in der Programmiersprache Objective-C geschrieben, welches die Interprozesskommunikation von mehreren Rechnerkomponenten, die über ein Netzwerk verbunden sind, bereitstellt.²¹ So sind beispiels-

1800 m über dem Meeresspiegel.

¹⁹Die genaue Bezeichnung lautet: Bosch, Typ 0 130 821 708/709.

²⁰In diese Umrechnung geht der Radius von 175 mm desjenigen Kreises ein, auf dem sich die drei Befestigungspunkte befinden.

²¹Rene Cornils verfolgte dabei eine Client/Server-Programmierung mit sogenannten Distributed Objects, siehe Kapitel 4.2.2.4 in Cornils (2001).

weise der VMEbus-Rechner für die Motoren, der Rechner, an den die LidCCD angeschlossen ist, und der Rechner, auf dem die Justierung vom Benutzer letztendlich gesteuert wird, verbunden und werden gemeinsam von MACS angesprochen. Die Steuerungssoftware MACS verbindet also alle benötigten Hardwarekomponenten und regelt den Justiervorgang. Somit sind in MACS beispielsweise die Bildverarbeitung der CCD-Bilder der LidCCD, sowie die Algorithmen zur Justierung implementiert. Wie die Justierprozedur im Detail abläuft, wird im folgenden Kapitel 2.3.3 beschrieben.

2.3.3 Ablauf und Status

In diesem Kapitel soll der Ablauf der Spiegeljustierung nach Cornils (2006), sowie Überlegungen, die die zeitliche Dauer des Justiervorgangs betreffen, behandelt werden. Zunächst wird die Prozedur einer Erstjustierung, sowie die einer Nachjustierung beschrieben. Dabei wird erklärt, was bei der Differenzbildanalyse passiert. Bevor eine Chronologie aller Justiervorgänge bei H.E.S.S. genannt wird, werden die Anforderungen an die Justierung und der Zeitbedarf der einzelnen Justierschritte behandelt. Besonders der letzte Punkt ist für die vorliegende Arbeit relevant.

Prozedur eines Justiervorgangs

Eine Erstjustierung (*initial alignment*) des Teleskops teilt sich in vier wesentliche Schritte auf: die Konnektierung, die Referenzierung, die Grobjustierung und die Feinjustierung.

Bei der **Konnektierung** wird überprüft, ob an den Branchknoten überhaupt ein Spiegelmodul angeschlossen ist und die Verbindung zum System funktioniert. Bei einer erfolgreichen Konnektierung wird das entsprechende Spiegelmodul für die weiteren Schritte freigeschaltet.

Beim nächsten Schritt, der **Referenzierung**, wird der absolute Hub eines jeden Motors ermittelt. Dafür werden die Motoren jeweils auf einen Anschlag gefahren, bevor man die Hallcounts bis zum anderen Anschlag zählt. Um eine stabile Messung zu erhalten, wird der andere Motor eines Spiegelmoduls in der Mitte positioniert, die man nach Ermittlung des absoluten Hubs anfahren kann. Nach Referenzierung aller Motoren aller vier Teleskope ergibt sich ein mittlerer absoluter Hub von 8670 ± 116 Hallcounts.²² Alle Motoren müssen dabei einen gewissen Mindesthub vorweisen, da ansonsten wahrscheinlich ein Defekt in der Mechanik oder der Elektronik vorliegt. Nachdem alle Motoren eines Teleskops referenziert sind, werden diese auf Null gefahren. Dadurch sind die Spiegel im allgemeinen Fall soweit verkippt, dass die Sternabbilder nicht auf den Kameradeckel fallen. Das erleichtert die Justierung erheblich, da dann im Optimalfall nur der Hauptlichtfleck und der Lichtfleck des zu justierenden Spiegels sichtbar sind.

Wie bereits weiter oben erwähnt, erhält man den Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Motors und der Veränderung des Sternabbilds respektive des Lichtflecks auf dem Kameradeckel in der Fokalebene durch Bilder der LidCCD. Dabei

²²Dieser Wert ergab sich nach den Justierungen aller Teleskope (Stand 2006, siehe Seite 42 in Cornils (2006)).

wird ein erstes Bild vor einer bestimmten Aktuatorbewegung aufgenommen und ein zweites nach dieser Bewegung. Die folgenden Schritte der Justierung (Grob- und Feinjustierung) benutzen diese sogenannte **Doppelbildanalyse**, die im Folgenden erläutert werden soll.

Um die Lichtflecke besser zu identifizieren, werden die beiden Originalbilder der LidCCD zunächst aufgebessert. Dabei werden die Bilder um den mittleren Untergrund bereinigt. Danach wird zunächst der Hauptlichtfleck identifiziert. Der Hauptlichtfleck ist die Position, auf welchen die Spiegel respektive deren Lichtfleck sukzessive justiert werden. Zu Anfang einer Justierung benutzt man dafür den Lichtfleck einer Laserfacette (Abbildung 2.10) als Referenz, auf den die Spiegel eingestellt werden. Nach 7-9 fertig justierten Spiegeln bilden die Lichtflecke der bereits justierten Spiegel diesen Hauptlichtfleck, dessen Schwerpunkt jeweils als Positionsreferenz für die weiteren Schritte dient. Nun wird ein Bild so verschoben, dass die Schwerpunkte des Hauptlichtflecks der beiden Bilder übereinstimmen. Danach werden zwei Differenzbilder gebildet – einmal wird das erste vom zweiten Bild subtrahiert und ein weiteres Mal das zweite vom ersten. Der Hauptlichtfleck, dessen Position ja bekannt ist, wird herausgeschnitten. Nun werden bei beiden Differenzbildern die Positionen der Lichtflecke des Spiegels bestimmt.

Im Idealfall hat man nun in Bildkoordinaten die Position des Hauptlichtflecks, die des Lichtflecks vor der Bewegung des Aktuators, sowie die Position des Lichtflecks nach der Bewegung, und die Bewegungsschritte des Aktuators. Aus diesen Informationen lässt sich nun eine 2×2 -Transformationsmatrix bestimmen, die den Zusammenhang zwischen Aktuatorbewegung und Lichtfleckbewegung eindeutig herstellt. Da man zu diesem Zeitpunkt nur einen Aktuator bewegt hat und somit nur eine eindimensionale Bewegung analysiert hat, schätzt man die zweite Bewegung zunächst anhand der fixen Geometrie des Spiegelträgers ab: Da die Aktuatoren auf einem Dreieck angebracht sind, sind die Bewegungen beider Aktuatoren bis zu einer gewissen Genauigkeit um 120° gedreht (Abbildung 2.6). Die genaue Transformationsmatrix erhält man erst, wenn man die Bewegung des zweiten Aktuators eines Spiegelmoduls analysiert hat.

Mit der Transformationsmatrix und der Distanz zum Hauptlichtfleck lässt sich nun errechnen, wie weit beide Aktuatoren gefahren werden müssen, damit der resultierende Lichtfleck des Spiegels auf den Hauptlichtfleck fällt.

Diese Analyseketten werden nun bei dem Schritt der **Grobjustierung** benutzt. Dafür wird das Teleskop bei Nacht auf einen geeigneten Stern gerichtet. Man muss beachten, dass der Winkel zwischen Mond und Justierstern 10° bis 90° beträgt, damit der Mond zum einen nicht zu nah am Justierstern ist und zum anderen den Kameradeckel nicht beleuchtet. Die Grobjustierung einer Spiegelfacette dient dazu, den entsprechenden Lichtfleck zu identifizieren und in die Nähe des Hauptlichtflecks zu bringen (Abbildung 2.6). Dafür fährt man beide Aktuatoren in ihre Mittelstellung, da dies zu Anfang die beste Abschätzung ist. Danach wird der erste Aktuator von der Zentralposition um eine definierte Anzahl²³ von Hallcounts in negative Richtung gefahren. Ist die Position erreicht nimmt die LidCCD ein Bild. Während der

²³Sowohl bei der Grobjustierung als auch später bei der Feinjustierung sind das jeweils ± 200 Hallcounts relativ zur jeweiligen Zentralposition. Das entspricht einer Winkeldistanz von 0.595° (10.4 mrad) oder 160 Pixel der LidCCD-Kamera.

Bildauslese, wird der Aktuator um die doppelte Anzahl von Hallcounts in die positive Richtung gefahren, und danach wieder ein Bild aufgenommen. Die CCD-Bilder werden beide im 2x2-Binning²⁴ ausgelesen, was in diesem Fall hinreichend genau ist. Nach der Doppelbildanalyse mit halbabgeschätzter Transformationsmatrix werden die beiden Aktuatoren so gefahren, dass der Lichtfleck des entsprechenden Spiegels in unmittelbarer Nähe des Hauptlichtfleckes ist.

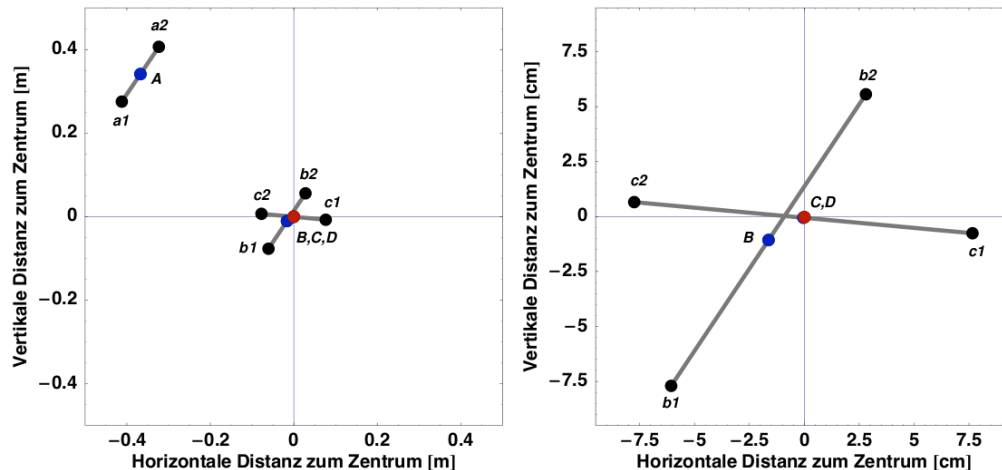


Abbildung 2.6: Veranschaulichung des Justialgorithmus: In der linken Zeichnung ist der Vorgang der Grobjustierung und der Feinjustierung verdeutlicht, in der rechten ist der Vorgang der Feinjustierung vergrößert. Alle Punkte deuten die Position eines Lichtfleckes auf dem Kameradeckel an; bei schwarzen Punkten wird zudem ein CCD-Bild gemacht. Bei der Grobjustierung ist A bspw. die Ausgangsposition, bevor ein Motor gefahren wird und zwei Bilder (a1 und a2) gemacht werden (siehe Text). Aus der Veränderung des Lichtfleckes lässt sich die halbabgeschätzte Transformationsmatrix bestimmen, mit der der Spiegel zu Position B gefahren wird. Danach erfolgt analog die Feinjustierung (siehe Text), die als Resultat die Spiegelfacetten so ausrichtet, dass der Lichtfleck in die Zielposition D kommt. [Zeichnungen aus Cornils (2006)]

Nach der Grobjustierung erfolgt die **Feinjustierung**. Ausgehend von der neuen Zentralposition werden nun beide Aktuatoren jeweils nach der Methode der Doppelbildanalyse bewegt und entsprechende CCD-Bilder aufgenommen. Die Transformationsmatrix wird also diesmal komplett durch beide Aktuatorbewegungen bestimmt. Insgesamt werden vier CCD-Bilder gemacht (Abbildung 2.6) – diesmal mit höchster Auflösung, also einem 1x1-Binning. Mit der daraus errechneten Transformationsmatrix und des Distanzvektors, werden die Aktuatoren so gefahren, dass der Lichtfleck des Spiegels in den Hauptlichtfleck landet.

Die Schritte Konnektierung, Referenzierung, Grob- und Feinjustierung werden für jeden Spiegel durchgeführt, so dass man am Ende alle 380 Spiegel und somit das Teleskop justiert hat.

Neben der Erstjustierung gibt es noch zwei Arten einer **Nachjustierung**. Die

²⁴Beim Binning werden benachbarte Pixel des CCD-Chips zu Pixelblöcken zusammengefasst: In diesem Fall werden jeweils 4 Pixel in einem Quadrat mit 2 mal 2 Kantenlänge zu einem Block zusammengefasst. Dadurch erhöht sich die Lichtempfindlichkeit – hier um einen Faktor 4. Das Auflösungsvermögen verschlechtert sich aber dementsprechend (vergleiche Kapitel 4.2.1).

normale Rejustierung entspricht für jeden Spiegel einer halben Feinjustierung, bei der nur ein Aktuator bewegt wird – also zwei CCD-Bilder aufgenommen werden. Die neu ermittelte Transformationsmatrix gilt dabei zur Überprüfung der gespeicherten Matrix aus der Feinjustierung. Bei einer schnellen Rejustierung wird nur ein Bild aufgenommen, um lediglich die Position des Lichtflecks des entsprechenden Spiegels zu identifizieren. Dafür wird zuvor der Lichtfleck aus dem Hauptlichtfleck herausgefahren. Außerdem wird nur ein Teil des CCD-Chips bei der Bildnahme ausgelesen, da man davon ausgehen kann, zu wissen, wo der Lichtfleck hingefahren wurde.

Anforderungen an die Justierung

Die Anforderungen an die Justierung der Spiegel sind, dass diese zum einen verlässlich und zum anderen schnell von Statten geht: Einerseits soll ein Teleskop optimal für den Messbetrieb fokussiert sein, andererseits will man so wenig wie möglich die kostbare Messzeit zur Justierung verwenden. Eine Hauptaufgabe war es, einen guten Kompromiss zwischen Verlässlichkeit und Geschwindigkeit zu finden, was grundsätzlich im Widerspruch zueinander steht.

Der gesamte Justiervorgang ist daher zum einen in einzelne, aufeinander aufbauende Schritte unterteilt. So kann man die Schritte Konnektierung und Referenzierung, die keine optische Rückkopplung durch die LidCCD brauchen, auch am Tage durchführen. Zum anderen werden bspw. für eine schnelle Nachjustierung Parameter gespeichert, die sich mit der Zeit nur marginal ändern. Die Bestimmung der Transformationsmatrizen für jeden Spiegel ist recht aufwendig, da diese an Bilder von der LidCCD gekoppelt sind. Sind die Transformationsmatrizen jedoch einmal bestimmt, kann man davon ausgehen, dass sich diese kaum ändern, da die Position und die Montierung der Spiegel nahezu unveränderlich sind. So kann man bei Bedarf auf diese Datenbank zurückgreifen. Eine Kontrolle mittels der LidCCD wäre aber natürlich wünschenswert.

Da die Aufnahme und Übertragung von CCD-Bildern zeitaufwendig sind (vergleiche Kapitel 2.5.1), wurde die Anzahl der Aufnahmen im verwendeten Algorithmus weitestgehend minimiert: 2 Bilder für die Grobjustierung und 4 Bilder für die Feinjustierung eines Spiegels. Wie oben erwähnt wird zudem teilweise ein größeres Binning verwendet oder nur der relevante Bereich des CCD-Chips ausgelesen, um Zeit einzusparen.

Zeitbedarf eines Justiervorgangs

Es gibt eine Abschätzung für den Zeitbedarf einer Justierung eines einzelnen Spiegels, sowie eines ganzen Teleskops: In Tabelle 2.1 sind die Nettozeiten der einzelnen Justierschritte und die Anzahl der CCD-Bilder aufgelistet. Die Zeiten für Schritte, in denen CCD-Bilder gemacht werden, variieren, da die Belichtungszeit von der Helligkeit des Justiersterns abhängt.

Tatsächlich benötigte man für eine Erstjustierung eines Teleskops eine Gesamtbruttozeit von etwa zwei Wochen aufgrund diverser Einflüsse wie Wetterbedingungen und unvorgesehener Hardwarefehler. Eine Nachjustierung konnte man in zwei

Justierschritt	pro Spiegel		pro Teleskop
	Zeit	CCD-Bilder	Zeit
Konnektierung	1 sec (tagsüber)	–	} 51 h
Referenzierung	8 min (tagsüber)	–	
Grobjustierung	90 – 120 sec	2 (2x2-Binning)	} 24 h
Feinjustierung	90 – 150 sec	4	
gesamt	12 min		75 h
Rejustierung	45 – 75 sec	2	6.5 h
schnelle Rejustierung	25 – 40 sec	1 (Auslesefenster)	3.5 h

Tabelle 2.1: Dauer der Justierprozedur. Angegeben sind die Nettozeiten der Justierschritte bei einer Erstjustierung (oberer Teil), sowie die Zeiten für die Nachjustierungen (unterer Teil). In der dritten Spalte sind die Anzahl und die Art der CCD-Bilder bei der Justage eines Spiegels angegeben. [Quelle: Cornils (2006)]

Nächten durchführen, wobei man während des Messbetriebs auf Nächte mit Mondlicht zurückgreift, und so eher vier Nächte zum Nachjustieren benötigt.²⁵

Die Zeiten einer Grob-, Fein- oder Nachjustierung sind abhängig von der Geschwindigkeit der Motoren, von der Dauer des Justialgorithmus und vor allem auch vom Zeitbedarf eines Bilds der LidCCD, der sich aus Belichtungszeit und Gesamtauslesezeit²⁶ der Bilddaten zusammensetzt. Da die Justierschritte zum Teil parallel ablaufen – während ein Bild ausgelesen wird, kann ein Motor schon fahren – ist es an dieser Stelle schwer abzuschätzen, wie groß der Anteil des Zeitbedarfs durch die Gesamtauslesezeit der LidCCD-Kamera ist. Die Auslesezeit der LidCCD wird in Kapitel 2.5.1 diskutiert.

Chronologie der Spiegeljustierung

Abschließend sollen alle Spiegeljustierungen genannt werden, die bei den H.E.S.S.-Teleskopen durchgeführt wurden: Die erfolgreiche Erstjustierung an CT03 fand Anfang 2002 statt, Ende 2002 wurde der Reflektor von CT02 justiert. Dabei wurde die Erstjustierung mit einem Ersatzgewicht und einer daran angebrachten Justierplatte für die Hauptkamera durchgeführt, da diese zum jeweiligen Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt war. Es stellte sich heraus, dass bei CT02 die Justierplatte nicht im richtigen Fokus montiert war, so dass CT02 im Februar/März 2003 erneut feinjustiert werden musste. 2003 wurde CT04 justiert, und 2004 schließlich CT01. Im September/Okttober 2004 wurde erstmalig eine Rejustierung an CT04 durchgeführt und CT01 musste nochmals feinjustiert werden. Dabei wurde zum ersten Mal ein 135mm-Objektiv als Optik für die LidCCD-Kamera benutzt (siehe Kapitel 2.5.1). Seitdem wurde keines der Teleskope mehr neu- bzw. nachjustiert, was aber zum Beispiel nach einem Austausch der Spiegelfacetten notwendig ist (siehe Kapitel 5).

²⁵Aus Cornils (2006), Seite 48.

²⁶Mit Gesamtauslesezeit der LidCCD ist die Summe aus Auslesezeit des CCD-Chips und Übertragungsdauer der Bilddaten von Kamera zu Rechner gemeint (siehe Kapitel 2.5.1).

2.3.4 Abbildungsfunktion

Die H.E.S.S.-Teleskope sind so konzipiert, dass es ausreichend ist, die Spiegel einmal zu fokussieren. Danach sollten die Teleskope den Betrieb – mit unterschiedlichem Drehmoment der Hauptkamera bei unterschiedlicher Elevation des Teleskops – und äußeren Einflüssen, wie Wind und Wetter, standhalten. Um dies zu überprüfen und damit die Güte der Optik zu bestimmen, benutzt man die zweidimensionale Abbildungsfunktion (engl. *Point Spread Function*).

In Abbildung 2.7 ist die Lichtverteilung eines abgebildeten Sterns im Vergleich zu den Ausmaßen eines Pixels der PMT-Kamera – als Ergebnis einer erfolgreichen Justierung – zu sehen. Die Verteilung ist symmetrisch um den Schwerpunkt und ohne erkennbare Substruktur. Außerdem sieht man, dass die Verteilung innerhalb eines Pixels der Hauptkamera liegt, was damit der Anforderung an die Spiegeljustierung entspricht (vergleiche Anfang des Kapitels 2.3): Der 80%-Umschliessungsradius der Abbildungsfunktion beträgt hierbei $r_{80\%} = 0.023^\circ$ (0.40 mrad), wogegen das Äquivalent des sechseckigen Kamerapixels $r_{\text{hex},80\%} = 0.074^\circ$ (1.3 mrad) groß ist.

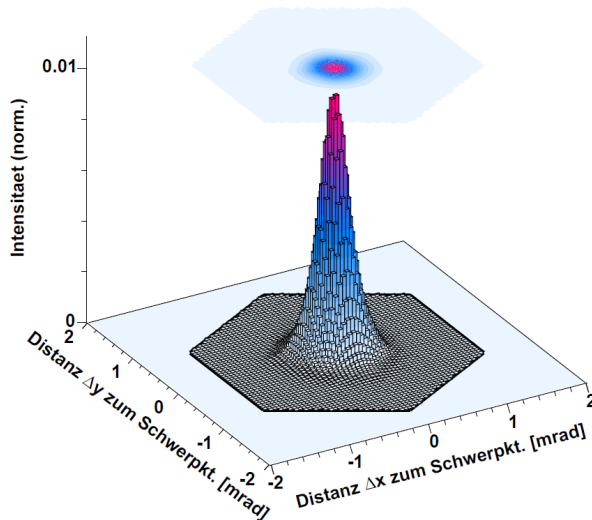


Abbildung 2.7: Intensitätsverteilung der Abbildung eines Sterns (Spica) auf dem Kameradeckel – zum Vergleich die Ausmaße eines Pixels der PMT-Hauptkamera. Lid-CCD-Bild an CT04 vom 28. Juni 2003 um 19:21:27 UTC (Belichtungszeit 6.7 Sekunden). Die Aufnahme wurde um einen homogenen Untergrund subtrahiert und die Einträge der Pixel auf den entsprechenden Wertebereich normiert. [Zeichnung aus Cornils (2006)]

Der Begriff des 80%-Umschliessungsradius und die Abbildungsfunktion soll im Folgenden erläutert werden, bevor auf die Analyse dieser an den Teleskopen eingegangen wird. Mathematisch gesehen ist die Abbildungsfunktion eine Dichtefunktion, mit der ein Eingangssignal mit der Optik gefaltet wird. Die Abbildungsfunktion spiegelt somit die resultierende Intensitätsverteilung wieder, und beinhaltet Auswirkungen aller Abbildungsfehler. Eine Punktquelle spiegelt damit im Grenzfall (Delta-Funktion) die Abbildungsfunktion der Optik wieder.

Für eine quantitative Analyse muss man eine Breite einer Intensitätsverteilung definieren. Liegt eine symmetrische Normalverteilung der Intensität vor, so kann man die Standardabweichung σ der zwei-dimensionalen Normalverteilung oder die Standardabweichung σ_{proj} der auf eine Dimension projizierten Verteilung als Breite benutzen. Diese stehen im Zusammenhang: $\sigma = \sqrt{2}\sigma_{\text{proj}}$.

Liegt nun aber keine rein symmetrische Verteilung vor bzw. gibt es einen merklichen Untergrund im Signal, hilft es einen Anteil der Verteilung zu betrachten. Ein Umschliessungsradius ist dabei der Radius eines Kreises, der einen bestimm-

ten Anteil – hier bezogen auf den Schwerpunkt – umschließt. So ist der 80%-Umschließungsradius $r_{\text{hex},80\%}$ beispielsweise der Radius eines Kreises, in dem sich 80% der Gesamtintensität der Verteilung befinden.

Betrachtet man eine Normalverteilung einer Intensität kann man schnell einen Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Umschließungsradien herstellen. Eine allgemeine zweidimensionale Normalverteilung ist definiert mit:

$$\rho(x, y) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} e^{-\frac{(x-s_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-s_y)^2}{2\sigma_y^2}}.$$

Betrachtet man den Schwerpunkt (s_x, s_y) im Ursprung, fordert Rotationssymmetrie ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{\text{proj}}$) und transformiert in Polarkordinaten (r, ϕ) , kann man die normierte Gesamtdichte I zunächst über den Polarwinkel ϕ integrieren:

$$\begin{aligned} I &= \int \int \rho(x, y) dx dy \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \rho(r, \phi) r dr d\phi \\ &= \int \frac{r}{\sigma_{\text{proj}}^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{\text{proj}}^2}} dr. \end{aligned}$$

Integriert man nun über r von 0 bis ∞ erhält man $I_\infty = 1$. Integriert man aber nun bis zu einem bestimmten Radius r_{Anteil} , erhält man einen bestimmten Anteil der Verteilung. Durch Integration mit Substitution erhält man folgenden Zusammenhang:

$$I_{\text{Anteil}} = \int_0^{r_{\text{Anteil}}} \frac{2r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} dr = e^0 - e^{-\frac{r_{\text{Anteil}}^2}{\sigma^2}}.$$

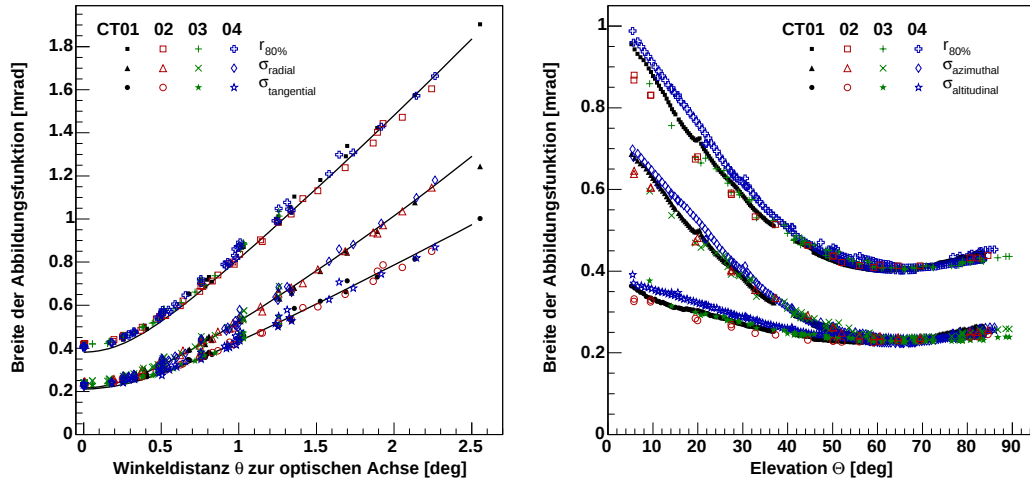
Damit erhält man für einen 80%-Umschließungsradius $r_{80\%}$:

$$\begin{aligned} r_{80\%} &= \sqrt{\ln 5} \sigma \quad \simeq \quad 1.27 \sigma \\ &= \sqrt{2 \ln 5} \sigma_{\text{proj}} \quad \simeq \quad 1.79 \sigma_{\text{proj}}. \end{aligned}$$

Es wurden im Wesentlichen drei Untersuchungen über die Veränderung der Abbildungsfunktion an den H.E.S.S.-Teleskopen durchgeführt (Cornils *et al.* 2003b): die Variation abhängig von der Winkeldistanz zur optischen Achse, die Variation in Abhängigkeit zur Elevation des Teleskops und das Langzeitverhalten der Abbildungsfunktion.

Winkeldistanz θ zur optischen Achse

Die Abhängigkeit der Breite der Abbildungsfunktion von der Winkeldistanz θ zur optischen Achse ist in Abbildung 2.8a zu sehen. Die Messungen wurden für jedes Teleskop nach einer Justierung bei einer Teleskop-Elevation von 65° durchgeführt. Neben dem 80%-Umschließungsradius sind die mittleren quadratischen Breiten in radialer und tangentialer Richtung aufgetragen. Der Verlauf ist hauptsächlich durch die Geometrie des Reflektors gegeben und die gemessene Abhängigkeit entspricht den Erwartungen für das Davies-Cotton-Design des Reflektors. Das spiegelt sich



Abbildungung 2.8: Links: Verhalten der Abbildungsfunktion mit zunehmender Winkeldistanz zur optischen Achse. Die Linien repräsentieren Ergebnisse aus einer Simulation der Abbildungsfunktion. Rechts: Verhalten der Abbildungsfunktion mit variierendem Elevationswinkel. [Zeichnungen aus Cornils (2006)]

auch darin wieder, dass für alle Teleskope der Verlauf weitestgehend identisch ist. Die Breite $r_{80\%}$ der Abbildungsfunktion lässt sich wie folgt parametrisieren:

$$r_{80\%}(\theta) = \left(r_{\theta}^2 + d_{\theta}^2 \theta^2 \right)^{1/2}.$$

Dabei ist r_{θ} die Breite auf der optischen Achse und beträgt 0.41 bis 0.42 mrad je nach Teleskop. d_{θ} beschreibt den Zuwachs pro Winkeldistanz und beträgt 0.70 bis 0.75 mrad pro Grad. Man sieht, dass ab einer Winkeldistanz von $\theta = 1.7^{\circ}$ die Breite der Abbildungsfunktion $r_{80\%}$ die äquivalente Breite eines Kamerapixels von 1.3 mrad überschreitet.

Elevation Θ

Die Verbreiterung der Abbildungsfunktion durch die Elevation des Teleskops ist im Vergleich dazu nicht so stark und bleibt über den gesamten Elevationsbereich unter 1 mrad. In Abbildung 2.8b sieht man die Abhängigkeit der Breite der Abbildungsfunktion von der Elevation Θ . Der Verlauf entspricht der Erwartung, dass sich der Spiegelträger abhängig von der Elevation des Teleskops verformt: Je nach Teleskopeinstellung wirkt durch die Hauptkamera ein verschieden großes Drehmoment. Das Minimum bei einem Elevationswinkel Θ von 55° bis 75° tritt daher auf, da in diesem Winkelbereich die Justierung stattgefunden hat. In guter Näherung lässt sich der Verlauf wie folgt beschreiben:

$$r_{80\%}(\Theta) = \left(r_{\Theta}^2 + d_{\Theta}^2 (\sin \Theta - \sin \Theta_c)^2 \right)^{1/2}$$

Hierbei ist r_{Θ} die Minimalbreite der Abbildungsfunktion, Θ_c die Position der Abbildungsfunktion im Winkel Θ und d_{Θ} gibt den Zuwachs der Breite an.

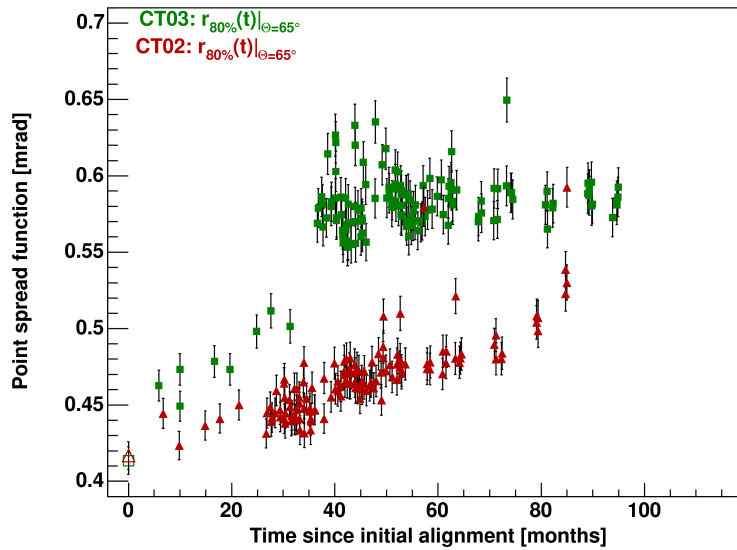


Abbildung 2.9: Zeitliche Entwicklung der Abbildungsfunktion von CT02 (rote Dreiecke) und CT03 (grüne Dreiecke) in Monaten nach der jeweiligen Erstjustierung. Bei beiden Teleskopen ist ein linearer Trend zu erkennen, wobei die Streuung zum Teil dominiert. Bei CT03 ist nach etwa 35 Monaten eine sprunghafte Verschlechterung zu erkennen, was laut Cornils (2006) eventuell auf die LidCCD und den Objektivwechsel zurückzuführen ist. [Zeichnung von S. Schwarzburg, Stand: Januar 2010]

Langzeitstabilität der Teleskopkonstruktion

Noch unkritischer sind die Auswirkungen der inelastischen Deformation des Teleskops, wie sich bei der Untersuchung der Langzeitstabilität der Teleskopkonstruktion herausgestellt hat (Abbildung 2.9). Zwar hat man herausgefunden, dass sich die Abbildungsfunktion mit der Zeit linear anwachsend verbreitert. Dennoch kann man auch etwa 90 Monate nach der Erstjustierung von einer guten Abbildungsqualität der Teleskope sprechen.

2.4 Pointing der H.E.S.S.-Teleskope

Für eine Ausrichtung der Teleskope und eine genaue Analyse der Luftschauerdaten ist es essentiell zu wissen, in welche Richtung die H.E.S.S.-Teleskope zum Zeitpunkt eines Luftschauerereignisses zeigen. Ist die Ausrichtung des Teleskops bekannt, so kann man durch Rekonstruktion der Schauerrichtung berechnen, wo sich TeV-Quellen am Himmel befinden. Die Orientierung bzw. die Ausrichtung des Teleskops wird auch als sogenanntes *Pointing* bezeichnet. Da für das *Pointing* die LidCCD in ihrer zweiten Anwendung und die sogenannte SkyCCD²⁷ zum Einsatz kommen, soll in diesem Abschnitt kurz das Konzept beschrieben werden. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf Gillessen (2004) und Braun (2007) verwiesen.

Eine genaue Bestimmung der Ausrichtung der Teleskope ist anhand relativen Messungen zu bekannten TeV-Quellen derzeit nicht möglich. Aufgrund der geringen Anzahl der Quellen, ist immer nur eine Quelle im Gesichtsfeld der Teleskope. Die Ausrichtung der Teleskope muss daher aus deren Geometrie bestimmt werden. Bei den H.E.S.S.-Teleskopen liefern die Winkelgeber an den Teleskopachsen eine erste Angabe der eingestellten Altitude und des Azimuts. Die Achsen des Teleskops können jedoch eine Neigung aufweisen und es kann eine Versetzung zwischen realer Position und der des Winkelgebers existieren. Desweiteren biegt sich der Kameramast unterschiedlich stark für verschiedene Elevationswinkel, so dass das Kamerazentrum nicht mehr auf der optischen Achse liegt.

Diese Abweichungen in der Orientierung werden beim sogenannten *Standard Pointing* in einem mechanischen Modell des Teleskops beschrieben. Dabei werden die Koordinaten des Teleskops über bestimmte Parameter einer Transformationsmatrix mit den Koordinaten der Hauptkamera verknüpft. In einem SkyLid-Modell bringt man die Lage der SkyCCD und der LidCCD in Zusammenhang.

Um die benötigten Parameter zu bestimmen, richtet man die Teleskope in sogenannten *pointing runs*²⁸ zu unterschiedlicher Elevation auf verschiedene Sterne. Der Kameradeckel ist dabei geschlossen, damit die LidCCD die Position der Sternabbilder und die Position der acht LEDs des Kameradeckels registrieren kann. Zunächst wird das Abbild eines Sterns aufgenommen. Dabei muss man teilweise bis zu einer Minute belichten und liest danach den Teilbereich mit dem Sternabbild des CCD-Chips aus. Direkt danach erfolgt ein zweites Bild, welches 0.1 Sekunden belichtet wird und als Vollbild ausgelesen wird, um die LEDs zu sehen. Daraus kann man die Lage der Hauptkamera rekonstruieren.

Während der zwei LidCCD-Aufnahmen beobachtet die SkyCCD parallel zur optischen Achse des Teleskops an der Hauptkamera vorbei einen Himmelsausschnitt, und sieht somit den Stern direkt. Dabei wird ungefähr alle zwei Sekunden ein Bild aufgenommen, siehe Tabelle 2.2. Anhand der bekannten absoluten Sternpositionen und den mit der LidCCD beobachteten Sternpositionen auf dem Kameradeckel kann man das mechanische Modell des Teleskops berechnen. Wendet man diese Methode des *Standard Pointings* an, so erreicht man nachträglich eine Genauigkeit von 20'' für die Ausrichtung der Teleskope während der eigentlichen Luftschauerdetek-

²⁷Diese beiden CCD-Kameras an den H.E.S.S.-Teleskopen werden im nächsten Kapitel 2.5 ausführlich behandelt.

²⁸Während einer einmonatigen Beobachtungsschicht werden etwa 80 *pointing runs* durchgeführt.

tion (*observation run*).

Teleskop CT	01	02	03	04	01	02	03	04
CCD-Kamera	LidCCD				SkyCCD			
Bilder pro <i>pointing run</i>	je 2				je 10			
Bilder pro <i>observation run</i>	15	15	16	15	28	17	35	17

Tabelle 2.2: Aufgelistet ist exemplarisch die Anzahl der CCD-Bilder, die während des Betriebs der H.E.S.S.-Teleskope von der LidCCD und der SkyCCD aufgenommen wurden. Beide *runs* wurden am 5.11.2009 durchgeführt. Der exemplarische *pointing run* hat die Nummer 54436, wurde auf den Stern HIP26634 gerichtet und dauerte etwa 50 Sekunden. Eines der zwei LidCCD-Bilder während eines *pointing run* ist ein Vollbild, das zweite ein Teilbild (300x300 Pixel). Der exemplarische *observation run* hat die Nummer 54422, beobachtete dabei das Objekt H 2356-309 und dauerte etwa 28.5 Minuten. [Quelle: H.E.S.S.-Rohdaten]

Neben dieser Standardmethode gibt es noch ein zweites Verfahren, das sogenannte **Precision Pointing**. Dabei fließen zusätzliche Bilder der SkyCCD und der LidCCD ein, die während eines *observation runs* – also bei offenem Kameradeckel – gemacht werden. Mit den Bildern der LidCCD wird dabei die Kameraposition anhand der LEDs bestimmt, und mit den Bildern der SkyCCD sieht man die Sterne, auf die das Teleskop gerichtet ist. Die Anzahl der Bilder variiert je nach Teleskop und Übertragungserfolg wie man in Tabelle 2.2 sieht. Die aktuelle Ausrichtung zum Zeitpunkt eines SkyCCD-Bildes kann man somit mit der Teleskopstruktur in Zusammenhang bringen und das verbleibende Mispointing²⁹ bestimmen. Mit dieser Methode kann man eine Genauigkeit von 6'' pro Teleskopachse erreichen (van Eldik *et al.* 2007).

Der Vorteil dieser Methode ist, dass man sie auch während der eigentlichen Luftschauerdetektion – also während eines *observation runs* – anwenden kann. Im Prinzip würde eine solche direkte Beobachtung während des Messbetriebs ausreichen. Diese Methode ist jedoch mit einem hohen Aufwand bei der Auswertung der CCD-Bilder verbunden und wird daher nur für vereinzelte Quellen zur Zeit angewandt.

²⁹Damit ist die verbleibende Abweichung zum verwendeten Pointing-Modell gemeint.

2.5 CCD-Kameras der H.E.S.S.-Teleskope

Da in dieser Arbeit die Untersuchung zur Verbesserung der LidCCD im Mittelpunkt steht, soll in diesem Kapitel zusammengefasst werden, was der momentane Status der CCD-Kameras bei den H.E.S.S.-Teleskopen ist. Bevor im Detail auf die Eigenschaften der Hardware und der Software, die mit den CCD-Kameras bei H.E.S.S. zusammenhängen, eingegangen wird, soll zuvor noch mal die Benutzung von CCD-Kameras motiviert und zusammengefasst werden (Kapitel 2.3 und 2.4).

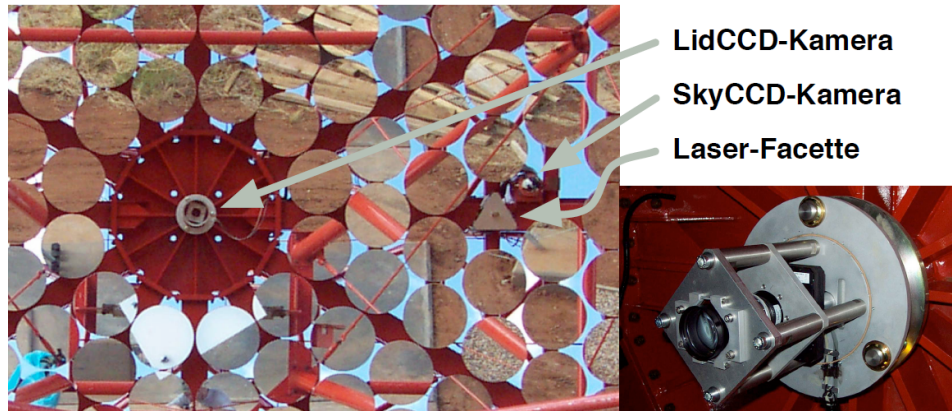


Abbildung 2.10: LidCCD-Kamera, SkyCCD-Kamera und Laserfacette an CT03. Das Bild stammt aus der Zeit der Erstjustierung: Man sieht das noch nicht alle Spiegel justiert sind. Außerdem ist die weiße Justierplatte des Ersatzgewichts für die PMT-Kamera zu sehen, welche anfänglich als Kameradeckel diente. Rechts sieht man die LidCCD in ihrer Halterung mit abmontierten Schutzdeckel. [Photos: M. Beilicke]

Da die Hauptkamera, mit der Anordnung aus PMTs, zu grob gerastert ist, kann damit die Abbildungsfunktion nicht ausreichend gut aufgelöst werden. Zwar konnte man mit der Methode der *Pointing Runs* bei HEGRA, die Ausrichtung der Teleskope relativ genau bestimmen (Pühlhofer *et al.* 1997). Doch die Benutzung der PMT-Kamera für Kalibrationsmessungen war umständlich und zeitlich aufwendig.

Eine CCD-Kamera hat dagegen eine hohe Auflösung und eine vergleichsweise schnelle und einfache Bildgewinnung. Bei H.E.S.S. hat sich gezeigt, dass man mit einer CCD-Kamera ausreichend gut die Optik der Teleskope unter realen Bedingungen untersuchen kann: Durch Beobachtung und Analyse der Abbildungsfunktion mit der LidCCD hat man die (optischen) Eigenschaften des Teleskops besser kennengelernt (Kapitel 2.3.4). Die LidCCD als optische Rückkopplung ist eine wichtige Komponente der Spiegeljustierung (Kapitel 2.3.1). Außerdem kann man wegen einer höheren Empfindlichkeit der CCD-Kamera gegenüber des menschlichen Auges auch (lichtschwache) Sterne zur Justierung der Spiegel benutzen. Die zweite Anwendung, in der die LidCCD benutzt wird, ist die Bestimmung der Lage von Sternabbildern und den LEDs des Kameradeckels. Somit erhält man einen Rückschluss, inwieweit die Ausrichtung des Teleskops zur nominellen abweicht (Kapitel 2.4).

Neben der LidCCD (Kapitel 2.5.1) gibt es noch eine weitere CCD-Kamera an einem H.E.S.S.-Teleskop: die SkyCCD (Abbildung 2.10 und Kapitel 2.5.2). Zusammen sind LidCCD und SkyCCD wichtige Komponenten für ein Verständnis, wohin

ein H.E.S.S.-Teleskop gerichtet ist (*Pointing*). Bei H.E.S.S. gibt es momentan also insgesamt acht CCD-Kameras: An jedem der vier H.E.S.S.-Teleskope ist jeweils eine LidCCD und eine SkyCCD zur Kontrolle der Optik installiert.

2.5.1 LidCCD

In Hofmann (1998) wird die Idee der Benutzung einer CCD-Kamera für die Spiegeljustierung anhand von Sternbildern für H.E.S.S. zum ersten Mal erwähnt. Dort wurden auch erste Überlegungen über die Anforderungen an eine CCD-Kamera gemacht. Die erste Anforderung an eine CCD-Kamera, die das Abbild eines Sterns auf dem Kameradeckel beobachtet, lautete, dass die Kamera diesen Lichtfleck einer Spiegelfacette aus 380 Lichtflecken sehen und auflösen kann. Das bedeutet zunächst, dass zum einen ein ausreichend großes Gesichtsfeld notwendig ist, welches den Kameradeckel einfängt, und dass die optische Auflösung genügend hoch sein muss. Zum anderen bedeutet das, dass der CCD-Chip der Kamera eine ausreichende Sensitivität besitzt.

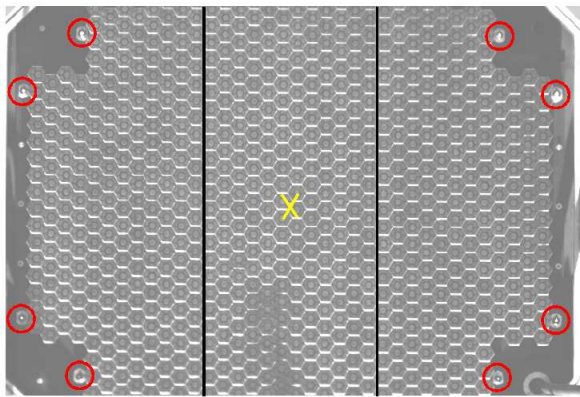


Abbildung 2.11: Gesichtsfeld der LidCCD. Das Bild wurde bei Mondlicht und geöffnetem Kameradeckel gemacht. Zu sehen ist deutlich die hexagonale Struktur der einzelnen Detektorelemente der PMT-Hauptkamera. Die roten Kreise markieren die acht Positions-LEDs, das gelbe Kreuz die Mitte der Hauptkamera.

[Photo: I. Braun]

Die Größe des Gesichtsfeldes und die Auflösung hängt dabei massgeblich von der Optik – also der Wahl des Objektivs – und der Pixelgröße des CCD-Chips ab, der Auflösungsbereich vom dynamischen Bereich³⁰ des CCD-Chips. Bei der Sensitivität gehen Größen wie der Photonenfluss der Sternabbilder, die Quanteneffizienz und die Rauscheigenschaften des CCD-Chips, sowie Belichtungszeiten der CCD-Kamera mit ein. In den folgenden zwei Unterkapiteln wird beschrieben, was die Eigenschaften der momentan installierten LidCCD sind. Es sei angemerkt, dass einige CCD-spezifischen Größen erst in späteren Kapiteln dieser Arbeit erklärt werden (Kapitel 4.2).

Platziert ist die LidCCD im Schnittpunkt der optischen Achse des Teleskops mit der Reflektorebene (Abbildung 2.10). Die Kamera ist parallel zur optischen Achse des Teleskops ausgerichtet, sodass sie im Idealfall die Hauptkamera mittig im Blickfeld hat. Eine Aufnahme, die das Gesichtsfeld der LidCCD zeigt, ist in Abbildung 2.11 zu sehen. Die Kamera samt Objektiv ist in einem wetterfesten Gehäuse

³⁰Mit dynamischer Bereich ist der Bereich gemeint, in dem die Pixel eines CCD-Chips von einem Nulllevelwert bis zu einem Sättigungswert unterschiedliche Helligkeitsintensität abbilden können.

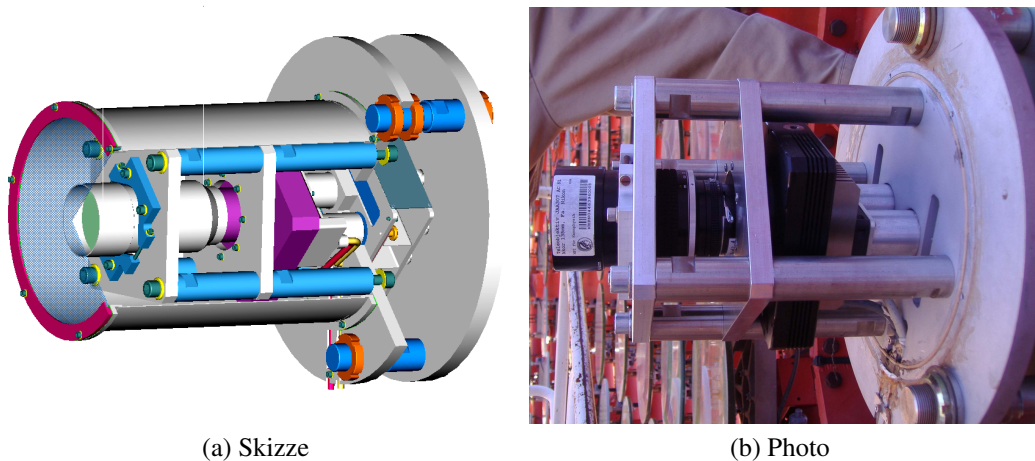


Abbildung 2.12: In der Zeichnung (links) ist die Schutzröhre mit dem Glas auf der Oberseite angedeutet; auf dem Photo (rechts) ist der Schutzdeckel abgenommen. Die Kamera ist samt Objektiv in einen Turm eingespannt bzw. festgeschraubt. Unter der Kamera sieht man zwei Röhren, die von den Lüftern an der Kameraunterseite nach außen eine Verbindung herstellen und so für die nötige Zu- und Abluft sorgen. Die runde Grundplatte ist mit drei dicken Bolzen mit dem Teleskop verschraubt. Die Bolzen erlauben zudem die Feinausrichtung der LidCCD. [Zeichnung: Gillessen (2004), Photo: H.-S. Zechlin, Dezember 2009]

untergebracht, welches außerdem für die nötige Stabilität am Teleskop sorgt (Abbildung 2.12).

CCD-Kamera Ap2Ep

Das Kameramodell, welches als LidCCD momentan an allen vier H.E.S.S.-Teleskopen installiert ist, ist eine Ap2Ep von Apogee Instruments Inc. (Apogee 2010). Eine am Teleskop installierte Kamera ist auf dem rechten Photo in Abbildung 2.12b zu sehen. Die Datenblätter der LidCCD-Kameras konnten nicht mehr ausfindig gemacht werden.³¹ Daher sind die Spezifikationen der Kamera aus der Literatur der H.E.S.S.-Kollaboration entnommen. Diese sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Die Eigenschaften, die als entscheidendes Kriterium bei der Wahl dieses Kameramodells eine Rolle spielten werden im Folgenden näher erläutert, bevor die Dauer der Auslese diskutiert wird.

In der internen Mitteilung von Gillessen (2001) wurden mögliche CCD-Kameras für die H.E.S.S.-Teleskope gegenübergestellt. Das Ap2Ep-Modell wurde nach verschiedenen Kriterien ausgewählt, die im Folgenden näher behandelt werden. Entscheidende Kriterien für die Wahl einer Kamera waren eine ausreichende Größe des CCD-Chips, eine ausreichende digitale Auflösung³², eine geeignete Software-

³¹Bei einer Anfrage beim Hersteller Apogee, antwortete Chwseng Thao am 6.01.2010: „I was able to locate the serial numbers for your cameras, A1741, A1742, A1743 and A1820. Although I could not find the matching data sheets to accompany these cameras. Some files were lost due to a server crash.“

³²Mit digitaler Auflösung ist die Abstufung der Pixelwerte in ihrer digitalen Form gemeint. Bei einer 16 Bit-Auflösung können die Pixel digitale Werte von 0 bis $2^{16} - 1 = 65535$ annehmen. Diese

unterstützung zur Ansteuerung und bestimmte Auslesemodi. Es hat sich gezeigt, dass für solche Anforderungen nur CCD-Kameras in Frage kommen, die speziell für die optische Astronomie oder andere wissenschaftliche Anwendung konzipiert wurden: Diese Hochleistungskameras besitzen ein aufwändiges Kühlsystem aus Lüftern, Kühlkörpern und einem Peltier-Element³³, um den CCD-Chip zu kühlen und so dessen Sensitivität zu steigern.

Kamera	Apogee Ap2Ep
CCD-Chip	Kodak KAF-1600
Chipgröße	1536 x 1024 Pixel
Pixelgröße	9 μm x 9 μm
Digitale Auflösung	16 Bit
Kapazität	100,000 e ⁻
Ausleserate	50 kHz
Ausleserauschen	15 e ⁻ .
Dunkelstrom	0.15 e ⁻ / sec (-25°)
Bias	2700 (Petz 2002)
Anschluss	PPI-Port
Gesamtauslesezeit	40 bis 60 Sekunden
Optik	Nikkor 135mm/2
Brennweite f	135 mm
Öffnungsverhältnis	f/2
Gesichtsfeld	5.86° x 3.91° (102.3 mrad x 68.2 mrad)
Auflösung	13.8'' (0.067 mrad) pro Pixel

Tabelle 2.3: Technische und optische Spezifikationen der LidCCD. Im oberen Teil sind wichtige Spezifikationen für das Kameramodell Apogee Ap2Ep aufgelistet. Die CCD-spezifischen Größen werden zum Teil erst in folgenden Kapiteln dieser Arbeit erklärt. Im unteren Teil sind die Spezifikationen der Optik der LidCCD aufgeführt (vergleiche nächsten Teilabschnitt).

Bei der Wahl der **Größe des CCD-Chips** konkurrieren zwei Größen miteinander: Zum einen will man ein großes Gesichtsfeld und zum anderen ist eine hohe Auflösung wünschenswert. Gillessen fand für die Größe des Chips folgenden Kompromiss: Für eine ausreichende Auflösung von 10'' (0.05 mrad) pro Pixel und einem Gesichtsfeld von 3° würde man einen Chip mit $\frac{3^\circ \text{ Gesichtsfeld}}{10'' \text{ pro Pixel Auflösung}} = 1080 \times 1080$ Pixeln benötigen³⁴. Die gewählte Chip-Größe von 1536 x 1024 Pixeln genügt damit

Auflösung ist aber auch abhängig von der Ladungskapazität eines CCD-Pixels und dem dazugehörigen Umrechnungsfaktor (Gain): In diesem Fall ergibt eine Kapazität von 100000 e⁻ (Tabelle 2.3) einen Umrechnungsfaktor von etwa 1.5 e⁻ pro digitale Einheit. Das bedeutet der Umrechnungsfaktor liegt nahe bei 1 und damit nahebei einer identischen Quantelung von Ladung und digitalem Wert. Die digitale Auflösung wird manchmal mit dem dynamischen Bereich verwechselt bzw. gleichgesetzt. Vergleiche dazu bspw. Howell (2006).

³³Ein Peltier-Element ist ein elektrothermisches Bauteil, welches bei einem Stromdurchfluss eine Temperaturdifferenz erzeugen kann.

³⁴Die Angaben für Auflösung und Gesichtsfeld sind dabei in zwei Dimensionen zu verstehen, da es sich hier um einen symmetrischen Fall handelt.

der Abschätzung. Die genaue Auflösung und das Gesichtsfeld werden erst durch die Wahl einer bestimmten Optik genau festgelegt, was im nächsten Abschnitt behandelt wird.

Die **digitale Auflösung** wurde von Cornils (2006) wie folgt abgeschätzt: Um den Lichtfleck eines Spiegels vom Hauptlichtfleck – der sich im Extremfall aus den Lichtflecken aller anderen Spiegel zusammensetzt – unterscheiden zu können, braucht man als allerunterste Grenze eine digitale Auflösung mit $2^x = 380$ Einträgen. Das wären $x = 8.57$ Bit. Zusammen mit dem Rauschverhalten des CCD-Chips, wofür man 4-5 Bit rechnet, kommt man auf 14 Bit als unterste Grenze. Die gewählte Kamera mit einer digitalen Auflösung von 16 Bit – also 65536 digitalen Einträgen pro Pixel – verfügt somit noch über eine Sicherheitsreserve.

Ein weiteres entscheidendes Kriterium bei der Wahl des Kameramodells war die **Softwareunterstützung zur Ansteuerung** der Kamera. Um die Ansteuerung über die Software von H.E.S.S. zu bedienen, braucht man ein Kameramodell, welches mit Treibern für das Betriebssystem Linux ansprechbar ist. Für die verschiedenen Kameras von Apogee stellt The Random Factory (Mills 2010) eine umfangreiche Sammlung an Treibern in Form von Bibliotheken für Linux zu Verfügung.

Außerdem verfügt das Ap2Ep-Modell über **verschiedene Auslesemodi**: Damit besteht die Möglichkeit den CCD-Chip in einem Binningmodus oder nur einen Teilbereich des Chips auszulesen. Diese Optionen sind wünschenswert, um an geeigneter Stelle somit die Auslesezeiten zu verringern (Kapitel 2.3.3).

Abschließend soll hier noch die **Gesamtauslesezeit der LidCCD** diskutiert werden, die für einen Vergleich mit einer neuen CCD-Kamera relevant ist. Die Gesamtauslesezeit der LidCCD setzt sich aus der Auslesezeit des CCD-Chips und der Übertragungsdauer der Bilddaten von der Kamera über ein 50 Meter langes Kabel zum Steuerungsrechner zusammen. Die Übertragungsdauer ist dabei vom Übertragungsprotokoll bzw. der Art des Anschlusses abhängig. Auf das Protokoll bzw. den Anschluss PPI³⁵ der LidCCD wird in den folgenden Kapitel 2.5.3 und 3.1 näher eingegangen.

Zunächst kann die Auslesezeit für ein Vollbild (*full-frame readout time*) über die Ausleserate des CCD-Chips abgeschätzt: Die Auslesezeit für den gesamten Chip beträgt demnach etwa $\frac{1536 \times 1024}{50 \text{ kHz}} = 32$ Sekunden. Eine Angabe zur reinen Übertragungsdauer wurde nicht gefunden. Jedoch findet man in der Literatur zu H.E.S.S. verschiedene Angaben für die Gesamtauslesezeit der LidCCD: In Cornils *et al.* (2003b) sind für ein „full-frame readout“ 45 Sekunden angegeben; in seiner Dissertation (Cornils 2006) ca. 50 Sekunden die Rede; Braun spricht ebenfalls von 50 Sekunden Auslesezeit für ein Vollbild (Braun 2007); und Gillesen (Gillesen 2004) spricht sogar von „rund einer Minute“ Dauer bei einer Vollbildauslese.

In der Arbeit von Petz (2002) wurden die Gesamtauslesezeiten für ein Vollbild über ein 60 Meter langes, abgeschirmtes Datenkabel im Labor gemessen. Dabei hängt die Dauer von der Wahl des Parameters PPRepeat ab, der für lange Kabel in der Software angepasst werden muss. Die Einstellungen für die verschiedenen LidCCDs bei H.E.S.S. unterscheiden sich, wie in Tabelle 2.4 zu sehen ist.³⁶ Danach

³⁵Abkürzung für *Parallel Port Interface*, was im Folgenden auch mit Parallel-Port und Druckeranschluss gleichgesetzt wird.

³⁶Die Werte wurden dem Quellcode der DAQ-Software entnommen (Stand Dezember 2009). In

PPRepeat	Gesamtauslesezeit	Einstellung für...
1	–	–
2	39 sec	CT01 und CT02
3	45 sec	CT04
4	54 sec	–
5	61 sec	CT03

Tabelle 2.4: Aufgelistet sind die Auslesezeiten der Ap2Ep, die Labor vermessen wurden (Petz 2002), bei verschiedenen PPRepeat-Werten für ein 60 Meter langes Kabel. Für den Wert 1 gibt es wegen Reflexionen bei einer solchen Kabellänge keine sinnvolle Auslesewerte des Chips. In der dritten Spalte ist zu erkennen, für welches Teleskop, welche Einstellung gewählt wurde (vergleiche Fußnote 36).

kann man abschätzen, dass die Gesamtauslesezeit der LidCCD je nach Teleskop 40 bis 60 Sekunden für ein Vollbild beträgt.

Optik der LidCCD

Anfangs waren die LidCCDs jeweils mit einem Festbrennweitenobjektiv Nikkor 180mm/2.8 ED (Brennweite von 180 mm) ausgestattet. Mit diesem Objektiv hatte die LidCCD nur maximal drei Positions-Leuchtdioden in ihrem Gesichtsfeld. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Präzision beim Pointing stark von der Anzahl der zu sehenden Positions-LEDs abhängt. Daraufhin wurde im Herbst 2004 an alle LidCCD-Kameras jeweils das hochlichtstarke Festbrennweitenobjektiv Nikkor 135mm/2 angebracht (Abbildung 2.13).



Abbildung 2.13: Das hochlichtstarke Festbrennweitenobjektiv Nikkor 135mm/2 aus verschiedenen Perspektiven. [Photos: www.mir.com.my]

Das Objektiv besteht aus sechs Linsen und hat einen maximalen Bildwinkel von 18° . Der obere Durchmesser beträgt 80.5 mm und ist 103 mm insgesamt lang, wobei die Länge zur Montierung 93.5 mm beträgt. Das Objektiv verfügt über einen standardmäßigen Bajonettverschluss der Firma Nikon (F-Mount).

der Datei `onlineccd/src/Controller2.C` ist die Ansteuerung der LidCCD implementiert. Die Methode `set_defaults_lidccd()` in Zeile 1228 der Klasse `Controller2_i` enthält die Default-Werte für die LidCCDs. Näheres dazu in Kapitel 2.5.3.

Mit einer Brennweite von 135 mm und einer Pixelgröße von $9\text{ }\mu\text{m}$ ergibt sich eine Auflösung von $13.8''$ (0.067 mrad) – nach Gleichung 2.1. Danach hat die LidCCD mit einer CCD-Chipgröße von 1536×1024 Pixeln ein Gesichtsfeld von $5.86^\circ \times 3.91^\circ$ ($102.3\text{ mrad} \times 68.2\text{ mrad}$). Damit ist es möglich, alle acht Positions-Leuchtdioden ins Gesichtsfeld der LidCCD zu bringen – wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist.

2.5.2 SkyCCD

Im Gegensatz zur LidCCD lauten die Grundanforderung an die SkyCCD: Die Auflösung muss nicht besonders hoch sein, dafür muss die Ausleserate hoch und die Gesamtauslesezeit gering sein, damit man das Nachführen des Teleskops kontinuierlich überwachen kann (Kapitel 2.4). Die SkyCCD befindet sich etwa 3 Meter von der LidCCD – also der optischen Achse – entfernt in der Reflektorebene (Abbildung 2.10). Ihr Blick verläuft parallel zur optischen Achse an der Hauptkamera vorbei: Dadurch ist ein Ausschnitt des Himmels (*sky*) zu sehen.

Kamera	Apogee Ap1E
Chip-Sensor	Kodak KAF-400E
Chip-Größe	768×512 Pixel
Pixel-Größe	$9\text{ }\mu\text{m} \times 9\text{ }\mu\text{m}$
Digitale Auflösung	14 Bit
Kapazität	$85,000\text{ e}^-$
Ausleserate	50 kHz
Ausleserauschen	15 e^-
Dunkelstrom	$0.15\text{ e}^- / \text{sec}$ (-25°)
Anschluss	PCI-Port / ISA-Port
Gesamtauslesezeit	etwa 1 Sekunde
Optik	Vixen NA 120S Refraktor
Brennweite f	800 mm
Öffnungsverhältnis	$f/6.7$
Gesichtsfeld	$0.50^\circ \times 0.33^\circ$ ($8.6\text{ mrad} \times 5.8\text{ mrad}$)
Auflösung	$2.3''$ (0.011 mrad) pro Pixel

Tabelle 2.5: Technische und optische Spezifikationen der SkyCCD. Im oberen Teil sind wichtige Spezifikationen für das Kameramodell Apogee Ap1E aufgelistet. Die CCD-spezifischen Größen werden zum Teil erst in folgenden Kapiteln dieser Arbeit erklärt. Im unteren Teil sind die Spezifikationen der Optik der SkyCCD aufgeführt.

Das Kameramodell Ap1E ist ebenfalls von der Firma Apogee – die Spezifikationen sind in Tabelle 2.5 aufgelistet. Die Optik ist ein Refraktor der Firma Vixen mit einer Brennweite von 800 mm. Die daraus resultierende Auflösung und das Gesichtsfeld³⁷ und die Auflösung³⁸ der SkyCCD sind ebenfalls in Tabelle 2.5 zu

³⁷Nach Formel 2.1 mit $f = 800\text{mm}$ und $a = 768 \times 9\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $a = 512 \times 9\text{ }\mu\text{m}$.

³⁸Nach Formel 2.1 mit $f = 800\text{mm}$ und $a = 9\text{ }\mu\text{m}$.

finden. Die Übertragungsprotokolle und die Anschlüsse PCI³⁹ bzw. ISA⁴⁰ der SkyCCD werden in den folgenden Kapiteln 2.5.3 und 3.1 zusammen mit den Übertragungsprotokoll PPI der LidCCD näher erläutert und diskutiert.

2.5.3 Ansteuerung der CCD-Kameras

Zur Ansteuerung der Komponenten an den H.E.S.S.-Teleskopen benutzt man Kabel, die speziell verlegt sind: Damit die Kabel sich nicht verdrillen, wenn das Teleskop seine Orientierung ändert, werden diese durch die Spiegelträgeraufhängung zum Boden geführt – wie schematisch in Abbildung 2.14 angedeutet ist. Für den nötigen Blitzschutz handelt es sich dabei um abgeschirmte Kabel.

Verkabelung der CCD-Kameras

Im Falle der CCD-Kameras verlaufen Datenkabel sowie Kabel zur Stromversorgung von den Kameras selbst zunächst in der Elektronikbox (*electronic box*), die hinter dem Spiegelträger platziert ist, zentral zusammen. Von da aus verlaufen sie durch die Teleskopaufhängung bis zur Elektronikhütte (*electronic hut*), wo sie an die entsprechenden Steuerungseinheiten angeschlossen sind (Abbildung 2.14). Dadurch haben die Kabel für die CCD-Kameras eine physikalische Länge von 50 Metern.

Die Netzteile der CCD-Kameras sind an die Stromversorgung (blaue Kabel) der Elektronikbox angeschlossen. In der Elektronikhütte befindet sich eine Steuerungseinheit, mit der man über einen jeweiligen Schalter die Kameras einzeln an- und ausschalten kann (vergleiche Abbildung 4.18). Die Kameras werden in der Regel nicht ausgeschaltet. Das bedeutet, dass die Luftkühler der Kameras zwar stets laufen, doch die aktive Kühlung der CCD-Kamera erst beim Messbetrieb der Teleskope über die entsprechende Software an- und ausgeschaltet wird.

Beide CCD-Kameras eines Teleskops – LidCCD und SkyCCD – sind über Datenkabel mit dem sogenannten ht0x-Rechner⁴¹ in der Elektronikhütte verbunden. Die Datenkabel für beide Kameras sind vom selben Typ und haben jeweils 37 Drähte als Leitungen, obwohl die Kameras über unterschiedliche Anschlüsse verfügen. Damit kann man beispielsweise bei einem Defekt eines Datenkabels, das Datenkabel der anderen CCD-Kamera benutzen (Beilicke & Petz 2002).

Das Datenkabel der SkyCCD (grünes Kabel) benötigt dabei alle 37 Drähte: Die SkyCCD (Ap1E) ist über ihren PCI/ISA-Anschluss an den entsprechenden Port des ht0x-Rechners angeschlossen. Eine *Remote Boost Unit* (RBU), welche ebenfalls in der Elektronikbox untergebracht ist, verstärkt dabei das Signal, was wegen der Länge des Kabels und der Art des Übertragungsprotokolles notwendig ist.

Das Datenkabel der LidCCD (rotes Kabel) dagegen benötigt nur 25 der 37 Drähte, da die LidCCD (Ap2Ep) über ein PPI-Protokoll angesteuert wird. Die LidCCD

³⁹Abkürzung für *Peripheral Component Interconnect*, was einen bestimmten Bus-Standard bezeichnet.

⁴⁰Abkürzung für *Industry Standard Architecture*, was ebenfalls einen Bus-Standard bezeichnet.

⁴¹Das x steht in diesem Falle für die Nummer des jeweiligen Teleskops, zum Beispiel steht der ht01-Rechner in der Elektronikhütte von CT01.

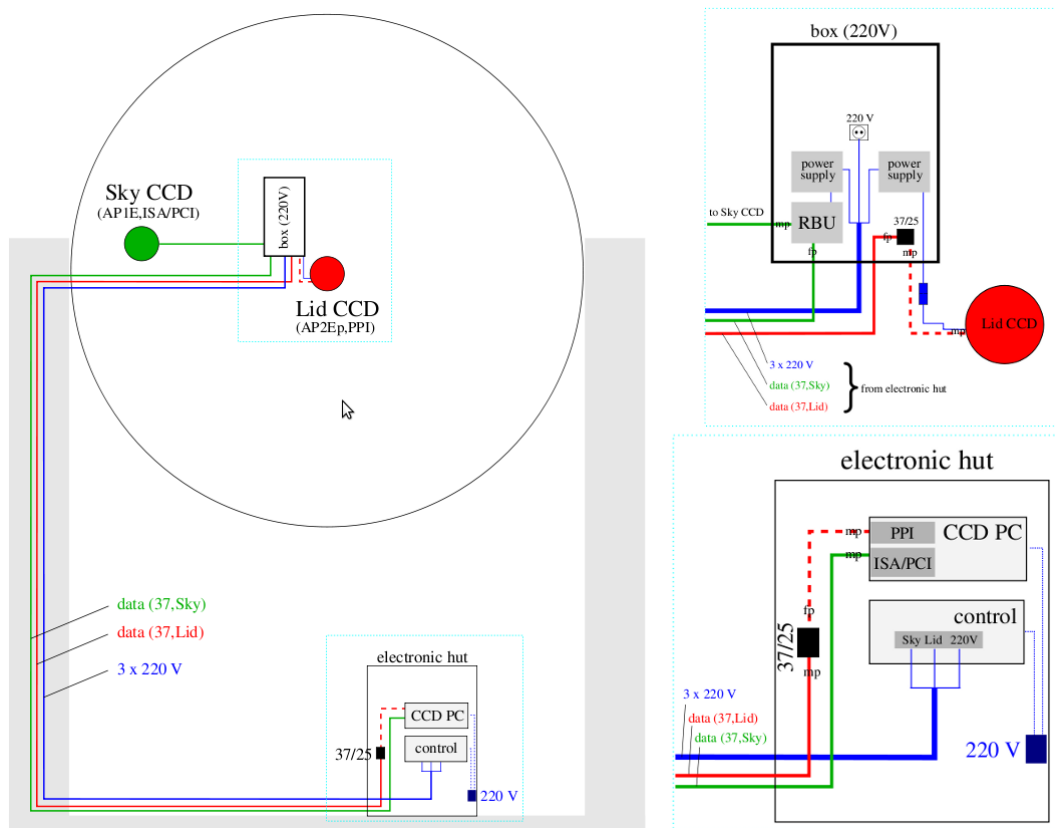


Abbildung 2.14: Die Verkabelung der CCD-Kameras LidCCD und SkyCCD. Links: Schematische Zeichnung wie die CCD-Kameras am dish mit der electronic hut verbunden sind. Rechts oben: detaillierte Zeichnung der Verkabelung in der electronic box am dish. Rechts unten: detaillierte Zeichnung der Verkabelung in der electronic hut. [Informationen und Zeichnungen aus Beilicke (2004)]

ist somit an den Druckeranschluss des ht0x-Rechner angeschlossen, wobei zwei Kabeladapter (schwarze Quadrate „37/25“) dazwischengeschaltet sind.

Auf den ht0x-Rechnern laufen jeweils die Treiber für diese speziellen Anschlüsse zur Kommunikation mit den CCD-Kameras, welche in einer Schnittstelle implementiert sind. Diese Rechner sind an das lokale Netzwerk angeschlossen, und somit kann in diesem Falle die Software der DAQ⁴² auf die Kameras zugreifen. So werden zum Beispiel die Kameras bei einem *pointing run* oder einem *observation run* angesteuert und es können CCD-Bilder für das Pointing gemacht werden (Kapitel 2.4).

Die CCD-Kameraschnittstelle und der Zugriff darauf von MACS und der DAQ wird im Folgenden näher erläutert. Die CCD-Kameratreiber und die CCD-Kameraschnittstelle sind in der Programmiersprache C++ geschrieben. Die Rechner bei H.E.S.S. werden mit Linux-Betriebssystemen gesteuert. Daher treten im Folgenden

⁴²DAQ steht für *data acquisition*. Im Falle von H.E.S.S. kümmert sich die DAQ-Gruppe um die Datennahme des gesamten Teleskopsystems. Damit die DAQ-Software auf die Komponenten eines Teleskops – wie zum Beispiel die CCD-Kameras – zugreifen kann, wird jeweils eine Schnittstelle zur Steuerung benötigt. Diese Schnittstelle zwischen DAQ-Software und beliebiger Komponente heißen bei H.E.S.S. Controller.

Begriffe auf, die etwa in Prinz & Kirch-Prinz (2002) für C++ und in Plötner & Wendzel (2008) für Linux erklärt werden.

CCD-Kameraschnittstelle

Um eine CCD-Kamera über einen Rechner mit einer Software anzusteuern, müssen auf dem Rechner die nötigen Treiber installiert sein, um mit der angeschlossenen CCD-Kamera zu kommunizieren. Die Treiber für verschiedene Modelle von CCD-Kameras wurden von Petz (2002) in der sogenannten CCD-Kameraschnittstelle für H.E.S.S. implementiert. Dadurch können unterschiedliche Programme über ein einheitliches Protokoll auf die Kameraschnittstelle zugreifen und somit eine CCD-Kamera – im Falle von H.E.S.S. die LidCCDs und SkyCCDs – bedienen. Dabei muss der Benutzer bzw. der Programmierer der Software nicht notwendigerweise wissen, wie genau die Treiber aussehen und funktionieren – lediglich die einheitlichen Methoden der Schnittstelle sind relevant (vergleiche auch Kapitel 4.1).

In der CCD-Kameraschnittstelle von H.E.S.S. sind momentan vier Kameramodelle implementiert: die Apogee Ap2Ep mit PPI-Anschluss (aktuelle LidCCD), die Apogee Ap1E mit ISA- oder PCI-Anschluss (aktuelle SkyCCD) und die Sbig ST7⁴³. Die Treiber für die verschiedenen Apogee-Kameras werden von Mills (2010) bereitgestellt. Diese Treiber sind Bibliotheken (engl. *libraries*), die Objekte wie zum Beispiel Klassen beinhalten. Die Methoden der Klassen haben unterschiedliche Funktionalitäten, mit denen man die entsprechende Kamera bedienen kann.

Die Schnittstelle beinhaltet für jedes dieser Kameramodelle eine eigene Klasse, die von der abstrakten Basisklasse `CCDCamera` abgeleitet wurden.⁴⁴ In dieser Basisklasse werden die Methoden deklariert, die zur Bedienung benutzt werden – auf die also in der Benutzersoftware zugegriffen wird. In den abgeleiteten Klassen für das jeweilige Kameramodell werden diese Methoden dann mit den entsprechenden Treibermethoden gefüllt. So beinhaltet die Kameraschnittstelle Methoden wie zum Beispiel `StartCamera` zum Starten der Kamera, `GetCameraStatus` als Abfrage des Kamerastatus, `StartCooling` zum Starten des Kühlers oder `TakeImage`, um ein Bild aufzunehmen. Außerdem wird in der Klasse `CCDCamera` noch eine Aufzählung (*enumeration*) `Status` definiert⁴⁵, die den aktuellen Status der Kameraschnittstelle angibt. Dadurch lässt sich vermeiden, bestimmte Methoden auszuführen, wenn sich die Kamera in einem nicht dafür vorgesehenen Status befindet.

In der Schnittstelle wird auch die Klasse `CCDCameraMode` definiert. Dies ist ein Vektor, der alle möglichen Modi der jeweiligen Kamera beinhaltet. Die Länge des Vektors ist die Anzahl aller Kombinationen aus erlaubten Binning in x- und y-Richtung. Jeder Vektoreintrag besteht dabei aus der jeweiligen Binningkombina-

⁴³Diese Kamera war in der Entwicklungsphase der H.E.S.S.-Teleskope ebenfalls ein Kandidat für die SkyCCD.

⁴⁴Die abgeleiteten Klassen für die PPI-, PCI- und ISA-Kameras von Apogee heißen `ApogeePPICamera`, `ApogeePCICamera` und `ApogeeISACamera` – und für die Sbig-Kamera `SbigCamera`.

⁴⁵Die Elemente der Aufzählung `Status` sind: `NotAvailable` (die Kamera muss gestartet werden), `Ready` (die Kamera ist gestartet und bereit), `Exposure` (die Kamera ist im Zustand des Belichtens), `ImageReadout` (die Kamera liest ein Bild aus) und `ShuttingDown` (die Kamera wird gestoppt und erwärmt sich auf Umgebungstemperatur).

tion, der Höhe und Breite des dazugehörigen Vollbildes und dem minimalen und maximalen Wert, den ein Pixel annehmen kann (Digitale Auflösung).

Die dritte Klasse `CCDCameraError` dient zur Fehlerbehandlung. Dabei benutzt man das Konzept der *exceptions*, die einen Fehler auffangen und an eine entsprechende Stelle im Programm zurückkehren können, ohne einen Programmabbruch zu erzwingen.

Für eine genauere Beschreibung der CCD-Kameraschnittstelle und deren Methoden sei auf die Diplomarbeit von Petz (2002) verwiesen. Die Schnittstelle wird in Kapitel 4.1 ebenfalls näher beschrieben, wo die Erweiterung der Schnittstelle für eine neue CCD-Kamera erklärt und umgesetzt wird. Der Quellcode der Schnittstelle wird zu einer statischen Bibliothek kompiliert, auf die MACS sowie die DAQ-Software zugreift. Der Zugriff dieser beiden Anwendungen wird im Folgenden erläutert.

CCD-Kameracontroller der DAQ

Im normalen Messbetrieb der H.E.S.S.-Teleskope sind die CCD-Kameras an den entsprechenden `ht0x`-Rechner angeschlossen, um die CCD-Bilder für das Pointing zu erhalten (siehe oben). Jede Hardwarekomponente an den H.E.S.S.-Teleskopen wird über einen eigenen Controller gesteuert (vergleiche Fußnote 42). Die Hardware-Controller sind – im Gegensatz zur Hardware an sich – Teil der DAQ-Software und sollten deswegen auf jedem DAQ-Rechner im lokalen Netzwerk ausgeführt werden können.⁴⁶

Der Controller für die CCD-Kameras erfüllt diese Vorgabe momentan nicht: Der CCD-Controller, der jeweils beide Kameras – SkyCCD und LidCCD – eines H.E.S.S.-Teleskops ansteuert, muss zur Zeit auf dem jeweiligen `ht0x`-Rechner laufen, da an diesem die physikalischen Anschlüsse (PCI/ISA und PPI) für die CCD-Kameras sind. Das schränkt die Möglichkeit zur Wartung der `ht0x`-Rechner erheblich ein (vergleiche Kapitel 3.1).

Das Paket `ccddrv` der DAQ-Software enthält die CCD-Kameraschnittstelle. Darauf greift der aktuelle CCD-Controller⁴⁷ zu, um so die Verbindung zwischen den CCD-Kameras und des DAQ-Systems herzustellen.

Mirror Alignment Control System (MACS)

In Kapitel 2.3.2 wurde kurz die MACS-Software beschrieben: Für die Spiegeleinstellung braucht ebenfalls einen CCD-Rechner, auf dem MACS installiert ist. Dieser Rechner muss über einen PPI-Anschluss verfügen, um die LidCCD daran anzuschliessen. Auf diesem CCD-Rechner befindet sich die CCD-Kameraschnittstelle, auf die MACS zugreift, um mit der an den CCD-Rechner angeschlossenen LidCCD zu kommunizieren und die Bildnahme zu steuern.⁴⁸

⁴⁶Aus privater Kommunikation mit D. Göring (H.E.S.S.).

⁴⁷Der Quelltext ist unter `onlinedcd/src/Controller2.cpp` der DAQ-Software zu finden.

⁴⁸Während einer Spiegeleinstellung wird die LidCCD also nicht über den entsprechenden `ht0x` bedient. Die SkyCCD wird indirekt auch für die Spiegeleinstellung benötigt: Bei der Fein- und Grobjustierung der Spiegel muss das Teleskop auf ein entsprechenden Justierstern gerichtet und nachgeführt werden (Kapitel 2.3.3). Die SkyCCD wird dabei aber weiterhin von der DAQ-Software

Das Installationspaket `onlineccd` der MACS Software enthält die CCD-Kameraraschnittstelle. Im Quellcode `CCDFramework/CCDCameraWrapper.C` wird festgelegt, welche Kamera benutzt wird und hier werden die Methoden der Schnittstelle für das in Objective-C geschriebene MACS bereitgestellt.

Kapitel 3

Ein neuartiges CCD-Kamerasystem

Dieses Kapitel beschreibt ein neuartiges CCD-Kamerasystems, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut und getestet wurde. Der Aufbau orientiert sich dabei konkret an Verbesserungsmöglichkeiten für das aktuelle LidCCD-System eines H.E.S.S.-Teleskops (Kapitel 2). Ziel war es, ein Kamerasystem aufzubauen, welches durch neue technische Komponenten eine verbesserte Funktionalität zur bisherigen darstellt und somit für einen Austausch einer LidCCD in Frage kommt. Bevor das CCD-Kamerasystem und dessen Komponenten vorgestellt werden (Kapitel 3.2), folgt zunächst eine Motivation dafür, die aus Verbesserungen für die bisherigen LidCCD-Kameras an den H.E.S.S.-Teleskopen hervorgeht (Kapitel 3.1).

3.1 Motivation und Verbesserungen der LidCCDs

Das vorangehende Kapitel 2 hat gezeigt, dass die CCD-Kameras wichtige Komponenten für das optische System der H.E.S.S.-Teleskope sind. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die Technik um die CCD-Kameras auf einen Stand ist, der nicht als optimal bewertet werden kann (Kapitel 2.5). Schon Cornils (2006) hielt in seiner Dissertation zum technischen Stand der verwendeten LidCCDs fest:

„Die Ansteuerung und Auslese [Anm. d. Verf.: der LidCCD] geschieht über den mittlerweile veralteten Parallelport (IEEE 1284) handelsüblicher Rechner, dessen Geschwindigkeit vergleichsweise gering ausfällt. [...] So benötigt die Auslese des gesamten Sensors samt Übertragung der Daten in den Rechner ca. 50 Sekunden, was für die Spiegeljustierung aber unkritisch ist. Ausgehend von den mittlerweile gewonnenen Erfahrungen (Beilicke & Petz 2002) kann für die Zukunft allerdings nur noch der Einsatz von per Ethernet angebundenen Kameras empfohlen werden. Die Vorteile sind ein standardisierter Bus mit standardisierten (offenen) Protokollen für die Kommunikation bei vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten der Datenübertragung und langen Leitungswegen ohne Signalaufbereitung. Zum Zeitpunkt des Kaufes stand diese Technologie jedoch noch nicht zur Verfügung.“

Eine Datenverbindung über Ethernet anstatt über einen Parallelport wäre demnach eine erste Verbesserung. Dadurch erreicht man neben einer schnelleren vor allem eine stabilere Auslese der CCD-Kamera. Es hat sich nach dem nun acht

Jahre langen Betrieb der H.E.S.S.-Teleskope gezeigt, dass die Verbindung über das 50 Meter lange Druckerkabel störanfällig ist und es somit zu Problemen bei der Auslese der LidCCD kommt: Bei den jetzigen CCD-Kameras gibt es zeitweise Übertragungsfehler, so dass die Bilder mit fehlerhaften Bildinformationen an den CCD-Rechner (ht0x) kommen.¹ Zudem müssen wegen des verhältnismäßig langen Kabels in der Software zur Ansteuerung bestimmte Parameter des PPI-Übertragungsprotokolls richtig gewählt werden, damit die Auslese funktioniert.² Um diese Verbesserung umzusetzen, müsste man entweder eine neue CCD-Kamera mit einem solchen standardisierten Ethernet-Bus kaufen – oder eine in der Nähe der LidCCD platzierte Rechnerkomponente dazwischenschalten, die mit der Kamera kommuniziert und die die weitere Datenübertragung über Ethernet regelt.

Neue CCD-Kamera

Auf der einen Seite würde eine neue CCD-Kamera eine zusätzliche Verbesserung mit sich bringen: Ein neues Kameramodell hätte im Vergleich zum bisherigen LidCCD-Modell verbesserte technische Eigenschaften, die die jetzigen Anwendungen mit der LidCCD bei H.E.S.S. optimieren würden, beziehungsweise neue Möglichkeiten in der Anwendung schaffen könnten.

Inzwischen gibt es leistungsfähigere CCD-Sensoren, die ein geringeres Rauschverhalten aufzeigen und eine höhere Sensitivität erreichen (siehe Kapitel 3.2.2). Somit würde sich die Qualität der CCD-Bilder steigern und man könnte für Anwendungen mit der LidCCD lichtschwächere Sternabbilder auf dem Kameradeckel registrieren – die Belichtungszeit würde sich für gleich helle Sterne im Vergleich zum bisherigen Modell verkürzen.

Desweiteren hat sich die Ausleseelektronik der CCD-Sensoren verbessert, was eine kürzerer Auslesezeit des CCD-Chips zur Folge hat. Zusammen mit einer Ethernetverbindung würde sich zusätzlich die Übertragungszeit und somit in der Summe die Gesamtauslesezeit einer neuen CCD-Kamera im Vergleich zur Gesamtauslesezeit der LidCCD (Kapitel 2.5.1) erheblich verringern.

Die verhältnismässig lange Gesamtauslesezeit der LidCCD von etwa 50 Sekunden war zwar für die die Spiegeljustierung zunächst kein entscheidendes Kriterium (siehe obiges Zitat). Dennoch hat sich Cornils (2006) bei der Entwicklung des Algorithmus zur Spiegeljustierung nach der Dauer für ein CCD-Bild gerichtet: Es wurden verschiedene Algorithmen und Abläufe zur Justierung analysiert. Der Algorithmus, der die höchste Genauigkeit erzielte, wurde allerdings nicht verwendet, da dieser zum letztendlich verwendeten nur marginal bessere Ergebnisse lieferte, dafür aber doppelt so viel Zeit beansprucht – wegen doppelt so vieler LidCCD-Bilder.³

¹ Aus einer privaten Kommunikation mit D. Nekrassov (H.E.S.S.) über den Stand der CCD-Kameras: Während des Betriebs – bei *observation* und *pointing runs* (vergleiche Kapitel 2.4) – kommt es zeitweise zu Übertragungsfehlern bei allen acht CCD-Kameras: sowohl bei den LidCCDs und als auch bei den SkyCCDs (vergleiche Kapitel 5). Die Frequenz dieser Fehler fällt aber verhältnismäßig gering aus, so dass eine Verwendung der fehlerfreien CCD-Aufnahmen zur Zeit ausreichend ist. Eine genauere Analyse dazu hat in der H.E.S.S.-Kollaboration noch nicht stattgefunden.

² Vergleiche die Diskussion des PPrepeat-Werts in Kapitel 2.5.1, in Petz (2002) und in Beilicke & Petz (2002).

³ Siehe Seite 34/35 in Cornils (2006).

Mit einer Verkürzung der Belichtungszeit, sowie vor allem der Gesamtauslesezeit würde der Zeitbedarf eines CCD-Bildes nicht mehr den entscheidenden Anteil des gesamten Zeitbedarfs zur Justierung der Spiegel ausmachen (vergleiche Ende Kapitel 2.3.3). So könnte man bspw. den Algorithmus mit höchster Genauigkeit bei einer neuen CCD-Kamera verwenden.

Die H.E.S.S.-Teleskope sind so konzipiert, dass eine einmalige Justierung aller Spiegel im Normalfall ausreicht. Dennoch wäre es wünschenswert eine Neujustierung oder Nachjustierung durchführen zu können, ohne dabei allzu viel kostbare Messzeit zu verlieren. Außerdem hat man gemerkt, dass durch die lange Nichtbenutzung der Motoren zur Spiegeleinstellung viele der Motoren wegen Korrosion sehr schwergängig bzw. gar nicht mehr laufen (siehe Kapitel 5). Daher wäre es von Vorteil, die Spiegelmotoren in regelmäßigen Abständen zu fahren, damit diese funktionsfähig bleiben. Mit einem schnellen optischen Feedback als Kontrolle der Motorenbewegung durch eine neue CCD-Kamera als LidCCD, würde ein solcher Vorgang zeitlich durchführbar werden. Eine solche Idee die Motoren der Spiegelaufhängungen regelmäßig zu fahren, wird momentan auch bei H.E.S.S. II verfolgt.⁴ Ein kürzerer Zeitbedarf für ein CCD-Bild mit einer neuen Kamera würde also die Spiegeleinstellung zeitlich, wie qualitativ optimieren und neue Möglichkeiten für die Wartung des Teleskops eröffnen.

Auch für das Pointing – der zweiten Anwendung für die LidCCDs – wäre ein kürzerer Zeitbedarf für ein CCD-Bild von Vorteil. Wie Kapitel 2.4 gezeigt hat, ist der zeitliche Ablauf eines *pointing runs* abhängig von der Auslesedauer der LidCCD. Bei einer schnelleren Auslese könnte man diese Kalibrationsmessung ebenfalls zeitlich optimieren und die reine Beobachtungszeit für Luftschauerdetektion würde sich vergrößern.

Zusätzliche Rechnerkomponenten

Eine Erkenntnis nach 8 Jahren Arbeit in der internationalen H.E.S.S.-Kollaboration ist, dass sich das Personal über die Jahre verändert. Dadurch kann es passieren, das Wissen verloren geht bzw. sich auf verschiedene Personen fragmentiert – insbesondere im Bereich der Hardware. Neben einer guten Dokumentation ist eine robuste und einfache Handhabbarkeit bei technischen Installationen erwünscht und für eine sichere Wartung notwendig.

Gerade bei den CCD-Kameras hat sich dadurch eine nicht zufriedenstellende Situation entwickelt: Wie oben bereits erwähnt wurde (Ende Kapitel 2.5.3), gibt es momentan eine besondere Bindung der CCD-Kameras an die *ht0x*-Rechner, die nicht dem Standard der DAQ entspricht. Diese eigentlichen Rechner der DAQ stellen wegen der physikalischen Anschlüsse für die jeweiligen Kameras – PPI für die LidCCD und PCI/ISA für die SkyCCD – nun einen speziellen CCD-Rechner dar, auf dem der entsprechende Controller der DAQ laufen muss: Da die aktuelle CCD-Kameraschnittstelle für die Ansteuerung dieser Anschlüsse auf spezielle Treiber zugreift, muss auf diesen Rechnern ein Linuxsystem mit einem Kernel der Version 2.4 laufen.

⁴Aus einer privaten Kommunikation mit S. Schwarzbürgs (H.E.S.S.).

Daher kann von Software-Seite aus das Betriebssystem der ht0x -Rechner nicht aktualisiert bzw. nur schwer gewartet werden. Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass Ersatzteile für die speziellen Hardwarekomponenten – wie etwa dem Motherboard mit PCI/ISA-Anschluss – nicht mehr hergestellt werden.⁵ Somit ist von Hardware-Seite der Wartungszustand ebenfalls kritisch.

Diese Bindung bringt einen weiteren Umstand für die LidCCD mit sich: Die LidCCD wird für ihre Anwendungen von zwei unabhängigen Softwaresystemen (DAQ und MACS) benutzt. Will man die LidCCD für die Spiegeleinstellung benutzen und an einen entsprechenden CCD-Rechner von MACS anschliessen, muss man die LidCCD aus dem DAQ-System zunächst „ausklinken“: Dafür muss auf dem ht0x -Rechner ein sogenannter Dummy-Controller gestartet werden, damit das DAQ-System keine Fehlermeldung über eine nicht vorhandene LidCCD auswirft.⁶

Aus diesen Gründen wäre eine unabhängigere Ansteuerung der CCD-Kameras – im Speziellen der LidCCDs – wünschenswert. Dies könnte man beispielsweise mit einer zusätzlichen Rechnerkomponente realisieren: Ein unabhängiger CCD-Rechner, der auf der einen Seite mit der Kamera kommuniziert und auf der anderen Seite mit den jeweiligen Anwendungsprogrammen – bei H.E.S.S.: Controller der DAQ und der MACS-Software. Damit wäre der CCD-Rechner unabhängig vom DAQ-System und wäre ein Teil der Kamera (Kapitel 3.2). Der CCD-Rechner könnte in das lokale Netzwerk angeschlossen werden und somit wäre eine Verbindung über Ethernet hergestellt.

Eine neue CCD-Kamera sowie eine zusätzliche Rechnerkomponente könnten also eine stabile und schnelle Verbindung über Ethernet herstellen. Außerdem würden beide Komponenten entscheidende Vorteile im Vergleich zur jetzigen CCD-Kamerainstallation mit sich bringen. Im Folgenden wird das neue Kamerasystem vorgestellt, welches als Lösung beide Komponenten beinhaltet.

⁵Aus einer privaten Kommunikation mit C. Stegmann (H.E.S.S.).

⁶Aus privater Kommunikation mit S. Schwarzbürg (H.E.S.S.).

3.2 Konzept und Komponenten des CCD-Kamerasystems

Das Konzept des neuartigen CCD-Kamerasystems besteht im Wesentlichen aus zwei neuen Hardwarekomponenten: Einer USB-Kamera⁷ und einem MiniPC⁸. In Abbildung 3.1 ist schematisch aufgezeigt, wie diese zwei Komponenten verbunden sind: Die USB-Kamera als CCD-Kamera ist über eine übliche USB-Verbindung an den MiniPC angeschlossen, und dieser über Ethernet an ein Netzwerk. Somit besteht die Möglichkeit die CCD-Kamera über eine Ethernetverbindung von außen zu steuern und zu bedienen.⁹ Die ursprüngliche Idee dieses Konzepts ist von Horns (2009) vorgeschlagen worden.

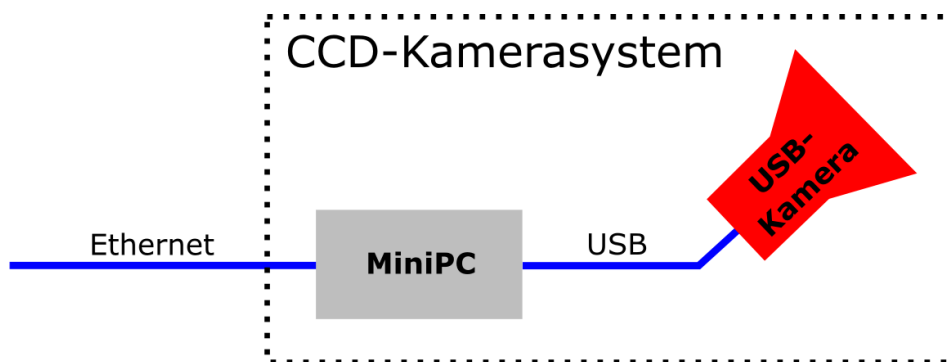


Abbildung 3.1: Schema des neuartigen CCD-Kamerasystems. Der MiniPC zusammen mit der neuen USB-Kamera bilden das neue Kamerasystem. Dabei werden übliche und standardisierte Protokolle verwendet: Der MiniPC kommuniziert über USB mit der Kamera, und über Ethernet mit der Software, die die Kamera nutzen muss.

Der MiniPC soll dabei in unmittelbarer Nähe der CCD-Kamera platziert werden können, um so die Datenübertragung vom Teleskop aus über Ethernet¹⁰ zu bewerkstelligen. Da der MiniPC ein vollständiger Rechner ist, kann man diesen auf die jeweiligen Bedürfnisse und Anforderungen individuell konfigurieren. Dadurch werden neue Anwendungen möglich, wie zum Beispiel eine Datenverarbeitung von CCD-Bildern direkt am Teleskop, bevor die Daten weiter über Ethernet an die Anwendungssoftware geschickt werden. Somit stellt das CCD-Kamerasystem aus MiniPC und CCD-Kamera ein flexibles und ausbaufähiges System dar.

⁷Mit *USB-Kamera* wird im Folgenden die neue CCD-Kamera (Alta U2) genannt, die im Rahmen dieser Arbeit bestellt (Kapitel 3.2.2) und untersucht wurde (Kapitel 4.2).

⁸Mit *MiniPC* wird im Folgenden die Rechnerkomponente bezeichnet, die mit der Kamera kommuniziert (Kapitel 3.2.1).

⁹Denkbar wäre natürlich auch direkt eine CCD-Kamera mit Ethernetanschluss zu verwenden – ohne einen zwischengeschalteten MiniPC. Zum Zeitpunkt der Bestellung bei Apogee waren Ethernetkameras aber nicht lieferbar, da der Hersteller angab, Probleme mit der Schnittstelle zu haben. Dies bekräftigte die Lösung mit USB-Kameras – die laut Hersteller eine stabile Funktionalität vorweisen – zusammen mit einem ethernetfähigen Rechner.

¹⁰Hier sei angemerkt, dass es nicht notwendig ein LAN-Kabel (*Local Area Network*) sein muss, welches die Verbindung herstellt. Man könnte die Datenverbindung auch drahtlos über *Wireless LAN* oder mittels PowerLAN über das übliche Stromnetz herstellen.

Wendet man dieses Kamerasystem auf ein H.E.S.S.-Teleskop an, würde man die zuvor genannten Verbesserungen für die LidCCD erreichen. Da die Verbesserungen der LidCCD in diesem Kontext die optischen Eigenschaften nicht betreffen, ist es sinnvoll ein neues Kameramodell auszusuchen, welches vergleichbare optische Eigenschaften wie das jetzige Modell hat. Somit lautet die Zielvorgabe für eine Installation bei H.E.S.S.: Die bisherige Optik und Funktionalität soll bestehen bleiben, die Technik wird dagegen erneuert und die Performance somit verbessert.

In den folgenden Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 werden die Hardwarekomponenten, MiniPC und neue USB-Kamera, vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit in einfacher Ausführung bestellt und getestet wurden. Im letzten Abschnitt 3.2.3 werden Möglichkeiten zur Ansteuerung eines solchen CCD-Kamerasystems vorgestellt.

3.2.1 Der MiniPC

Der MiniPC ist ein kleiner und kompakter Industrie-Rechner – ausgestattet mit einem Pico-ITX Motherboard als Herzstück des Rechners. Seit 2007 gibt es diesen standardisierten Formfaktor für Motherboards – mit einer Größe von 100 x 72 mm – und seit 2009 gibt es marktfähige Geräte. Die eBOX530-820-FL (siehe Abb. 3.2) ist von der Firma Axiomtek und wurde bei PLUG-IN Electronic GmbH bestellt.¹¹ In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Spezifikationen aufgeführt.



Abbildung 3.2: Der MiniPC: Die eBOX530-830-FL von zwei Seiten mit ihren verschiedenen Anschlüssen. Man sieht außerdem das silberne Gehäuse mit der Struktur des passiven Kühlelements. [Photos: www.plug-in.de]

Das Besondere an dem MiniPC ist neben seiner geringen Größe, dass dieser keine beweglichen Teile hat: keine Lüfter und keine Festplatten mit rotierender Speicherscheibe. Daher ist der MiniPC vergleichbar mit einem elektronischen Bauteil, bei dem es nicht relevant ist, ob es eine fixierte bzw. definierte Ausrichtung hat. Daher kann man den MiniPC an ein H.E.S.S.-Teleskop montieren, welches sich bewegt und fährt.

Die Kühlung des Prozessors funktioniert passiv über das Gehäuse, welches diesen über ein Wärmeleitungselement von innen berührt. Die Festplatte bildet ein Compact Flash Speicher, der von ursprünglichen 4 GB auf 32 GB Plattengröße

¹¹Die eBOX530-820-FL wurde am 30. April 2009 bestellt und kostete damals rund 647 Euro ohne Mehrwertsteuer. Der Hersteller über das Produkt: „Der lüfterlose Box-PC eignet sich hervorragend z. B. für mobiles Entertainment in Flugzeug, Auto oder Bahn, Industrie-Automation sowie Medizin- und Multimedia-Applikationen.“ [Quelle: www.plug-in.de]

nachträglich aufgerüstet wurde. Dieser Plattenplatz ist zunächst ausreichend, um ein laufendes Betriebssystem zu installieren und einen ausreichenden Speicherpuffer für etwaige temporäre Datenverarbeitung bereitzustellen. Benötigt man mehr Speicher, besteht die Möglichkeit den Speicherplatz auf USB-Speichermedien lokal oder beispielsweise auf andere Speichermedien in einem Netzwerk auszulagern.

Motherboard	PICO820
Prozessor	Intel Atom Z530 (1.6 GHz)
Arbeitsspeicher	1 GB DDR2-RAM
Speicher	4 / 32 GB Compact Flash
Spannungsversorgung	+5V DC Eingang
Abmessungen	100 x 72 mm (2.5“Pico-ITX-Format)
Betriebstemperatur	0 bis 60 °C
Relative Feuchtigkeit	10 bis 95 % (nicht kondensierend)
PC	eBOX530-820-FL
Gehäuse	silbernes Aluminium-Gehäuse
Anschlüsse	unter anderem: 1x Gigabit-Ethernet, 4x USB 2.0
Versorgung	Externes AC-Netzteil (+5VDC)
Temperatur	Betrieb: 0 bis 50 °C, Lagerung: -20 bis +80 °C
Relative Feuchtigkeit	10 bis 95 % (nicht kondensierend)
Abmessungen (B x T x H)	130 x 95 x 47 mm
Gewicht	0.5 kg

Tabelle 3.1: Die wichtigsten Spezifikationen des pico-ITX-Motherboards PICO820 und des MiniPCs eBOX530-820-FL. Für weitere Details lohnt sich auch ein Blick ins Handbuch (Axiomtek 2009). [Quelle: www.plug-in.de]

Ein weiterer, großer Vorteil ist, dass man ein komplettes Betriebssystem auf dem Rechner installieren und ausführen kann. Dies ermöglicht eine leichte Bedienbarkeit – und damit auch eine leichte Wartung – für den Benutzer im Vergleich zu einem speziellen elektronischen Bauteil. Damit lassen sich auch vergleichsmäßig leicht die standardisierten Anschlüsse – wie USB und Ethernet – ansprechen. Zudem besteht die Möglichkeit Programme auf dem MiniPC laufen zu lassen, und somit eine Datenverarbeitung vor Ort.

Der Stromverbrauch des MiniPCs fällt relativ gering aus: Mit dem Netzteil, welches maximal 5 Ampere liefert, erhält man eine maximale Leistung von 25 Watt. Der Hersteller des Prozessors¹² gibt einen Stromverbrauch von nur 2 Watt an und der des Motherboards¹³ von etwa 5 Watt. Wegen dieses geringen Stromverbrauchs wäre es sogar denkbar, die Stromversorgung über eine Solarzelle herzustellen. Weitere Eigenschaften des MiniPCs im Hinblick auf eine Installation bei H.E.S.S. werden in Kapitel 4.3 beschrieben.

¹²Siehe www.intel.com

¹³Siehe www.axiomtek.com oder www.kontron.com

3.2.2 Die USB-Kamera

Die Alta U2 von Apogee (Abbildung 3.3) ist das Nachfolgermodell der Ap2Ep – der CCD-Kamera, die momentan als LidCCD an den H.E.S.S.-Teleskopen installiert ist. Die Dimensionen des Kameragehäuses, sowie die Größe des CCD-Chips haben sich dabei im Vergleich zur Ap2Ep nicht geändert. Es handelt sich ebenfalls um eine Hochleistungskamera mit speziellem Kühlsystem und empfindlichem CCD-Chip. Eine Alta U2 wurde im Rahmen dieser Arbeit bestellt¹⁴ und als Komponente des CCD-Kamerasystems getestet. Die Performance der Kamera wird im Folgenden kurz vorgestellt (Tabelle 3.2); auf weitere Eigenschaften der USB-Kamera und die charakteristischen Größen des CCD-Chips wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen; in Kapitel 4.3 wird das neue Kameramodell mit dem Modell der LidCCDs verglichen.

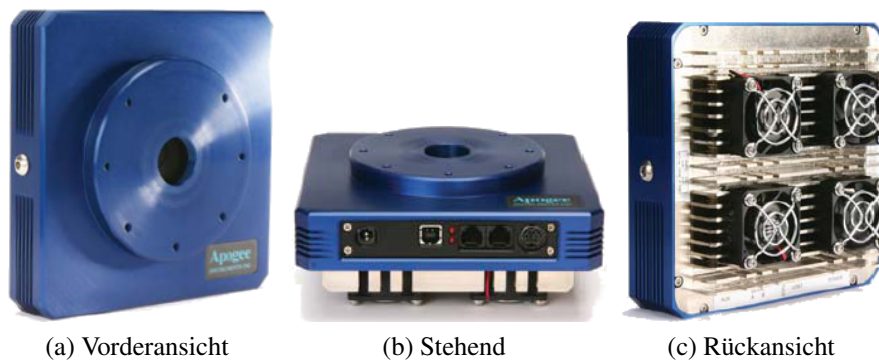


Abbildung 3.3: Die Alta U2 von Apogee von allen Seiten. Auf dem linken Bild (a) ist mittig der Anschluss für eine Optik zu sehen, sowie der Verschluss der Kamera (schwarz). In der Mitte (b) sieht man die seitlich angebrachten Anschlüsse. Rechts (c) sieht man das Kühlelement an der Unterseite der Kamera mit den vier Lüftern. [Photos: www.ccd.com]

Der ausschlaggebende Unterschied zum Ap2Ep-Modell der LidCCD ist der Anschluss bzw. das Übertragungsprotokoll: Die Ansteuerung und die Bildauslese der Alta U2 funktioniert über einen USB 2.0-Anschluss. Mit einer nominell maximalen Schnittstellengeschwindigkeit von 480 Megabytes pro Sekunde für USB 2.0 erreicht man laut Hersteller eine Ausleserate von bis zu 10 Megapixeln pro Sekunde.¹⁵ Zudem wird USB 1.1 ebenfalls unterstützt, was eine Ausleserate von etwa 530 Kilopixeln pro Sekunde ergibt.

Die Kamera besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: einem Kühlsystem, einem Verschluss (engl. *shutter*) und dem CCD-Chip. Das Kühlsystem besteht aus einem thermoelektrischen Bauteil (Peltier-Element), welches in unmittelbarer Nähe des CCD-Chips angebracht ist. Die Abwärme wird durch das Gehäuse als Kühlelement und durch vier Lüfter geregelt, die an der Unterseite des Kameragehäuses angebracht sind.

Der eingebaute Verschluss VS25 von Uniblitz hat laut Hersteller eine Öffnungszeit von 3 ms, was aufgrund der Mechanik eine minimale Belichtungszeit von 6 ms

¹⁴Die Kamera wurde am 30. April 2009 bei Scientific Instruments (www.si-gmbhccd.de) bestellt und kostete damals 6.380 Euro ohne Mehrwertsteuer.

¹⁵Damit kann man die Auslesezeit zu etwa 0.16 sec pro Vollbild (1536x1024 Pixel) abschätzen.

Kamera	Apogee Alta U2
Chip-Sensor	Kodak KAF-1603ME
Chip-Größe	1536 x 1024 Pixel
Pixel-Größe	9 μm x 9 μm
Kapazität	100,000 e^-
Anschluss	USB 2.0
maximale Kabellänge	5 Meter
Belichtungszeit	10 μs bis 183 min
Binning	1x1 bis 10x1024
Auslesefenster	jede Größe möglich
Digitale Auflösung	16 Bit (12 Bit)
Ausleserate	1 MHz (5 MHz)
Ausleserauschen	15 e^- (unter 2 e^-)
Dunkelstrom	0.1 e^- / sec (-30°C)
Kühlleistung	50 $^\circ\text{C}$ unter Umgebungstemp.
Temperaturstabilität	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Stromverbrauch	maximal 40 Watt
Anschluss für Optik	C-Mount

Tabelle 3.2: Die technischen Spezifikationen der Apogee Alta U2. Die Angaben in den Klammern (Digitale Auflösung, Ausleserate und -rauschen) beziehen sich auf die Option mit einer digitalen Auflösung von 12 Bit. [Quelle: Apogee (2010)]

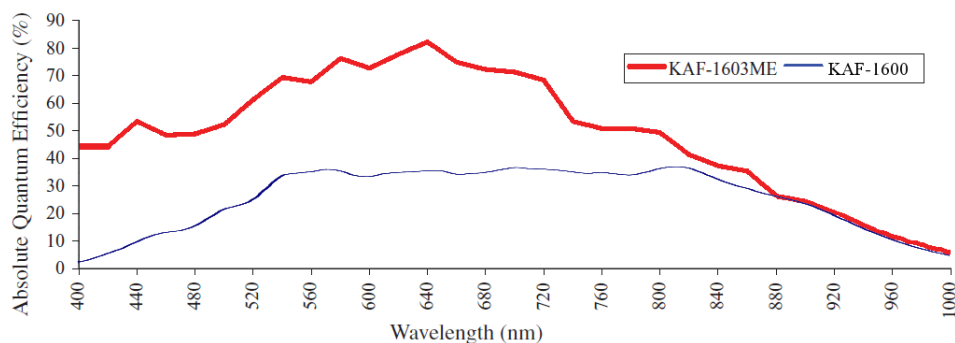


Abbildung 3.4: Die wellenlängenabhängige Quanteneffizienz des KAF-1600 Chips der momentanen LidCCD Apogee Ap2Ep (blaue, dünne Kurve) und die des Nachfolger-Chips KAF-1603ME der CCD-Kamera Alta U2 (rote, dicke Kurve). [Quelle: www.ccd.com und Kodak (1998)]

erlaubt.¹⁶ Die interne Steuerung der Kamera erlaubt eine Integrationszeit des CCD-Chips¹⁷ von 10 μs bis 183 min. Bei Belichtungszeiten bis etwa 6 ms müsste der Verschluss also noch zu sein. Die Eigenschaften des Kameraverschlusses, sowie die Belichtungszeiten der Kamera werden in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben.

¹⁶Vergleiche www.uniblitz.com

¹⁷Während der Integrationszeit wird die Spannung der Potentialtöpfe eines CCD-Sensors so eingestellt, dass entstehende Elektron-Loch-Paare im Halbleiter Material gesammelt werden und nicht abfließen können.

Das Herzstück der Kamera ist der CCD-Chip. Dabei handelt es sich ebenfalls um ein Nachfolgermodell des Sensors, welcher in der Ap2Ep eingebaut ist. Die wesentlichste Verbesserung ist die gesteigerte Quanteneffizienz – auch durch die Verwendung der sogenannten *microlense*-Technologie (Kodak 2009). Dabei sitzt auf jedem CCD-Pixel eine Linse, die so die effektive Lichtsammelfläche vergrößert. So ist die Quanteneffizienz im Vergleich zum Vorgängerchip in manchen Wellenlängenbereichen etwa doppelt so groß (Abbildung 3.4). Weiter Details und Eigenschaften des CCD-Chips werden in Kapitel 4.2.4 behandelt.

3.2.3 Die Ansteuerung des CCD-Kamerasystems

Für eine Ansteuerung des CCD-Kamerasystems und eine Bedienung der CCD-Kamera gibt es verschiedene Lösungsansätze. Die Lösung die in dieser Arbeit aufgebaut und untersucht wurde, orientiert sich dabei stark an der momentanen Installation und Implementierung der CCD-Kameras bei H.E.S.S..

Bei dem CCD-Kamerasystem stellt der MiniPC als CCD-Rechner die zentrale Kommunikationsschnittstelle dar: Zum einen muss dieser die interne Kommunikation des Systems mit der USB-Kamera regeln – zum anderen die externen Kommunikation mit Programmen und Anwendungen, die auf die Kamera zugreifen wollen.

Für die interne Kommunikation werden entsprechende Kameratreiber benötigt, die auf dem MiniPC, an dem die USB-Kamera angeschlossen ist, ausgeführt werden. Die Treiber für die Alta U2 werden wie bei den Kameramodellen der LidCCDs von Mills (2010) bereitgestellt. Im Hinblick auf H.E.S.S. ist es daher sinnvoll, die bisherige CCD-Kameraschnittstelle für die USB-Kamera zu aktualisieren (vergleiche Kapitel 2.5.3): Damit wird die Schnittstelle nach dem gleichen Design für die USB-Kamera erweitert. Die neu geschriebene Schnittstellenkomponente wird im nächsten Kapitel 4.1 beschrieben.

Für die externe Kommunikation muss man bei einer Integration bei H.E.S.S. gewährleisten, dass beide Anwendungsprogramme – MACS und der Controller der DAQ – auf die CCD-Kamera zugreifen können. Eine Möglichkeit wäre, dass der entsprechende Controller der DAQ als auch MACS auf dem MiniPC laufen, und so jeweils die Kommunikationen zwischen CCD-Kamera und den beiden Softwaresystemen hergestellt wird. Diese Verbindung würde jedoch über die jeweilige Interprozesskommunikation der Software hergestellt werden. Dadurch könnte wieder eine ungünstige Hardware-Software-Bindung entstehen (vergleiche Kapitel 3.1). Zudem hat es sich beispielsweise als schwierig herausgestellt, die MACS-Software auf einem aktuellen Betriebssystem zu installieren.¹⁸ MACS müsste allerdings – wie erwähnt – auf dem MiniPC laufen, wollte man auf diese Weise die CCD-Kamera ansteuern.

Aus diesen Gründen wurde ein unabhängigerer Ansatz für die externe Kommu-

¹⁸Aus einer privaten Kommunikation mit A. Abramowski (H.E.S.S.): MACS wurde seit der letzten Spiegeljustierung (Kapitel 2.3.3) nicht mehr benutzt und über die Jahre nicht gewartet bzw. aktualisiert. MACS wurde für eine spezielle Linuxdistribution (Mandrake Linux 7.2) entwickelt. Inzwischen konnte MACS auf einer Fedora 12 Distribution ebenfalls installiert werden, jedoch noch nicht für eine debianbasierende Ubuntu Version. Diese Schwierigkeiten bekräftigen die Abkapselung der CCD-Kamera.

nikation des CCD-Kamerasystems verfolgt:¹⁹ eine Server-Client-Kommunikation. Dabei ist das Kamerasystem völlig abgekapselt von den Anwendungsprogrammen MACS und dem Controller der DAQ. Zudem besteht dabei die Möglichkeit des parallelen und gleichzeitigen Zugriffs beider Programme auf das Kamerasystem und somit auf die CCD-Kamera. Ein weiterer Vorteil ist dabei, dass lediglich die Schnittstellen der Anwendungsprogramme angepasst werden müssen. Dieser Ansatz und ein Plan für eine konkrete Umsetzung bei H.E.S.S. wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

¹⁹Dieser Ansatz wurde zusammen mit D. Göring (H.E.S.S.) entwickelt (H.E.S.S.-CCD-Kamera-Workshop 2010).

Kapitel 4

Aufbau und Tests des CCD-Kamerasystems

In diesem Kapitel wird der Aufbau des zuvor beschriebenen CCD-Kamerasystems erklärt und die Ergebnisse aus den durchgeführten Tests beschrieben. Ziel war es, die gewünschte Funktionalität zu erreichen, die das Kamerasystem leisten muss, wenn es als LidCCD-System an einem H.E.S.S.-Teleskop eingesetzt wird.



Abbildung 4.1: Das CCD-Kamerasystem im Labor. Im Bild links ist der MiniPC zu sehen, an den die USB-Kamera angeschlossen ist. Die USB-Kamera (rechts) steht auf zwei Klötzen erhöht, damit eine ausreichende Luftzirkulation durch die an der Unterseite angebrachten Lüfter gewährleistet ist. Zudem ist ein Testobjektiv aufgeschraubt.

Dazu wurde zunächst die CCD-Kameraschnittstelle von H.E.S.S. erweitert und für die neue Alta U2 Kamera aktualisiert. Die Schnittstelle und ihre Erweiterung um die USB-Kameras von Apogee wird in Kapitel 4.1 beschrieben. Anschließend wurde die Funktionalität der USB-Kamera getestet und charakteristische Merkmale des CCD-Chips gemessen (Kapitel 4.2). Diese Messungen zum Verhalten der USB-Kamera stellten zugleich einen Funktionalitätstest für die erweiterte CCD-Kameraschnittstelle dar. So konnte die Schnittstelle im Laufe dieser Arbeit aufgebaut und optimiert werden. Bei den Messungen war der MiniPC der Rechner, an den die Kamera angeschlossen war (Abbildung 4.1) und auf dem die Testsoftware, die CCD-Kameraschnittstelle und die Kameratreiber installiert und ausgeführt wurden. Abschliessend wurde die Ansteuerung des Kamerasystems mittels einer Server-Client-

Architektur getestet und eine Lösung zur Implementierung bei H.E.S.S. entwickelt. Dies wird zusammen mit einem Plan zur Integration des Kamerasystems für ein H.E.S.S.-Teleskop in Kapitel 4.3 beschrieben.

4.1 Schnittstelle der USB-Kamera

Die bestehende CCD-Kameraschnittstelle von H.E.S.S. wurde um die Schnittstellenkomponente zur Ansteuerung von USB-Kameras von Apogee erweitert – wie in Abbildung 4.2 schematisch zu sehen ist. Dazu wurde eine neue Klasse *Apogee-USBCamera* geschrieben, die von der abstrakten Basisklasse *CCDCamera* abgeleitet wurde (vergleiche Kapitel 2.5.3). Die Methoden dieser neuen Klasse wurden mit Hilfe eines Treiberframeworks¹ für die Apogee USB-Kameras geschrieben, um die bisherige Funktionalität auch für die neue USB-Kamera herzustellen: Damit kann die neue Alta U2 über diese Schnittstelle angesteuert und bedient werden. Das Treiberframework und die neue CCD-Kameraschnittstellenkomponente werden im Folgenden beschrieben.



Abbildung 4.2: Schema der CCD-Kameraschnittstelle für H.E.S.S.: Links deuten die drei Boxen die Treiber für die verschiedenen Kameras an, auf die die Schnittstelle zugreift. Die Treiber für die Apogee USB-Kameras wurden in dieser Arbeit in die Schnittstelle (Mitte) implementiert. Rechts sind die unabhängigen Programme exemplarisch aufgelistet, die jeweils die Schnittstelle benutzen, um auf eine CCD-Kamera zuzugreifen. Das Testprogramm wurde im Rahmen dieser Arbeit geschrieben (Gelb). Ein Gelbverlauf in den anderen Boxen deutet an, dass diese Komponente wegen der neuen Kamera verändert bzw. angepasst werden muss. [Zeichnung nach Petz (2002)]

Die Treiber für die CCD-Kameras von Apogee stellt – wie weiter oben schon erwähnt – die Randomfactory (Mills 2010) als *open-source Code*² zu Verfügung. Die Kameratreiber für die neugeschriebene CCD-Kameraschnittstelle wurden dem Entwicklerframework der Version 3.1.12³ entnommen. Dieses Framework beinhaltet alle notwendigen Low-Level-Interfaces⁴ für die Kommunikation mit allen jemals hergestellten Apogee Kameras: Im Treiberpaket ist eine umfangreiche Sammlung an Treibern für alle USB-Kameras (Alta U) und Ethernet-Kameras (Alta E) enthalten. Dieses Treiberframework für die USB- und Ethernet-Kameras ist so aufgebaut,

¹Mit *Framework* ist hier ein Softwarepaket gemeint, das über eine Klassenstruktur aus vielen verschiedenen Objekten eine Einheit bildet.

²Damit ist die freie Benutzung von Quellcode gemeint.

³Auf den Seiten von Randomfactory von D. Mills zu finden: www.randomfactory.com/apogee-lfa.html.

⁴Damit ist Quelltext gemeint, der die Kommunikation auf unterster Ebene zwischen Geräten regelt.

dass im Wesentlichen alle Kameramodelle über eine Klasse angesteuert werden: Die Klasse `CAPnCamera` fasst die kameramodellübergreifenden Methoden zusammen. Je nach Kameramodell und Anschluss (USB oder Ethernet) kommen weitere spezifische Klassen und Methoden hinzu.⁵

Ebenfalls im Treiberframework enthalten sind die Treiber für die PCI/PPI/ISA-Kameramodelle mit ihren entsprechenden Kernel-Modulen.⁶ Als die CCD-Kameraschnittstelle von H.E.S.S. ursprünglich für diese Kameramodelle erstellt wurde (Petz 2002), gab es nur Treiber für Kernelversionen 2.4. In diesem Treiberframework gibt es auch Versionen für einen 2.6-Kernel. Eine Aktualisierung dieser Schnittstellenkomponenten konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet werden, da keine entsprechenden Kameras verfügbar waren. Desweiteren hat der MiniPC auch keine solchen Anschlüsse, um dennoch eine reine Compilierung mit diesen Schnittstellenkomponenten zu testen. Daher wurde die neu geschriebene CCD-Kameraschnittstelle zunächst nur mit der Komponente für die USB-Kameras und ohne die Komponenten für die PCI/PPI/ISA-Modelle entwickelt und getestet.

Obwohl es nun eine Aktualisierung der Kernel-Module gibt, bleibt bei diesen Kameramodellen (PCI/PPI/ISA) die nicht vorteilhafte Bindung an eine Kernelversion bestehen (vergleiche dazu Kapitel 3.1). Der große Vorteil der USB-Kameras (Alta U) und auch der Ethernet-Kameras (Alta E) ist, dass dafür keine speziellen Kernel-Module benötigt werden. Man benötigt lediglich die jeweiligen plattformunabhängigen, offenen Protokolle für die jeweiligen Anschlüsse.⁷

Das Treiberpaket enthält auch ein Programm mit grafischer Oberfläche (*Apogee Camera Control*), mit dem die Kamera bedient werden kann. Dieses Programm wurde auf einer Ubuntu Version⁸ auf dem MiniPC installiert, um eine erste Ansteuerung der Kamera zu testen. Dabei traten keine Probleme auf.

Ebenfalls im Paket enthalten ist ein Programm (`test_alta.cpp`), welches eine einfache Routine durchläuft, um eine CCD-Aufnahme mit der Kamera zu machen, und dabei exemplarisch auf die Methoden der Treiber zugreift. Da es keine linuxspezifische Dokumentation zu den Methoden der Treiber gibt,⁹ diente dieses Programm auch als Grundlage für ein Verständnis der Treibermethoden, mit denen die Schnittstelle gefüllt werden sollte. Beim Compilieren jedoch trat ein distributionsspezifisches Problem auf, da das Programm auf eine Hilfsbibliothek¹⁰ zugriff,

⁵Für die verschiedenen Kameramodelle gibt es jeweils entsprechende Unterklassen, die von der Klasse `CAPnCamData` abgeleitet wird. Im Falle der Apogee Alta U2 wird die Klasse `CAPnCamData_KAF1602EB` benutzt. Alle USB-Kameras benötigen zudem die Methoden aus `ApogeeUsbLinux.cpp` – für die Kommunikation mit dem USB-Port (vergleiche Anhang A).

⁶Die Kernel-Module sind Treiber für die speziellen Anschlüsse (PCI/PPI/ISA) und der entsprechenden Kernelversion einer Linuxdistribution.

⁷Im Falle der USB-Kameras ist das die USB-Standardbibliothek der verwendeten Linuxversion: die dynamische Bibliothek `libusb.so`, die die Kommunikation mit dem USB-Port regelt.

⁸Das Betriebssystem Ubuntu ist eine Linux-Distribution, die auf Debian basiert. In diesem Fall wurde die Version 9.04 auf dem MiniPC als Testbetriebssystem installiert, welches im Mai 2009 die aktuellste Version darstellte.

⁹Aus einer privaten Kommunikation mit D. Mill vom 6. Juli 2009: „The only low level documentation is the `/opt/apogee/doc/altadoc.pdf` file describing the variables and a few routines from a Windows perspective. In Linux all the names are the same. The set of available calls can be seen by looking at `ApnCamera.h` and `ApnCamera_USB.h`.“

¹⁰Dabei handelte es sich um die Zusatzbibliothek `libccd`. Mills beschreibt die Funktionalität

welche sich zunächst nicht auf der Ubuntu-Plattform aktualisieren ließ.

Das Problem konnte jedoch behoben werden¹¹ und es stellte sich heraus, dass diese Zusatzbibliothek für die Funktionalität der CCD-Kameraschnittstelle nicht benötigt wird – sowie viele weitere Komponenten des umfangreichen Treiberframeworks. Daher wurde für die neu entwickelte Kameraschnittstellenkomponente nur eine Auswahl an notwendigem Quellcode der Treiber herangezogen, um auch die Kompatibilität der Schnittstelle zu erhöhen. Die Auswahl der Treiber und der strukturelle Dateiaufbau der CCD-Kameraschnittstelle ist im Anhang A zu finden. Die Methoden, sowie der Programmfluss der Schnittstelle werden im Folgenden beschrieben.

Methoden der Schnittstelle

In diesem Abschnitt erfolgt eine allgemeine Beschreibung der aktualisierten CCD-Kameraschnittstelle und die wichtigsten Neuerungen in der Schnittstellenkomponente für die USB-Kameras. Im Anhang B sind alle Methoden der Schnittstelle dokumentiert und werden dort detailliert beschrieben. Die Beschreibung orientiert sich dabei an der neu geschriebenen Schnittstellenkomponente der Klasse *Apogee-USBCamera* für die USB-Kameras. Insofern es sich dabei aber um keine neu hinzugefügte Methode handelt, ist die Funktionalität der Methoden mit der Funktionalität der bisherigen Schnittstellenkomponenten (PCI/PPI/ISA) identisch: Die Eingabewerte und die Ausgabewerte der gleichnamigen Methode sind identisch. Zudem erfolgt für manche Methoden eine Beschreibung im nächsten Unterkapitel 4.2 an entsprechender Stelle.

Ein Programm, welches die Schnittstelle benutzt, um die Kamera anzusteuern, muss zunächst die Schnittstelle und die Kamera initialisieren: Das bewirkt der Aufruf der Methode *StartCamera*. Danach wird die Kameraschnittstelle je nach Aufruf einer Methode in einen bestimmten Status gesetzt, so dass eine unsachgemäße Bedienung der Kamera ausgeschlossen wird. Wird trotzdem eine unerlaubte Methode aufgerufen, gibt die Schnittstelle in Form einer *exception* eine Fehlermeldung aus (vergleiche Kapitel 2.5.3).

Das Besondere am Programmfluss der Schnittstelle ist, dass diese mit sogenannten *threads* arbeitet (Barney 2009). Das sind Arbeitsstränge eines Prozesses, die parallel ablaufen können. So wurde zum Beispiel die neu geschriebene Methode *StopCooling* so gestaltet, dass der Stoppvorgang des Kühlers sozusagen im Hintergrund abläuft, aber man mit bestimmten Methoden trotzdem noch mit der Kamera kommunizieren kann (vergleiche Kapitel 4.2.2 und Anhang B).

Der grundlegendste Unterschied zu den bisherigen Schnittstellenkomponenten

dieser in einer *README*-Datei des Treiberframeworks: „The Ccd library currently supports named image buffer, some simple calibration operations, reading/writing FITS images to disk, and displaying images in DS9 using shared memory.“ Vergleiche folgende Fußnote 11.

¹¹D. Mills (Randomfactory) entwickelt die Treiber für die Apogee-Kameras auf einer Redhat-basierten Distribution, vgl. aus einer privaten Kommunikation vom 7. Juli 2009: „I build the libraries and executables on an old Redhat 7.3 system [...]. This helps ensure that the same objects will run on any modern distribution.“ Für eine Ubuntu-Distribution stellte sich aber heraus, dass dennoch eine Anpassung an dieser Stelle notwendig ist: Beim Compilieren der Bibliothek *libccd* muss anstatt der Option *-fPIC* die Option *-shared* im *makefile* benutzt werden.

für die PCI/PPI/ISA-Kameras liegt darin, dass die Initialisierung komplett von den Treibern abgewickelt wird. Für die bisherigen Kameramodelle musste der Benutzer der Schnittstelle kameraspezifische Werte durch den Aufruf des Klassenkonstruktors übergeben – wie etwa die Pixelgröße des Chips oder den Parameter `PPRepeat` für die Kabellänge (vergleiche Kapitel 2.5.1). Bei den Treibern der USB-Kameras muss der Benutzer der Schnittstelle nicht wissen, welches USB-Kameramodell angeschlossen ist: Beim Starten der Kamera werden diese Werte aus dem internen Speicherregister der USB-Kamera ausgelesen und an die Schnittstelle übergeben. So liest beispielsweise die Methode `Identification()` nun das Kameramodell und den Typ des CCD-Chips direkt aus der Kamera aus.

Neben den Methoden, die für die USB-Kameras aktualisiert wurden, wurden folgende neue Methoden der Klasse `ApogeeUSBCamera` hinzugefügt:

- `HSTemperature` zum Auslesen der Temperatur des Kühlkörpers der USB-Kamera (engl. *heatsink*)
- `SetFanMode` zum Einstellen und Regulieren der Lüfter
- `GetFanMode` zum Auslesen der Lüftereinstellung
- `PerformStopCooling` zur Abwicklung des Stoppvorgangs des Kühlers
- `StopCoolingRaw` zum direkten Stoppen des Kühlers (Nicht empfohlen! Vergleiche dazu Kapitel 4.2.2)
- `CanAbortShuttingDown` zur Abfrage, ob der Abruch der Schnittstelle aus dem `ShuttingDown`-Status möglich ist
- `AbortShuttingDown` zum Abbruch des Vorgangs, falls sich die Schnittstelle im `ShuttingDown`-Status befindet

Die Methoden `CanAbortImageReadout()` und `AbortImageReadout()` werden aufgrund der schnellen Auslesezeiten der USB-Kameras nicht mehr benötigt. Allerdings greift die MACS-Software auf diese Methoden zu, so dass sie in der Klasse `ApogeeUSBCamera` als funktionslose Methoden weiterhin auftauchen.

4.2 Testmessungen der USB-Kamera

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Testprogramm¹² geschrieben, welches auf die CCD-Kameraschnittstelle zugreift. Damit konnte die Alta U2 Kamera bedient, Testmessungen durchführt und gleichzeitig die Funktionalität der Schnittstellenkomponente für die USB-Kamera getestet werden. So konnten Programmierfehler beseitigt und die Schnittstelle an vielen Stellen optimiert werden: Die Endversion der Schnittstellenkomponente für die USB-Kamera zeigte keine funktionellen Probleme.

Im Testprogramm kann man die Methoden der Klasse *ApogeeUSBCamera* einzeln aufrufen. Zum Speichern der Bilder ist zusätzlich eine Routine implementiert, die den jeweiligen Bildpuffer in eine Datei abspeichert. Die Bilddateien haben das im Bereich der Astronomie etablierte *Flexible Image Transport System*-Format, kurz FITS-Format (Wells & Harten 1981). Zudem kann eine Aufzeichnung eingeschaltet werden, um kameraspezifische Werte nach einem bestimmten Zeitintervall jeweils zu speichern.¹³ Damit konnte das Langzeitverhalten der Kamera getestet werden (Kapitel 4.2.3).

Das Testprogramm konnte direkt oder über Netzwerkzugriff¹⁴ auf dem MiniPC gestartet werden und so die daran angeschlossene Alta U2 Kamera bedienen. Mit Hilfe des Testprogramms wurden unterschiedliche Bilder und Messungen gemacht, um das Verhalten der Kamera zu charakterisieren. Die Messungen und Ergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Den Ergebnissen folgt an betreffender Stelle eine Bewertung hinsichtlich einer Benutzung der Kamera bei H.E.S.S..

4.2.1 Messungen und Ergebnisse mit Objektiv

Für die Aufnahmen von Gegenständen wurde ein Objektiv an die Alta U2 angebracht (Abbildung 4.1): In diesem Falle handelte es sich um ein Objektiv von Minolta mit einer Brennweite von 50 mm und einem maximalen Öffnungsverhältnis von f/1.4 (Blende). Für die Bilder wurde das Objekt in den Fokus gebracht, um die Orientierung der Kamera und des Kamerabildes herauszufinden, um verschiedene Kameraoptionen wie das Binning und die Teilauslese des CCD-Chips zu testen, und um die Eigenschaften des Kameraverschlusses zu überprüfen.

Die Aufnahmen, die als FITS-Dateien vom Testprogramm gespeichert werden, sind im Folgenden als Bilder in Graustufen in den üblichen 256 Grautönen dargestellt, die ein Monitor anzeigen kann. Das bedeutet bei einer digitalen Auflösung

¹²Der Quellcode des Testprogramms ist unter `bin/kamera_prog.cpp` im Schnittstellenframework zu finden (vergleiche Anhang A).

¹³Das Intervall ist frei wählbar und es werden je nach Bedarf nach jedem Zeitintervall folgende Werte in eine ASCII-Datei (*American Standard Code for Information Interchange*) gespeichert: der relative Zeitpunkt ab Start der Aufzeichnung in Sekunden, die Temperatur des CCD-Chips und die des Kühlkörpers jeweils in °C, der Mittelwert und die Standardabweichung einer Biasaufnahme, die laufende Nummer dieser Biasaufnahme und bei eingeschaltetem Kühler die Zieltemperatur für den CCD-Chip. Was Biasaufnahmen sind und welche Einheiten diese hier gespeicherten Werte haben, wird später in Kapitel 4.2.3 bzw. 4.2.1 erklärt.

¹⁴Damit ist der Zugriff über ein Computer-Netzwerk von einem Rechner auf einen anderen gemeint – in diesem Falle über eine Standardfunktion von Linux `ssh` (Plötner & Wendzel 2008).

von 16 Bit, also digitalen Pixelwerten von 0 bis 65535 ($= 2^{16} - 1$), dass jeweils 256 Werte zu einer Graustufe zusammengefasst werden. So nehmen zum Beispiel die Pixelwerte 0 bis 255 die Graustufe reines Schwarz und die Pixelwerte 65280 bis 65535 reines Weiß an. Die digitalen *Pixelwerte* sind hierbei eine Zählseinheit: Diese werden in dieser Arbeit auch mit dem englischen Wort *Count* (dt. Zähler Schritt) bezeichnet.¹⁵ Die FITS-Dateien wurden in dieser Arbeit mit DS9 (Joye & Mandel 2003) oder mit Gimp (GNU 2010a) geöffnet, gegebenenfalls bearbeitet und für die Weiterverwendung in anderen Bildformaten gespeichert.

Orientierung der Kamera zum Kamerabild

In Abbildung 4.3 wird die ursprüngliche Orientierung des Kamerabildes verdeutlicht. Damit ist die Lage des Koordinatensystems des Gegenstands relativ zu der des Koordinatensystems des Bildes gemeint. Die Kamera wurde für die folgenden Aufnahmen seitlich auf ihr Gehäuse gestellt, so dass die Anschlüsse (USB und Stromversorgung) nach oben zeigten (vergleiche etwa Abbildung 3.3 oder 4.1). Oben links in der Abbildung ist im Bild zu sehen, wie das Testprogramm die ausgelesenen Pixel über die Schnittstelle gespeichert hat.

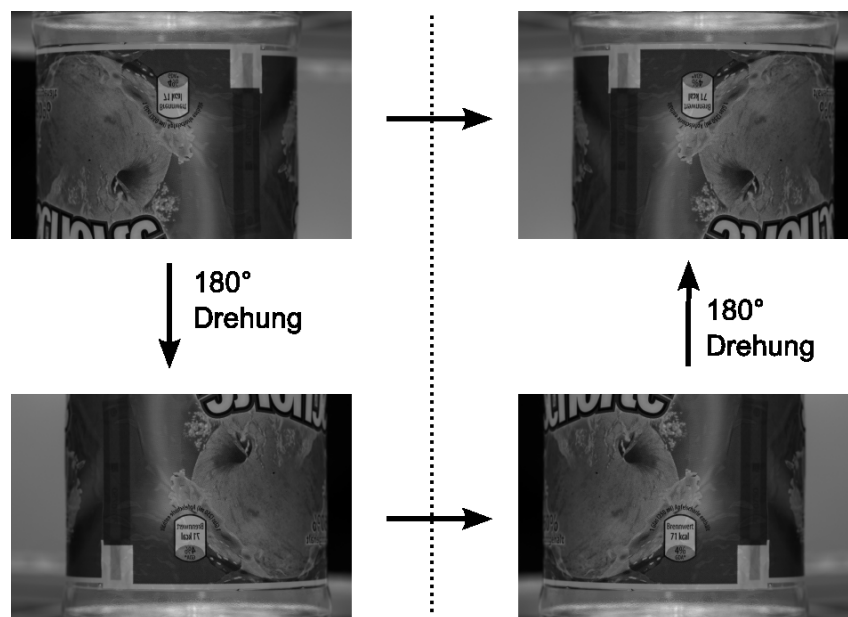


Abbildung 4.3: Orientierung der Kamera zum Kamerabild. Oben links ist die ursprüngliche Bilddatei abgebildet. Die Spiegelungen und Drehungen davon verdeutlichen die Orientierung des Kamerabildes (siehe Text). Die Pfeile nach unten und oben deuten eine Drehung um 180° um etwa den Mittelpunkt des Bildes an; die gestrichelte Linie deutet die Achse, an der die Spiegelung stattfindet. Oben rechts ist die gewünschte Darstellung zu sehen.

Daran erkennt man zunächst, dass die Kamera bei diesem Versuchsaufbau zu dem erhaltenen Bild „auf dem Kopf steht“ (180° Drehung) – dies ist jedoch eine

¹⁵In der Fachliteratur zu CCD-Chips werden die digitalen Pixelwerte auch als ADU (*Analog Digital Unit*) bezeichnet.

Frage der Definition. Die Art und Weise, in welcher Reihenfolge die Treibermethode `CapnCamera::GetImageData` die Zeilen (y-Werte) des CCD-Chip ausliest (siehe weiter unten), definiert „oben“ und „unten“ der Kamera. Die Orientierung ist dabei so definiert, dass die Kamera „richtig herum steht“, wenn die Anschlüsse nach unten zeigen – oder wenn der Schriftzug „Apogee“ auf dem Gehäuse zu lesen ist (vergleiche etwa Abbildung 3.3a). Diese Orientierung der Bildzeilen kann im Hinblick auf H.E.S.S. beibehalten werden (vergleiche Kapitel 4.3.1).

Zusätzlich ist das Bild aber an einer vertikalen Achse gespiegelt – erst nach einer Spiegelung an dieser Achse stimmen die Koordinatensysteme von Gegenstand und Bild in ihrer Parität überein. Das liegt an der Reihenfolge, wie die Treibermethode die Spalten (x-Werte) des CCD-Chips ausliest:

Die Pixelwerte werden mit der Treibermethode `CapnCamera::GetImageData` in einen Array¹⁶ eingelesen. Dieser eindimensionale Array hat eine Länge von der Höhe mal der Breite des Bildes. Die Höhe ist die Anzahl der Pixelzeilen auf der y-Achse des Koordinatensystems des CCD-Chips, und die Breite die Anzahl der Pixelspalten auf der y-Achse. In diesem Array werden die Pixelzeilen aneinandergereiht: Zunächst werden alle x-Werte ($x = 0$ bis $x = \text{Bildbreite} - 1$) zu einem y-Wert gespeichert, danach auf dieselbe Art die x-Werte zu dem $y+1$ -Wert usw. Das an einer vertikalen Achse gespiegelte Bild erhält man also durch jeweilige Umkehrung der Zeilen: Die x-Werte werden nun in der Reihenfolge $x = \text{Bildbreite} - 1$ bis $x = 0$ zu einem y-Wert gespeichert, danach auf die gleiche Art die x-Werte zum nachfolgenden $y+1$ -Wert usw.

Diese Spiegelung wurde in der CCD-Kameraschnittstellenkomponente implementiert, so dass die Koordinatensysteme von Gegenstand und Bild kongruent sind: Zum einen musste die Methode `TakeImage` für die koordinatensystemabhängigen Eingabewerte an entsprechender Stelle angepasst werden; und zum anderen die Methode `GetImage` für den Bildpuffer zur Ausgabe (vergleiche Anhang B).

Teilauslese des CCD-Chips

Die Eingabewerte `xMin`, `yMin`, `xMax` und `yMax` der Methode `TakeImage` der Kameraschnittstelle legen den Bereich fest, den die Kamera auslesen soll (vergleiche Anhang B). Dadurch ist es möglich, jeden beliebigen Bereich des CCD-Chips auszulesen – insofern dieser nicht Null ist. Ein kleiner Auslesebereich spiegelt sich zum Beispiel in der Speichergröße der FITS-Dateien wieder. Abbildung 4.4 ist ein Beispiel für die Funktionalität der Teilauslese des CCD-Chips der Alta U2.

Binning des CCD-Chips

Ebenfalls durch einen Eingabewert – nämlich die Variable `mode` – der Methode `TakeImage` wird festgelegt, in welchem Binningmodus die Kamera eine Aufnahme auslesen soll (siehe Anhang B). Zur Erinnerung: Beim Binning werden Pixel zu Pixelblöcken zusammengefasst, wodurch sich die Lichtempfindlichkeit erhöht

¹⁶*Array* kommt aus dem Englischen und hat die Bedeutung Anordnung oder Reihe. Hier wird im Speziellen eine Datenstruktur bezeichnet, die mit einem Vektor vergleichbar ist (Prinz & Kirch-Prinz 2002).



Abbildung 4.4: Teilauslese des CCD-Chips. Das große Bild zeigt eine Vollbildaufnahme (1536 x 1024 Pixel), davon abgehend eine Aufnahme mit einer Größe von 300 x 300 Pixel und eine Aufnahme mit 100 x 100 Pixel.

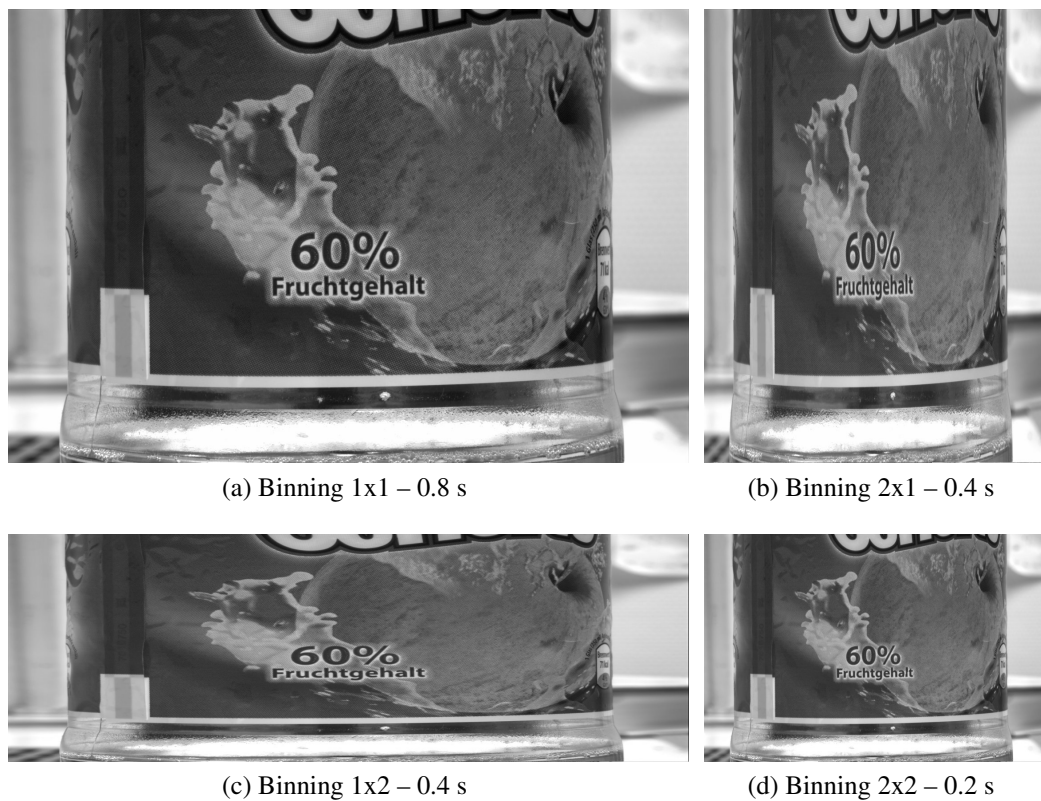


Abbildung 4.5: Binning des CCD-Chips. Zu sehen sind Aufnahmen mit verschiedenen Binningmodi: oben links das Standardbinning (1x1), oben rechts (2x1) und unten links (1x2) ein asymmetrisches Binning und unten rechts ein symmetrisches (2x2). Je nach Modus wurde die Belichtungszeit um den entsprechenden Binningfaktor angepasst.

und das Auflösungsvermögen verringert. In Abbildung 4.5 sind exemplarisch vier Vollbildaufnahmen mit jeweils verschiedenem Binningmodus und angepasster Belichtungszeit zu sehen.

Beim Aufruf der StartCamera-Methode werden die möglichen Binningkom-

binationen der angeschlossenen USB-Kamera ermittelt (vergleiche Anhang B). Es stellte sich heraus, dass mit der Kamera Alta U2 hundert Binningkombinationen möglich sind: von einem 1x1-Binning bis zu einem 10x10-Binning. Jede Achse kann also jeweils 1 bis 10 Pixel zu Blöcken unabhängig von der anderen Achse zusammenfassen. Laut Hersteller soll in y-Richtung sogar ein Binning bis zu 1024 – also einer ganzen Bildspalte – möglich sein (vergleiche Tabelle 3.2 in Kapitel 3.2.2). Bei Bedarf wäre zu prüfen, ob man in den Treibern oder dem Speicherregister der Kamera den maximalen Binningwert in y-Richtung verändern kann. Für die spätere Funktionalität bei H.E.S.S. ist dies jedoch nicht relevant.

Eigenschaften des Kameraverschlusses

Die Belichtungszeit der CCD-Kamera ist im allgemeinen Fall mit zwei Zeiten identisch: der Öffnungszeit des Kameraverschlusses und der Integrationszeit des CCD-Chips. Die Kamera synchronisiert dabei diese beiden Zeiten, um eine zeitgenaue Belichtung zu erreichen. Können diese Zeiten nicht genau synchronisiert werden, ist die Belichtungszeit gleich dem Minimum aus Integrationszeit und Öffnungszeit des Kameraverschlusses.

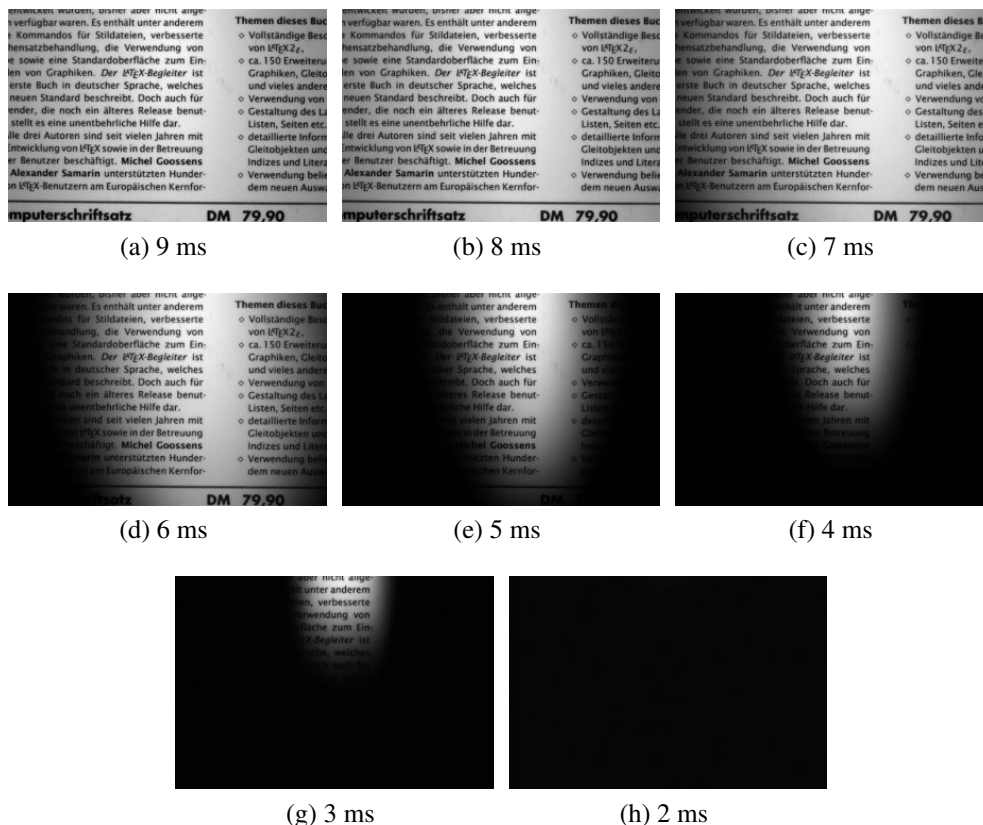


Abbildung 4.6: Das Verhalten des Kameraverschlusses im Millisekundenbereich: Von oben links (a) nach unten rechts (h) wurde die Belichtungszeit um jeweils 1 ms verringert. Man sieht, dass ab einer Belichtungszeit von etwa 7 ms der Kamerverschluss einen Einfluss auf das Bild hat.

Wie man in Kapitel 3.2.2 gesehen hat, gibt der Hersteller des Verschlusses aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften eine minimale Öffnungszeit von 6 ms an, wogegen der CCD-Chip eine minimale Integrationszeit von 10 μ s erlaubt. In Abbildung 4.6 ist diese Eigenschaft zu sehen: Ab einer Belichtungszeit von etwa 7 ms erkennt man den Einfluss des Kameraverschlusses, der sich bei solchen kurzen Zeiten nicht ganz öffnen kann.

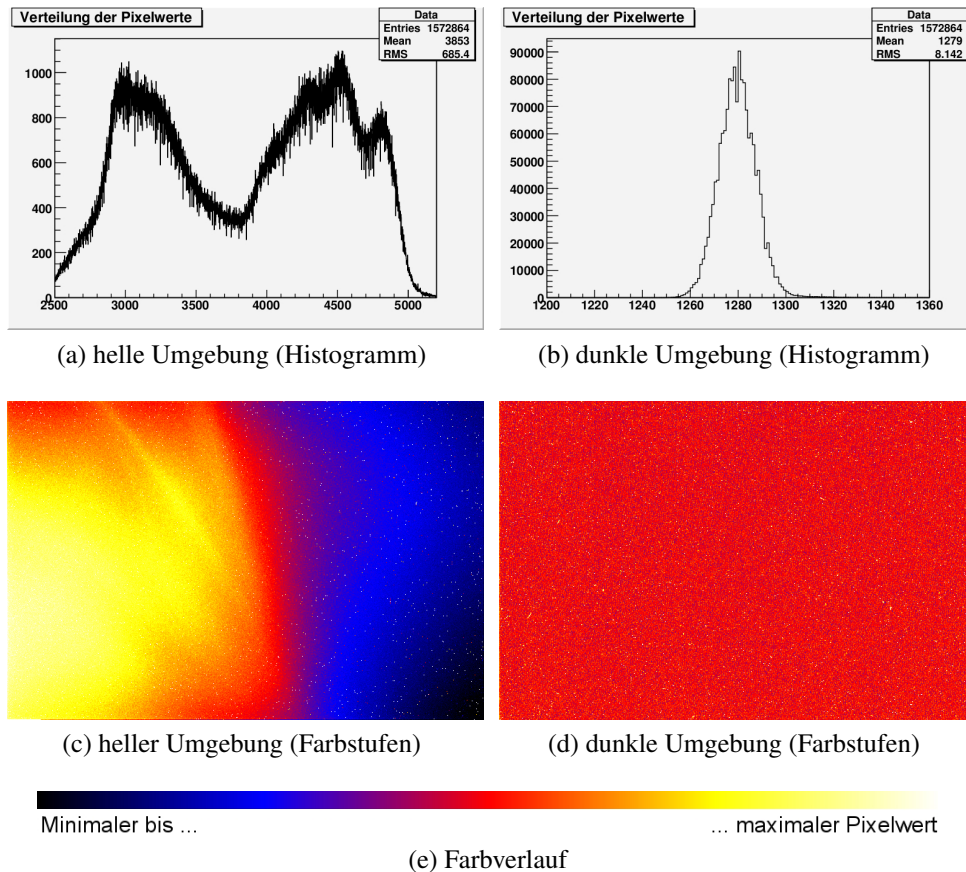


Abbildung 4.7: Lichtdurchlässigkeit des Kameraverschlusses. Links und rechts sind jeweils eine Dunkelaufnahme über eine Stunde Belichtungszeit zu sehen – wobei die linke Aufnahme in einer hellen Umgebung (a und c) und die rechte in einer dunklen (b und d) gemacht wurde. Die oberen zwei Histogramme (a und b) zeigen jeweils die Häufigkeitsverteilung der Pixelwerte der beiden Aufnahmen. Die unteren zwei Bilder (c und d) verdeutlichen jeweils die Verteilung der Pixelwerte auf dem CCD-Chip in einem farblichen Verlauf (e). Im Gegensatz zu den bisherigen Bildern wurde dabei diesmal für den Verlauf ein beschränkter Bereich an Pixelwerten berücksichtigt: Das linke Bild (c) hat einen minimalen Pixelwert von 2500 bis zu einem maximalen von 5200 – das rechte Bild (d) umfasst einen Bereich von 1200 bis 1360 Pixelwerten. Die Histogramme (a und b) zeigen ebenfalls den jeweiligen Bereich an.

Die Schnittstellenmethode `TakeImage` hat zwei weitere Eingabewerte: Über den Eingabewert `seconds` kann man die Integrationszeit des CCD-Chips angeben; und mit dem Eingabewert `shutterOpen` wird bestimmt, ob der Verschluss während dieser Zeit geöffnet werden oder geschlossen bleiben soll (vergleiche Anhang B).

So kann man beispielsweise CCD-Aufnahmen zu verschiedenen Integrationszeiten bei geschlossenem Kameraverschluss machen – also ohne den Chip direkt zu belichten. Diese Aufnahmen werden als Dunkelbilder (engl. *dark images*) über eine bestimmte Integrationszeit des Chips bezeichnet, da der CCD-Sensor dunkel bleibt. Somit kann man etwa das thermische Rauschverhalten des CCD-Sensors untersuchen, was in Abschnitt 4.2.4 beschrieben wird.

Es hat sich aber herausgestellt, dass der geschlossene Verschluss nicht vollständig lichtundurchlässig ist. Das ergeben zwei Dunkelaufnahmen mit einer relativ langen Belichtungszeit von 3600 Sekunden ohne aufgeschraubtes Objektiv in unterschiedlicher Umgebung: Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, nimmt die Dunkelaufnahme bei einer hellen Umgebung (a und c) höhere Pixelwerte an, die über die CCD-Chipebene nicht gleichverteilt sind – im Gegensatz zu der Dunkelaufnahme in einer nahezu dunklen Umgebung (b und d) bei der die Pixelwerte um den Mittelwert gleichverteilt sind.

Dieser Effekt fällt aber relativ gering aus und ist für die weitere Anwendungen unkritisch: Für Kalibrationsbilder wie den Dunkelaufnahmen, die bei geschlossenem Kameraverschluss gemacht werden, ist eine dunkle Umgebung zu wählen. Dies erreicht man beispielsweise dadurch, dass man ein Objektiv mit aufgesetztem Objektivdeckel an die Kamera schraubt. So gelangt kein Licht auf den CCD-Sensor, wie die Dunkelaufnahmen diverser Messungen gezeigt haben (Abschnitt 4.2.4). Bei einer Verwendung für H.E.S.S. hat man zwar keine leichte Möglichkeit dem Objektiv der am Teleskop angebrachten Kamera ein Deckel aufzusetzen, jedoch werden solche langen Dunkelaufnahmen in der Anwendung nicht benötigt; und bei Kalibrationsaufnahmen mit einer geringen Integrationszeit ($< 1\text{s}$) ist die Lichtdurchlässigkeit des Kameraverschlusses vernachlässigbar.

An dieser Stelle sollen die verwendeten Datenbearbeitungsmethoden vorgestellt werden: Die ersten zwei Aufzählungspunkten erläutern kurz das Auswertungsverfahren der eben betrachteten Dunkelaufnahmen, die in Abbildung 4.7 auf zwei verschiedene Weisen dargestellt sind. Insbesondere die zweite Methode (Histogramm) wurde für Abschnitt 4.2.4 für die Auswertung von CCD-Aufnahmen benutzt. Der dritte Punkt erklärt ein weiteres Verfahren für Grafiken, die in diesem Auswertungskapitel dargestellt sind:

- **Bilder mit angepassten Farb-/Graustufen:** Hierbei werden nicht – wie zu Anfang beschrieben – alle Pixelwerte (0 bis 65535) auf eine Skala mit 256 Grau- oder Farbstufen transformiert. Stattdessen wird ein bestimmter Bereich an Pixelwerten ausgewählt und nur auf diesen Bereich wird die Farb- bzw. die Grauskala gelegt. So lässt sich ein Pixelwertebereich feiner darstellen und man erhält ein Bild mit einem stärkeren Kontrast. Der Verlauf bleibt dabei weiterhin linear. Dies wurde hier mit dem Programm DS9 (Joye & Mandel 2003) gemacht, bei dem man die Grenzen der Skalierung manuell auswählen kann.
- **Histogramme:** Die Histogramme zeigen die Häufigkeitsverteilung der Pixelwerte einer Aufnahme an. Dafür wurde ein kleines Python-Skript¹⁷ benutzt

¹⁷Die ursprüngliche Struktur dieses Skript wurde von D. Horns übernommen.

(van Rossum 2010): Dabei werden die Werte aller Pixel mit dem Modul Numpy¹⁸ in ein Array geschrieben. So kann das arithmetische Mittel (Mittelwert) mit

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i$$

und die Standardabweichung einer Normalverteilung mit

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - x)^2}$$

berechnet werden. Wenn im Folgenden von *dem* Pixelwert einer Aufnahme gesprochen wird, ist damit der Mittelwert mit der Standardabweichung als Fehler gemeint. Mit Hilfe von ROOT (Bruns 2010) werden die Werte in ein Histogramm mit einem angepassten Binning geschrieben. Zudem kann die Verteilung etwa an eine Gaussverteilung gefittet werden.

- **Weitere Grafiken:** Mit Hilfe von Gnuplot (GNU 2010b) kann man relativ leicht Datenpunkte einer ASCII-Tabelle zeichnen und gegebenenfalls Funktionen an den Verlauf der Datenpunkte fitten. So wurden zum Beispiel die Grafiken in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 erstellt.

4.2.2 Messungen und Ergebnisse zum Kühlverhalten

Eine wichtige Komponente der Alta U2 Kamera ist das Kühlsystem – bestehend aus einem Peltier-Element am CCD-Sensor, einem daran angebrachten Kühlelementen, wie z. B. dem Gehäuse, und den vier Lüftern, die für die Abwärme sorgen. Die Kühlung wird über Methoden der Kameraschnittstelle ein- (StartCooling) und ausgeschaltet (StopCooling). Unabhängig davon lassen sich die Lüfter mittels der Methode SetFanMode regeln (vergleiche Anhang B). Damit kann der CCD-Chip für ein rauschärmeres Verhalten auf eine Temperatur heruntergekühlt werden, die laut Hersteller etwa 50 °C unter der Umgebungstemperatur liegt und bei Erreichen der Zieltemperatur auf ±0.1 °C stabil bleibt (vergleiche Kapitel 3.2.2). Bevor die Dauer und die Funktionsweise des Ausschaltens bzw. Einschaltens der Kühlung beschrieben wird, folgen zunächst ein paar allgemeine Bemerkungen und Beobachtungen zum Kühlsystem der Kamera. Die Temperaturabhängigkeit des CCD-Chips wird in Kapitel 4.2.4 beschrieben.

Die Alta U2 hat zwei Temperatursensoren, deren aktuelle Werte man über die jeweilige Methode der Schnittstelle auslesen kann: die Temperatur des CCD-Chips (CCDTemperature) und die des Kühlkörpers (HSTemperature).¹⁹ Die Temperaturen werden dabei in der Einheit Grad Celsius (°C) angegeben. Diese Temperaturangaben sind vom Hersteller geeicht. Es ist bei Bedarf möglich, den Eichfaktor im

¹⁸Numpy ist ein Modul für Python, um mehrdimensionale Arrays zu verarbeiten. Vergleiche numpy.scipy.org.

¹⁹Ebenfalls über die Schnittstelle kann die Zieltemperatur für den CCD-Chip ausgelesen werden, die die Kamera bei aktivierter Kühlung versucht zu erreichen (GetTemperature). Dieser Wert ist jedoch ein statischer Wert, der im Speicherregister der Kamera steht (vergleiche Anhang B).

Speicherregister der Kamera zu verändern. Für die Messungen wurden jedoch die Werkseinstellungen verwendet, da zu einem Test der Funktionalität der Kühlung relative Temperaturangaben ausreichen.

Beim Betrieb der Kamera stellte sich zunächst heraus, dass die Kühlung und die Lüfter aktiv sind, sobald die Kamera an ihre Stromversorgung angeschlossen wird: Das interne Speicherregister der Kamera aktiviert die Kühlung bei einer voreingestellten Zieltemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer mittleren Lüftergeschwindigkeit.²⁰ Bei Bedarf kann laut Hersteller das Speicherregister umgeschrieben werden, um etwa die Kühlung bei einer erstmaligen Stromversorgung zu deaktivieren. Es wurden jedoch auch hier die Werkseinstellungen belassen, da es bei einer Benutzung für H.E.S.S. nicht von Nachteil ist, falls die Kühlung gleich aktiv ist (vergleiche Abschnitt 3.2.3).

Eine zweite Beobachtung war, dass die CCD- und die Kühlkörper-Temperatur bei ausgeschalteter Kühlung abhängig von der Stufe der Lüfter ist: Je höher die Geschwindigkeit des Lüfters desto mehr Wärme wird abtransportiert und desto kühler bzw. wärmer ist die CCD- bzw. Kühlkörper-Temperatur. Da die Temperatur der CCD antiproportional zu der des Kühlkörpers verläuft (vergleiche die folgenden Abbildungen 4.8 und 4.9), gleichen sich diese Temperaturen bei folgender Konfiguration an: Schaltet man den Lüfter bei deaktivierter Kühlung aus, steigt die Temperatur des CCD-Chips an und die des Kühlkörpers sinkt, bis diese sich treffen. Dieser Vorgang wurde aber während des Messbetriebs nur einmal probeweise durchgeführt, um den temperaturempfindlichen CCD-Chip nicht zu sehr zu strapazieren (vergleiche 4.2.4).

StartCooling

In Abbildung 4.8 ist der Temperaturverlauf beim Einschalten der Kühlung zu sehen. Zum Zeitpunkt Null wurde in diesem Beispiel die Kühlung bei einer Zieltemperatur $-60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aktiviert. Die Kamera stellt nach 22 Minuten und 35 Sekunden eine neue Zieltemperatur von $-28.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ automatisch ein. Etwa eine Minute vorher hatte die Kamera die in dieser Messung tiefste Temperatur von $-30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht, konnte dann aber nicht mehr weiter kühlen, wie der Temperaturverlauf zeigt. Tritt so ein Fall ein, wird die Zieltemperatur automatisch auf eine neue Zieltemperatur (*back-off point*) gesetzt, die sich aus der aktuellen CCD-Temperatur zuzüglich $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ zusammensetzt. Diese Funktion (*back-off function*) ist in den Kameratreibern implementiert.²¹ Damit wird sichergestellt, dass die Kühlung über einen längeren Zeitraum stabil zu einer CCD-Temperatur aufrechterhalten bleibt (Apogee 2010).

Nachdem die neue Zieltemperatur automatisch gesetzt wurde, dauert das Erreichen dieser Temperatur verhältnismäßig lange: Erst nach etwa weiteren 40 Minuten – insgesamt also nach etwa 60 Minuten – hat sich die CCD-Temperatur stabil auf die Zieltemperatur eingependelt (vergleiche Abbildung 4.8). Von da an bleibt die

²⁰Die Geschwindigkeit der Lüfter kann auf vier verschiedene Stufen gesetzt werden: keine (aus), niedrige, mittlere und hohe Geschwindigkeit (vergleiche Methode `SetFanMode` in Anhang B).

²¹Den *back-off point* kann man bei Bedarf höher oder niedriger als die $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ über der aktuellen CCD-Temperatur durch eine Treibermethode einstellen. Der Wert wurde jedoch bei den $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ belassen.

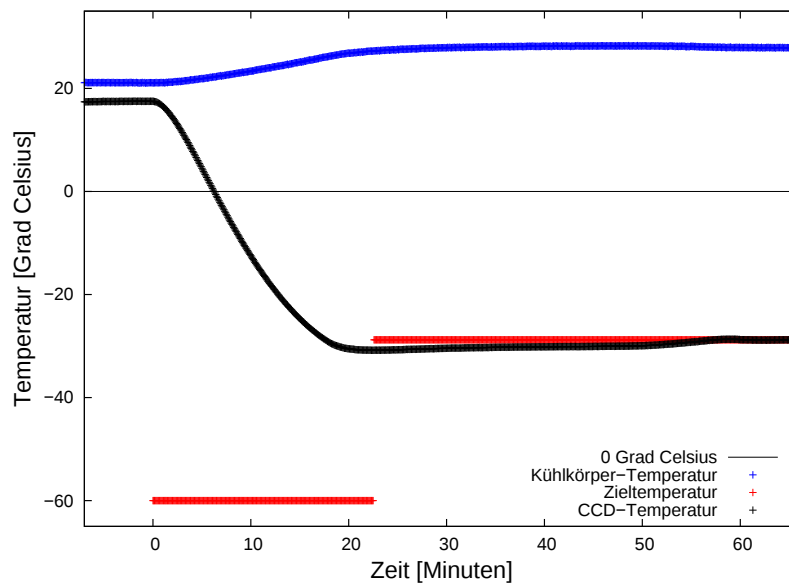


Abbildung 4.8: Exemplarischer Verlauf der Kamertemperaturen beim Einschalten der Kühlung. Zu sehen ist der Temperaturverlauf der CCD- (schwarz), der Kühlkörper- (blau) und der Zieltemperatur (rot) über etwa 1 Stunde. Die Kühlung wurde zum Zeitpunkt Null aktiviert, alle 5 Sekunden wurden die Temperaturen ausgelesen und die Lüfter liefen auf höchster Stufe (fanmode = 3).

CCD-Temperatur mit einer maximalen Schwankung von ± 0.1 °C stabil – auch über einen längeren Zeitraum, wie im folgenden Abschnitt 4.2.3 gezeigt wird.

Nach dieser Kühl-Methode dauert es also etwa eine Stunde bis eine stabile Temperatur erreicht wird. Dies wäre für eine Anwendung bei H.E.S.S. nicht unbedingt zufriedenstellend, da die CCD-Kameras zu Schichtbeginn eingeschaltet werden und für Aufnahmen während der Teleskopruns möglichst zeitnah ihre Betriebstemperatur erreichen sollten (vergleiche dazu Kapitel 2.4). Allerdings ist in diesem Beispiel die später stabile CCD-Temperatur von -28.8 °C bereits nach etwa 18 Minuten zum ersten Mal erreicht. Darum wäre zu empfehlen, eine realistische Zieltemperatur bei der Aktivierung der Kühlung abhängig von der Umgebungstemperatur zu wählen. Wie andere Messungen zeigten, wurde eine Zieltemperatur von -25.0 °C stets ohne Zurücksetzen (*back-off*) in etwa 20 Minuten erreicht – zumindest für eine Laborumgebung. Daher wurde die Zieltemperatur von -25.0 °C als Standardzieltemperatur in der Schnittstelle implementiert (vergleiche StartCamera in Anhang B).

Dies wäre für die Umgebung an den H.E.S.S.-Teleskopen bei einer Installation der USB-Kamera anzupassen. Aber selbst wenn man bei H.E.S.S. stets die Zieltemperatur von -60.0 °C wählen würde, könnte man die CCD-Aufnahmen nach 20 Minuten dennoch verwenden: Eine Temperaturschwankung von ± 2 °C wäre für eine Anwendung bei H.E.S.S. unkritisch, da das temperaturabhängige Rauschen sich in diesem Bereich nicht stark verändert (vergleiche Kapitel 4.2.4) und keine Aufnahmen mit relativem Bezug hinsichtlich der Temperatur gemacht werden.

In diesem Beispiel blieb die Kühlung etwa 1.5 Stunden an und die CCD-Temperatur auf -28.8 °C im Bereich der oben erwähnten Temperaturschwankung stabil, bevor die Kühlung deaktiviert wurde.

StopCooling

Beim Stoppen der Kühlung kam es während des Testbetriebs der Kamera zu Problemen. Es stellte sich heraus, dass eine Deaktivierung des Kühlers über die Treiber-Methode `CapnCamera::write_CoolerEnable(false)` nicht konstant funktionierte: Manchmal konnte man die Kühlung damit abschalten, manchmal wiederum nicht. Es hat sich gezeigt, dass eine bestimmte Abfolge mehr Erfolg hatte: Schaltete man den Kühler aus, wartete eine Sekunde, schaltete ihn dann wieder an, wartete wieder eine Sekunde und dann wieder aus, stoppte die Kühlung in den meisten Fällen erfolgreich.

Hinzukommt aber, dass eine abrupte Deaktivierung des Kühlers nicht vorteilhaft für den CCD-Chip ist, und so Schäden an diesem verursachen könnte.²² Aus diesen Gründen wurde die `StopCooling`-Methode der Schnittstelle nach einem Vorschlag²³ von Treiberentwickler Mills (2010) neu entwickelt. Im Wesentlichen wird dabei der Kühler aktiv ausgeschaltet. Das bedeutet, dass man eine Zieltemperatur nahe der Umgebungstemperatur einstellt und die Kühlung aktiviert bleibt. So erwärmt sich der CCD-Chip langsam und beständig. Erreicht der CCD-Chip eine bestimmte Temperatur, wird der Kühler nach der oben erwähnten Aus-An-Aus Sequenz komplett deaktiviert. Danach wartet die Schnittstelle bis eine Sicherheitstemperatur erreicht ist (vergleiche Anhang B).

Den Verlauf der Kameratemperaturen bei einer Anwendung der `StopCooling`-Methode ist in Abbildung 4.9 exemplarisch zu sehen. Bei einer CCD-Temperatur von $-28.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird in diesem Beispiel (vergleiche oben) die `StopCooling`-Methode zum Zeitpunkt Null aufgerufen: Die Zieltemperatur wird auf $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesetzt und es wird aktiv erwärmt. Nach 15 Minuten und 20 Sekunden hat der CCD-Chip eine Temperatur von $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht und die aktive Kühlung wird ausgeschaltet. An dieser Stelle ist in dem Verlauf der CCD-Temperatur ein leichter Knick zu erkennen, da die Erwärmung des CCD-Chips ohne aktivierte Kühlung schneller stattfindet. Nach weiteren etwa 8 Minuten hat der CCD-Chip die ursprüngliche Temperatur von $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dieses Beispiels erreicht.

In weiteren Messungen mit dieser Routine zum Abschalten des Kühlers wurden keine weiteren Probleme der Funktionalität festgestellt. Damit wurde eine zuverlässige Routine im Hinblick auf einen Einbau bei H.E.S.S. entwickelt. Lediglich die oben erwähnte Sicherheitstemperatur wäre eventuell auf die neue Umgebungstemperatur anzupassen.

²²Aus einer privaten E-Mail-Kommunikation mit D. Mills vom 23.11.2009: „I believe there are at least 2 intrinsic reasons to heat AND cool slowly. First, rapid temperature changes will stress the physical ccd connectors more, and second, faster changes promote trap creation and/or migration in the substrate, leading to changes in the hot-pixels/dark-current (so you need more frequent calibrations).“

²³Aus einer privaten E-Mail Kommunikation mit D. Mills vom 10.11.2009: „It is better to use the ‚cooling‘ feature to ramp the temperature slowly back to ambient, rather than switch it off e.g.: 1. Read the heatsink temp (ht); 2. Set the CoolerSetPoint close to ambient e.g ht-15; 3. Set CoolerEnable true; 4. Check ccd temp == setpoint, loop until true; 5. Set CoolerEnable false.“

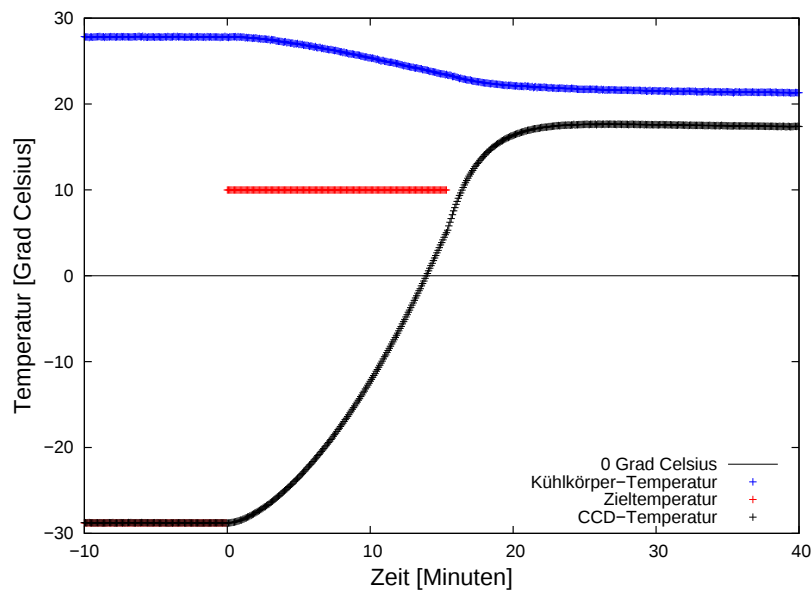


Abbildung 4.9: Exemplarischer Verlauf der Kamertemperaturen beim Ausschalten der Kühlung. Zu sehen ist der Temperaturverlauf der CCD- (schwarz), der Kühlkörper- (blau) und der Zieltemperatur (rot) über etwa 40 Minuten. Die Kühlung wurde zum Zeitpunkt Null deaktiviert, alle 5 Sekunden wurden die Temperaturen ausgelesen und die Lüfter liefen auf höchster Stufe (`fanmode = 3`).

4.2.3 Messungen und Ergebnisse zum Langzeitverhalten

Es wurden mehrere Langzeitmessungen durchgeführt, um das Verhalten der Kamera über einen längeren Zeitraum zu testen. Dabei traten keine Probleme auf. Zwar hatte sich die Kamera während der Entwicklung der Schnittstelle zwei Mal „aufgehängt“ bzw. ist die Schnittstelle „eingefroren“: Die Kamera konnte zwar noch angesteuert werden, aber ab einem bestimmten Zeitpunkt lieferte das Programm immer diesselben Werte für die jeweilige Anfrage. In der finalen Version der Schnittstelle und des Testprogramms traten bis zum Ende dieser Arbeit keine derartigen Fehler mehr auf, so dass diese zwei „Abstürze“ höchstwahrscheinlich auf eine ehemals fehlerhafte Programmierung zu dem jeweiligen Zeitpunkt zurückzuführen sind.

In Abbildung 4.10 ist eine Messung zu sehen, die den Temperaturverlauf der beiden Temperatursensoren der Kamera über einen längeren Zeitraum zeigt: Beim Verlauf der Kühlkörpertemperatur sind leichte Schwankungen über die 2-Tages-Messung zu erkennen, was vermutlich auf Schwankungen in der Umgebungstemperatur zurückzuführen ist. Der Temperaturverlauf des CCD-Chips zeigt dagegen die gewünschte Stabilität über 2 Tage mit einer Temperatur in diesem Beispiel von -25.34 ± 0.08 °C (vergleiche Abbildung 4.11c).

Während dieser Aufzeichnung wurden zusätzlich alle 15 Sekunden Biasaufnahmen gemacht. Biasaufnahmen sind Aufnahmen mit minimalster Belichtungszeit²⁴ bei geschlossenem Kameradeckel. Damit kann der grundsätzliche Untergrund des CCD-Chips bestimmt werden, der in jeder CCD-Aufnahme vorhanden ist (Howell

²⁴Zur Erinnerung: Die minimalste Belichtungszeit ist im Falle der Alta U2 eine Integrationszeit von 10 μ s.

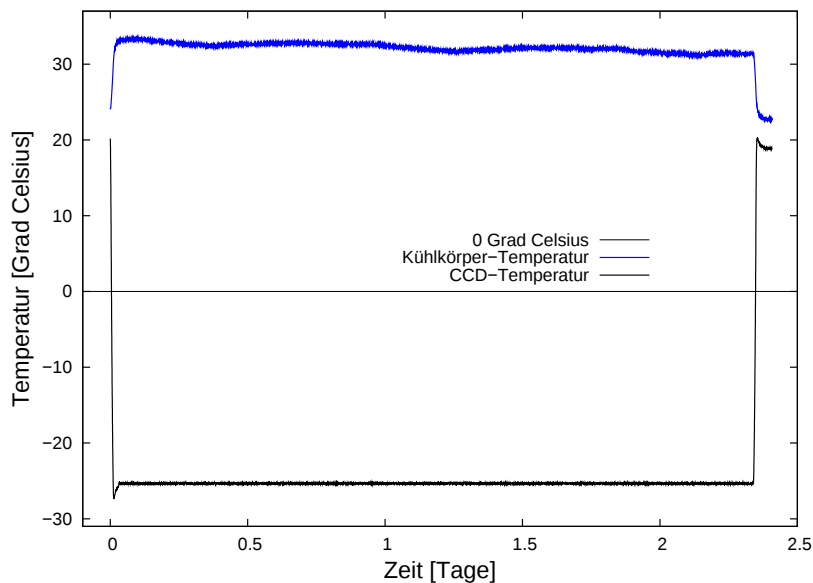
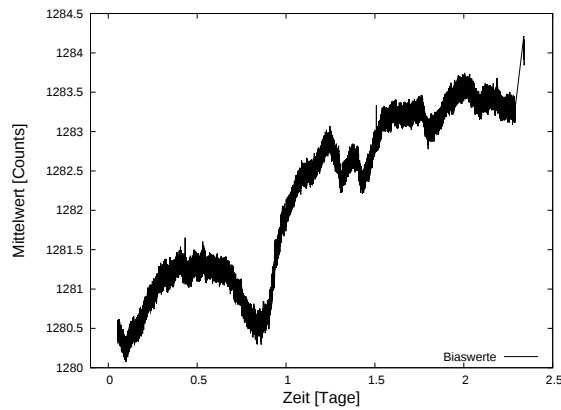


Abbildung 4.10: Temperaturstabilität der Kamera. Der Verlauf über 2 Tage der Kamertemperaturen der CCD (schwarz) und des Kühlkörpers (blau) zeigt die Stabilität der CCD-Temperatur. Die Kühlung wurde zum Zeitpunkt Null aktiviert und nach ca. 2.3 Tagen gestoppt. Alle 15 Sekunden wurden die Temperaturen ausgelesen und die Lüfter liefen auf höchster Stufe (fanmode = 3).

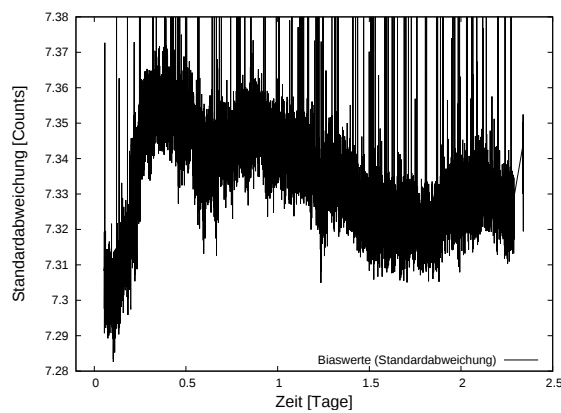
2006). In Kapitel 4.2.4 wird näher auf die Biasaufnahmen eingegangen. Von diesen Biasaufnahmen wurde mit Hilfe einer Routine im Testprogramm sofort jeweils der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung einer Normalverteilung aller Pixelwerte berechnet. Diese zwei Werte wurden in der Aufzeichnungsdatei gespeichert – die Pixelwerte des internen Bildpuffers wurden also danach verworfen bzw. überschrieben und nicht als FITS-Datei gespeichert.

In Abbildung 4.11a ist der Verlauf der Mittelwerte der Biasaufnahmen von der hier betrachteten exemplarischen Langzeitmessung zu sehen – wobei nur die Biaswerte zu sehen sind, die bei der erreichten und stabilen Kühltemperatur des CCD-Chips von -25.3°C errechnet wurden. Man sieht, dass die Biaswerte sich über die Dauer der Messung verändern: Neben kleinen Schwankungen ist ein steigender Trend, der zusätzlich in einer größeren Variation schwankt, zu erkennen. In anderen Messungen zeigte sich ebenfalls, dass sich der Biaswert über eine längere Zeit der Kühlung in einer Größenordnung von etwa bis zu ± 5 Counts verändern kann. War die Kamera über längere Zeit ausgeschaltet, wurde ebenfalls ein Versatz des Biaswertes in dieser Größenordnung beobachtet. Den Werten für die Standardabweichung liegt auch eine Variation über die Zeit zugrunde (Abbildung 4.11b). Eine Korrelation ist dabei nicht zu erkennen. Aber nach einem deutlichen Anstieg der Standardabweichung innerhalb des ersten halben Tages der Messung ist ein Trend nach unten zu erkennen.

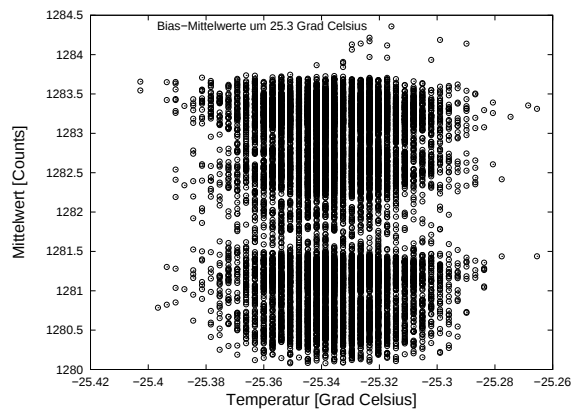
Auch wenn es sich hier um einen nicht relevanten Effekt für eine Anwendung bei H.E.S.S. handelt, ist diese Variation dennoch verwunderlich: In der Literatur und auch auf Anfrage bei Apogee konnte keine Erklärung dafür gefunden werden. Die einzige Erklärung des Autors für diesen Effekt ist, dass man daran die Emp-



(a) Mittelwerte gegen die Zeit



(b) Standardabweichungen gegen die Zeit



(c) Mittelwerte gegen die Temperatur

Abbildung 4.11: Die Veränderung der Biaswerte über einen längeren Zeitraum (a und b) und die Verdeutlichung der Temperaturstabilität (c). Entsprechend der Zeitskala der vorangegangenen Abb. 4.10 sind in (a) die errechneten Mittelwerte der Biasaufnahmen aufgezeichnet und in (b) die dazugehörigen Werte der Standardabweichung. In (c) sind diese Biaswerte (Mittelwerte) gegen die Temperatur gezeichnet. Daran erkennt man die Temperaturstabilität, die sogar unter $\pm 1^\circ\text{C}$ liegt. Zudem ist die digitale Temperature Auflösung zu erkennen, die etwa bei 0.003°C liegt.

findlichkeit des CCD-Chips erkennt, und dass das Halbleitermaterial sich über eine längere Zeit in einer bestimmten Umgebungstemperatur „plastisch“ verändert. Dieses Phänomen wäre mit weiteren Messungen zu untersuchen.

4.2.4 Messungen und Ergebnisse des CCD-Chips

In diesem Abschnitt wurden charakteristische Größen des CCD-Chips vorgestellt und ermittelt. Hierbei handelt es sich um Messungen von exemplarischen Charakter und um keine detaillierte, statistische Analyse des Verhaltens des CCD-Chips. Dies ist jedoch zum Überprüfen der vollen Funktionalität der CCD-Kamera im Hinblick auf eine Anwendung bei H.E.S.S. ausreichend. Für eine detailliertere Analyse und ein genaueres Verständnis der Funktionsweise von CCD-Chips sei an dieser Stelle auf die Diplomarbeit von Cramme (2009) und zwei Lehrbücher verwiesen, Howell (2006) und Holst (1996), die im Rahmen dieser Arbeit als Referenz benutzt wurden. Auf den Webseiten des Kameraherstellers (Apogee 2010) werden einige einfache Verfahren zur Ermittlung der kameraspezifischen Werte vorgestellt, die im Folgenden angewandt wurden.²⁵

Linearität des CCD-Chips

In Messungen wurde die Linearität des CCD-Chips überprüft. Eine typische Eigenschaft eines halbleiterbasierten CCD-Chips ist die lineare Proportionalität von einfallender Lichtmenge zu Pixelwerten (vergleiche Kapitel 1).

Zum Überprüfen der Linearität werden Aufnahmen bei geöffnetem Kameraverschluss zu verschiedenen Integrationszeiten verwendet, bei denen der CCD-Chip möglichst homogen über seine Fläche ausgeleuchtet wird. Diese Art von Aufnahmen nennt man Weißbilder (engl. *flat fields*) – das Pendant zu den bereits oben beschriebenen Dunkelbildern, bei denen die Integrationszeit ebenfalls variiert wird, jedoch der Kameraverschluss geschlossen bleibt (vergleiche Kapitel 4.2.1). Bei einem perfekt homogen ausgeleuchteten CCD-Chip wären die Pixelwerte über das gesamte Vollbild um einen Mittelwert normal gleichverteilt. Dafür wurde das Objektiv abgeschraubt und auf die Kameraöffnung zehn Lagen normales, weißes Papier gelegt, um eine möglichst homogene Beleuchtung des gesamten CCD-Chips zu erreichen. Die Kamera wurde mit der Öffnung nach oben unter einen Tisch platziert und die graue Unterseite der Tischplatte mit einer Lampe beleuchtet, um so eine diffuse Lichtquelle herzustellen.

In Abbildung 4.12 ist das Ergebnis eines solchen Versuchsaufbaus zu sehen. Es wurden Aufnahmen mit einer variierenden Belichtungszeit von 0.1 bis 10 Sekunden gemacht. Der CCD-Chip hatte dabei eine Temperatur von -26 °C. Trägt man die Mittelwerte der jeweiligen Aufnahme gegen die Belichtungszeit auf, so erhält man eine lineare Beziehung, wie man links unten in der Abbildung sieht. Es zeigt sich jedoch, dass die Pixelwerte nicht gleichverteilt, sondern zu höheren Werten verschoben sind (rechte Bildspalte in der Abbildung). Das liegt daran, dass man mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau keine optimalen Weißbilder erhält: Der

²⁵Unter der Rubrik *CCD University* befindet sich ein Kapitel *CCD Test Methods*, in dem diese Verfahren beschrieben werden (Apogee 2010).

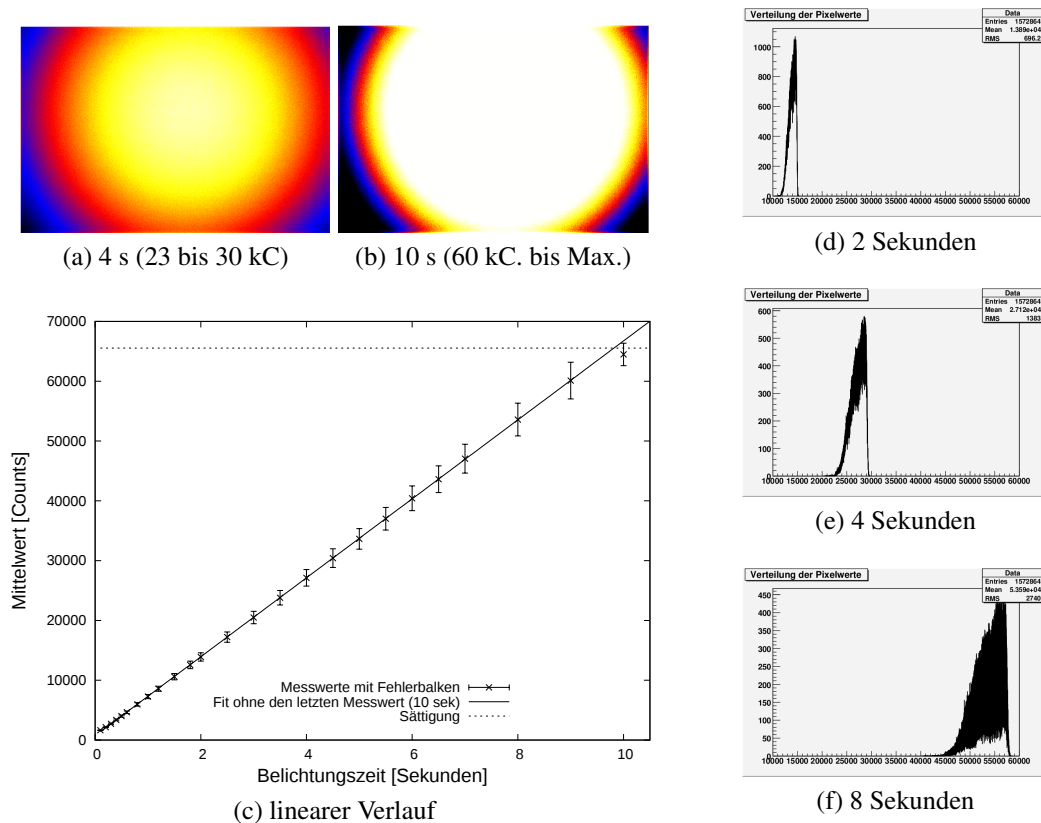


Abbildung 4.12: Linearität des CCD-Chips. Links (c) ist der lineare Verlauf zu sehen: Je länger die Belichtungszeit, desto höher der mittlere Pixelwert. Die angelegte Gerade hat in diesem Beispiel eine Steigung von etwa 6600 Counts / Sekunde. Bei knapp 10 Sekunden Belichtungszeit wird der maximale Pixelwert von 65535 Counts und damit die Sättigung erreicht. Die oberen zwei Bilder zeigen die Variation der Pixelwerte über die Chip-Ebene durch einen angepassten Farbverlauf: (a) bei vier Sekunden Belichtungszeit und (b) bei 10 Sekunden, wobei hierbei fast alle Pixel gesättigt sind. In Klammern ist hier der minimale und maximale Pixelwert für den angepassten Farbverlauf genannt – kC steht für Kilo-Counts. Die rechte Spalte zeigt die Verteilung der Pixelwerte exemplarisch für 2 (d), 4 (e) und 8 Sekunden (f) jeweils über denselben Bereich von 10 bis 60 kC.

CCD-Chip wurde nicht perfekt homogen ausgeleuchtet, sondern wurde in der Mitte stärker beleuchtet als zum Rand des Chips hin, wie in (a) mit angepassten Farbstufen zu sehen ist. Für die Messung der Linearität ist dieser Umstand jedoch nicht relevant: Da für alle Aufnahmen der gleiche relative Helligkeitsunterschied auf der Chipebene besteht, überträgt sich somit die Linearität auf diesen Verlauf.

Außerdem sieht man, dass der Messwert bei einer Belichtungszeit von 10 Sekunden bereits in den Sättigungsbereich des CCD-Chips fällt. Hierbei nehmen fast alle Pixel den maximalen Wert von 65535 Counts an (vergleiche Teilbild (b) in Abbildung 4.12). Das bedeutet, dass die jeweiligen Pixel kein weiteres Licht in Form von umgewandelten Photoelektronen speichern können – diese also gesättigt sind.

Exemplarische Überprüfung des Datenblatts

Im Folgenden wird gezeigt, wie man mit wenigen CCD-Aufnahmen die charakteristische Größen eines CCD-Chips berechnen kann. Dabei handelt sich um eine einmalige Überprüfung des Datenblatts, um den CCD-Chip auf etwaige Defekte zu untersuchen. Dafür wurden die CCD-Größen nach ähnlicher Methode wie vom Hersteller bestimmt, um sie mit den Werten des Herstellers zu vergleichen. Die Testdaten der hier untersuchten Alta U2 Kamera vom Hersteller sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Kamera	Apogee Alta U2
Seriennummer	090572
Chip-Sensor	Kodak KAF-1603ME
Seriennummer	4H0221 4471
Güteklasse (<i>Sensor Grade</i>)	2
Erste Testdaten vom Hersteller	
Testtemperatur	-27 °C
Bias Level	1266 Counts
Standardabweichung (<i>Standard Deviation</i>)	7.15 Counts
<i>Gain</i>	1.6 e ⁻ / Counts
Kapazität (<i>Maximum Well Capacity</i>)	103,000 e ⁻
Ausleserauschen (<i>RMS Noise</i>)	11.5 e ⁻
Dunkelbild über 120 Sek. (<i>120 Second Dark</i>)	1270 Counts
Dunkelstrom (<i>Dark Current</i>)	0.05 e ⁻ / sec

Tabelle 4.1: Zu sehen ist ein Auszug aus dem Datenblatt der Alta U2. Die Daten stammen aus einem ersten Test der CCD-Kamera vom 17.06.2009, die der Hersteller nach der Produktion gemacht hat. In kursiv sind die jeweiligen englischen Begriffe der Größen zu sehen. [Quelle: Apogee Instruments Inc]

Die aufgelisteten CCD-Größen wurden zum Teil in dieser Arbeit schon vorgestellt. Noch nicht erwähnt wurden der sogenannte Gain, das Ausleserauschen, so wie der Dunkelstrom. Der Gain bezeichnet den Umwandlungsfaktor, der angibt, wie viele Photoelektronen im CCD-Chip dem Pixelwert in Counts entsprechen. Das Ausleserauschen ist ein Störsignal, welches aufgrund der Ausleselektronik auftritt. Der Dunkelstrom ist ebenfalls ein Störsignal, welches durch den Halbleiter hervorgerufen wird: Im Halbleitermaterial des CCD-Chips können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Elektron-Loch-Paare entstehen, die nicht durch ein Photon ausgelöst wurden, sondern hauptsächlich durch thermische Elektronen (Howell 2006). Der Dunkelstrom unterliegt damit auch der linearen Eigenschaft des CCD-Chips und ist stark temperaturabhängig, wie man im folgenden Abschnitt noch sehen wird.

Der Hersteller Apogee hat die Testdaten auf folgende Art und Weise bestimmt:²⁶

„We initially cool camera to maximum delta while at roughly 24 °C ambient:

- Bias is measured with 10% ROI (Region Of Interest) in center of array.

²⁶Dies war die Antwort auf eine Nachfrage nach der Genauigkeit der ersten Testdaten. Aus einer privater E-Mail Kommunikation mit C. Thao (Apogee) vom 16.02.2010.

- Dark is measured with 10% ROI in center of array.
- StdDev is measured using 2 Bias images, one subtracted from another, after which StdDev is measured with 10% ROI then divided by square root of 2.
- Gain is measured between 15%-30% of well capacity using 4 bias-calibrated flat images. Two flats are taken at 15% well capacity and two more at 30%. ADU (Analog Digital Unit) is measured from one of each pair of flat images. Each pair is subtracted from one another, after which StdDev is measured with 10% ROI: $\text{Gain} = (\text{flat30a} - \text{flat15a}) / (\text{StdDev}(\text{flat30a} - \text{flat30b})^2 / 2 - \text{StdDev}(\text{flat15a} - \text{flat15b})^2 / 2)$

Nach dieser „Anleitung“ und weiteren Hinweisen zur Vermessung von CCD-Größen²⁷ wurden die Testdaten rekonstruiert. Als Grundlage dienten dazu sechs CCD-Aufnahmen, die bei einer Temperatur von -26 °C aufgenommen wurde. Diese Temperatur war in diesem Beispiel die tiefste stabile Temperatur, auf die die Kamera heruntergekühlt werden konnte. Es wurden zwei Biasaufnahmen gemacht, zwei Dunkelaufnahmen mit jeweils 60 Sekunden Integrationszeit und zwei Weißbildaufnahmen mit jeweils 0.1 Sekunden Belichtungszeit. Beim ersten Weißbild lagen vier Papiere auf der Kameraöffnung, beim zweiten drei Papiere – analog zum Versuchsaufbau der Linearitätsmessung (vergleiche weiter oben).

Die Biasbilder wurden Pixel für Pixel voneinander abgezogen, um ein Differenzbild²⁸ zu erhalten. Von diesem Differenzbild und von den sechs Originalaufnahmen wurde nun jeweils nur ein bestimmter Bildbereich („ROI“) für die weitere Berechnung betrachtet. Dieser Bereich wurde so gewählt, dass man für die zwei Weißbildaufnahmen eine möglichst homogene ausgeleuchtete Fläche erhielt: Der hier gewählte Bereich für alle Bilder ist 255 Spalten (x-Werte von 725 bis 980) und 250 Zeilen (y-Werte von 430 bis 680) groß, was etwa 4% der Gesamtfläche ausmacht. Von diesem Ausschnitt wurde jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Somit erhielt man bei der ersten Weißbildaufnahme einen Mittelwert von 15% und bei der zweiten einen Wert von 24% des maximalen Pixelwert. Damit hatte man die Ausgangsgrößen für die weitere Berechnung in vergleichbarer Größenordnung mit den Testdaten des Herstellers gebracht, wie in der „Anleitung“ von Apogee beschrieben ist.

Die charakteristischen Größen wurden anschließend aus diesen Werten nach folgenden Beziehungen bestimmt:

- Das Bias Level als Durchschnitt der Mittelwerte der beiden Biasaufnahmen.
- Die Standardabweichung als $\frac{\text{Standardabweichung des Bias-Differenzbildes}}{\sqrt{2}}$
- Der Gain als $\frac{\text{Differenz der Mittelwerte der Flatbildaufnahmen}}{\text{Differenz der dazugehörigen Standardabweichungen im Quadrat}}$
- Die Kapazität als Produkt aus Gain und maximalem Pixelwert ($2^{16} - 1$).

²⁷Beispielsweise auf den Webseiten von Apogee (2010) unter der schon erwähnten Rubrik *CCD University*.

²⁸Anmerkung: Differenzbilder haben den Vorteil um etwaige Variationen in Zeilen und Spalten der CCD-Anordnung zu berücksichtigen.

- Das Ausleserauschen als Produkt aus Gain und Standardabweichung.
- Der Dunkelstrom als $\frac{\text{Differenz der Mittelwerte der Dunkelaufnahme und der Biasaufnahme}}{\text{Dauer der Dunkelaufnahme}} \cdot \text{Gain}$

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 4.2 zu finden. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Testdaten des Herstellers sind die meisten Werte zwar nicht im Rahmen des jeweiligen Messfehlers gleich, jedoch liegen sie in etwa derselben Größenordnung. Für eine Anwendung bei H.E.S.S. reicht diese Analyse aus. Für eine genauere Analyse sollten die Messmethode jedoch verändert werden, da die Variation der Werte auf verschiedene systematische Fehler schließen lässt, wie im Folgenden diskutiert wird.

Der ermittelte **Gain-Faktor** aus der Analyse ($1.13 \text{ e}^-/\text{Count}$) unterscheidet sich zu dem Wert aus den Testdaten ($1.6 \text{ e}^-/\text{Count}$) um etwa 30%. Dies ist wahrscheinlich auf Qualität der Weißbilder zurückzuführen. Die experimentelle Schwierigkeit ist es nämlich, eine perfekte Weißbildaufnahme herzustellen – wie sich bei der Messung der Linearität schon zeigte. Zudem ist das Ergebnis stark von der Auswahl des Bildbereichs abhängig. In diesem Fall waren die Pixelwerte über den gewählten Bildbereich zwar relativ homogen, jedoch wurde ein Bereich um die Mitte der Aufnahmen gewählt, wo die Pixel im Vergleich zum Bildrand einen höheren Wert annehmen. Für eine genauere Bestimmung des Gains müsste der Versuchsaufbau verbessert werden, um bessere Weißbilder zu erhalten. Außerdem sollte bei einer genaueren Analyse darauf geachtet werden, dass die Werte abhängig von Pixeln bzw. Pixelbereichen untersucht werden.²⁹

Größe	Wert	Fehler	Einheit
Testtemperatur	-26	0.1	°C
1./2. Biasaufnahme	1282.4 / 1282.2	7.2 / 7.2	Counts
Bias Level	1282.35	5.1	Counts
Differenzbild	0.13	10.14	Counts
Standardabweichung	7.17	-	Counts
1./2. Flatfieldaufnahme	9772 / 15404	81.5 / 107	Counts
Gain	1.13	-	$\text{e}^- / \text{Count}$
Kapazität	74000	-	e^-
Ausleserauschen	8.1	-	e^-
1./2. Dunkelaufnahme	1285.2 / 1285.5	11.2 / 11.6	Counts
Durchschnitt	1285.35	8.1	Counts
Dunkelstrom	0.057	-	$\text{e}^- / \text{Sekunden}$

Tabelle 4.2: Exemplarische Überprüfung der Testdaten vom 27.11.2009. In der Tabelle sind alle relevanten Werte, sowie die Ergebnisse aufgelistet, die man für eine grobe Analyse der charakteristischen Kenngrößen des CCD-Chips braucht. Die Angabe der Fehler von den CCD-Aufnahmen ist die Standardabweichung des Mittelwerts. Bei einem Durchschnitt von zwei Werten (Bias Level und Durchschnitt der Dunkelaufnahmen) ergibt sich der Fehler nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung.

Während die Werte der **Standardabweichung** im Rahmen des Fehlers gleich

²⁹Zum Beispiel wurde in der Arbeit von Cramme (2009) eine solche Analyse durchgeführt.

sind, gibt es einen Unterschied bei den Werten des **Biaslevels**: Der Temperaturunterschied von 1 °C kann die Differenz von $1282 - 1266 = 16$ Counts nicht erklären, wie im folgenden Abschnitt zur Temperaturabhängigkeit der Biaswerte noch gezeigt wird. Die Biaswerte variierten zwar in allen Messungen während dieser Arbeit (vergleiche Abschnitt 4.2.3), aber nicht um eine Höhe dieser Differenz. An dieser Stelle wären weitere Langzeitmessungen notwendig, um eventuell eine Erklärung für die zeitliche Variation der Biaswerte zu erhalten. Für eine Anwendung bei H.E.S.S. ist selbst diese Differenz im Biaswert aber völlig unkritisch und für die Analyse von CCD-Bildern mit einem Sternabbild vernachlässigbar.

Die Werte der **Kapazität** und des **Ausleserausens** unterscheiden sich ebenfalls um etwa 30% und ist damit den Unterschied im Gain-Faktor zurückzuführen, da diese Größen nach den obigen Beziehungen von diesem abhängig sind. Der Wert für den **Dunkelstrom** ist auch vom Gain-Faktor abhängig, aber in etwa gleich. Hier kann aber nicht von einer Richtigkeit des Werts ausgegangen werden, da sich eine weitere systematische Unsicherheit beim Messen des Dunkelstroms zeigt: Eine Bewertung des Dunkelstroms im Allgemeinen folgt am Ende des nächsten Abschnitts.

Temperaturabhängigkeit von Biaswerten und Dunkelstrom

In diesem Abschnitt soll auf die Temperaturabhängigkeit des CCD-Chips eingegangen werden – am Beispiel von Bias- und Dunkelbildern. Für ein Verständnis des Rauschens und damit der Störsignale des CCD-Chips ist eine solche Betrachtung von Bedeutung.

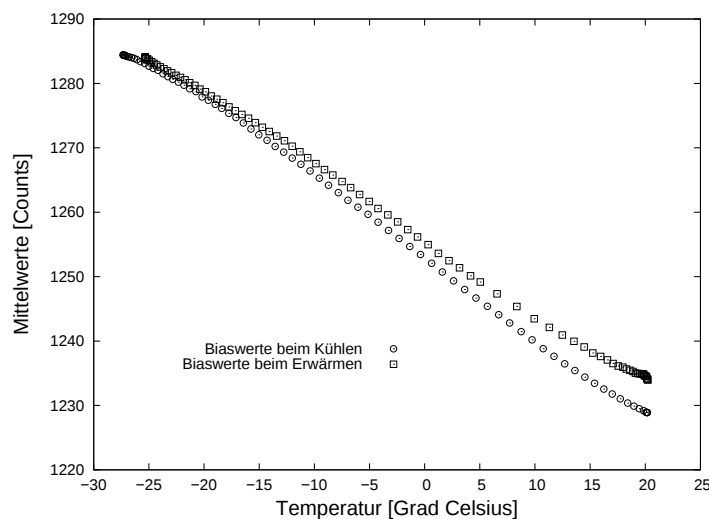


Abbildung 4.13: Temperaturabhängigkeit der Biaswerte. Aufgetragen sind die Biaswerte gegen die CCD-Temperatur, die während der Messung der Kamertemperaturen aus Kapitel 4.2.2 ebenfalls alle 5 Sekunden aufgezeichnet wurden: die Biaswerte während des Kühlens und des Erwärmens des CCD-Chips. Deutlich zu erkennen ist der Versatz der Biaswerte nach 2 Tagen Kühlung (vergleiche Kapitel 4.2.2).

Für die Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Biaswerte dient hier die Aufzeichnung beim Starten und Stoppen des Kühlers aus Kapitel 4.2.2. Neben den

Temperaturen wurden – wie oben bereits beschrieben – der Mittelwert einer Biasaufnahme und die dazugehörige Standardabweichung berechnet und aufgezeichnet. Wie man in Abbildung 4.13 sieht, ist der Biaswert temperaturabhängig und erstreckt sich über einen Bereich von etwa 55 Counts innerhalb eines Temperaturbereichs von knapp 50 °C. Allerdings liegt dieser Abhängigkeit eine Antiproportionalität zugrunde, die man zunächst nicht erwarten würde: je niedriger die Temperatur – also je kühler der CCD-Chip – desto höher der Biaswert. Die Standardabweichung der Biaswerte blieb dagegen über diesen Temperaturbereich hierbei konstant.

Der Biaswert bzw. das Biaslevel repräsentiert das „Untergrundrauschen“, welches durch einen ständigen Gleichstrom hervorgerufen wird, der am CCD-Sensor anliegt (Howell 2006). Eine mögliche Erklärung wäre, dass dieser Gleichstrom durch das Kühlen gleichmäßig steigt. Der Grund dafür konnte weder in der Fachliteratur gefunden, noch auf Nachfrage beim Hersteller Apogee herausgefunden werden.

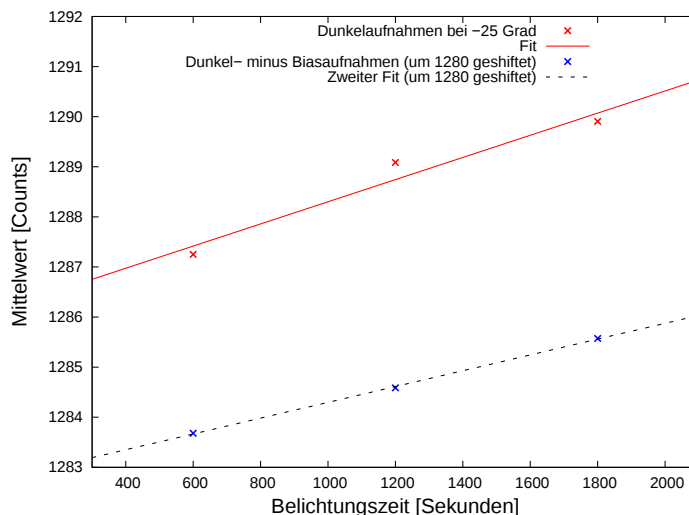


Abbildung 4.14: Dunkelstrommessung zu einer Temperatur von -25 °C. Der Dunkelstrom wurde hierbei als Steigung der angelegten Gerade durch die Messpunkte ermittelt: Für die Dunkelaufnahmen ohne Biasabzug beträgt die Steigung 0.0022 mit einem Fehler von 22%; für die um den Bias bereinigten Werte 0.0016 mit einem Fehler von 2.4%.

Beim Dunkelstrom des CCD-Chips, der das thermische Rauschen beinhaltet, zeigt sich die Temperaturabhängigkeit ebenfalls. Die Kamera wurde in einer Messreihe dafür zunächst auf -25 °C für die entsprechenden Aufnahmen heruntergekühlt, dann für weitere Aufnahmen auf -10 °C aktiv erwärmt und schließlich für entsprechende Aufnahmen auf 19 °C aktiv erwärmt.³⁰ Die Dauer der Dunkelaufnahmen wurde dabei mit 10, 20 oder 30 Minuten verhältnismäßig lang gewählt. Um der beobachteten Änderung des Biaslevels vorzubeugen, wurden jeweils vor bzw. nach den Dunkelaufnahmen Biasaufnahmen gemacht, um dieses Level von der Dunkelaufnahme abzuziehen. Damit erhöht man die Genauigkeit, wie in Abbildung 4.14 zu sehen ist. Der Dunkelstrom wurde als Steigung einer an die Messwerte ange-

³⁰ Anmerkung: Der Kühler war dabei stets aktiv, um auch bei 19 °C die Temperatur über die Dauer der Dunkelaufnahmen stabil zu halten.

legten Kurve jeweils ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass der Dunkelstrom konstant über die Zeit ist – die Pixelwerte sich also linear mit der Zeit vergrößern. Für die Aufnahmen bei einer Temperatur von -25 °C ist diese Methode exemplarisch in Abbildung 4.14 zu sehen.

Die dadurch erhaltenen drei Werte für den Dunkelstrom wurden gegen die Temperatur aufgezeichnet, um die Temperaturabhängigkeit zu verdeutlichen (Abbildung 4.15). An diese drei Messwerte wurde eine Kurve der Form

$$\text{Dunkelstrom}(T) = 0.060 \cdot \exp\left(0.179 \frac{1}{\text{°C}} \cdot T\right) + 0.00091 \left[\frac{\text{Counts}}{\text{sec} \cdot \text{Pixel}} \right]$$

gefittet. Der Verlauf zeigt einen exponentiellen Abfall des Dunkelstroms von hohen zu niedrigen Temperaturen T [°C].

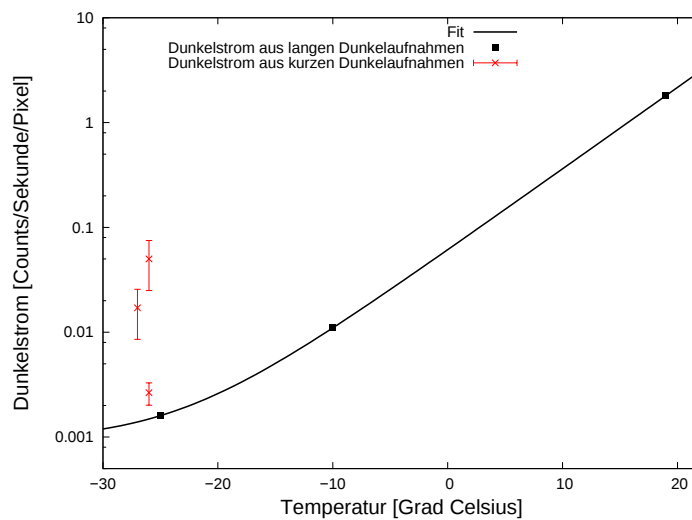


Abbildung 4.15: Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms. An die drei Dunkelstromwerte (dunkle Quadrate), die mit „langen“ Dunkelaufnahmen (10 bis 30 Minuten) ermittelt wurden, ist eine exponentielle Kurve angepasst. Die roten Kreuze repräsentieren Werte für den Dunkelstrom aus Messungen, die mit relativ kurzen Belichtungszeiten (0 bis 2 Minuten) für die Dunkelaufnahmen gemacht wurden (siehe Text).

Dieses erste Ergebnis zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms, der sich über einen Temperaturbereich von etwa -30 bis $+20\text{ °C}$ über drei Größenordnungen erstreckt.

Zudem scheint es, dass die ermittelten Werte für den Dunkelstrom von der Dauer der verwendeten Dunkelaufnahmen abhängen: Die roten Kreuze in Abbildung 4.15 sind Ergebnisse aus Messungen mit einer Dauer von Dunkelaufnahmen mit maximal 2 Minuten Belichtungszeit. Diese Werte für den Dunkelstrom wurden nach der Methode der Analyse der Testdaten ermittelt (vergleiche vorherigen Abschnitt): Der Dunkelstrom ist dabei der lineare Anstieg zwischen Biaswert (0 Sekunden) und dem Wert aus der relativ „kurzen“ Dunkelaufnahme (1 bis 2 Minuten).

Es zeigt sich also, dass die Werte des Dunkelstroms aus „kurzen“ Dunkelaufnahmen stark variieren und sich zu den Werten aus „langen“ Dunkelaufnahmen unterscheiden (Abbildung 4.15). Diese Beobachtung bestätigt die Fachliteratur (Howell

2006), die verschiedene Faktoren aufzählt, die die Linearität des Dunkelstroms beeinflussen. Ein Artefakt ist beispielsweise in den Bildern (c) und (d) von Abbildung 4.7 zu sehen: Über die gesamte Bildebene sind viele helle Punkte – also hohe Pixelwerte – zu erkennen. In der Fachliteratur werden diese Pixel als *hot pixel* bezeichnet. Diese Pixel zeigen einen individuell höheren Dunkelstromwert als die übrigen Pixel.

Eine weitere Überlegung ist, ob kurze Dunkelbildaufnahmen den Dunkelstrom überhaupt zuverlässig abbilden können, da dieser eventuell durch andere Störsignale, wie das Ausleserauschen, übertroffen wird. An dieser Stelle wären für eine genauere Analyse des Dunkelstroms weitere systematische Messungen zu verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Belichtungszeiten notwendig. Außerdem sollte man bei einer Analyse einzelne Pixel bzw. Pixelbereiche getrennt untersuchen (vergleiche Diskussion zur Ermittlung des Gain-Faktors).

Hinsichtlich einer Integration für H.E.S.S. sind diese Schwankungen bzw. Diskrepanzen bei der Ermittlung der Dunkelstromwerte und des Biaslevels jedoch als unkritisch zu bewerten. Für die Anwendung des Lokalisieren von Sternabbildern (Lichtflecke) einer CCD-Aufnahme befinden sich diese Größen bei Weitem im geforderten Bereich. Dies soll abschließend folgende Abschätzung zeigen: Die Lid-CCD-Aufnahme aus Abbildung 2.7 zeigt die Intensitätsverteilung eines Sternabilds des Sterns Spica mit einer visuellen Helligkeit von 0.98 Magnituden. Die Aufnahme wurde dabei um einen homogenen Untergrund (Biaslevel) subtrahiert und die Pixelwerte auf den dadurch erhaltenen Wertebereich normiert, der sich vom Biaslevel der Ap2Ep (ca. 2700 Counts) bis zum maximalen Pixelwert (2^{16} Counts) erstreckt. Danach beträgt das Maximum des Lichtflecks (hier etwa 1%) nach einer hier verwendeten Belichtungszeit von 6.7 sec etwa

$$(2^{16} - 2700) \cdot 1\% = 630 \text{ Counts.}$$

Um diesen Wert hebt sich der registrierte Lichtfleck zudem deutlich von den übrigen Pixeln ab. Für ein solches Signal ist das Rauschen des CCD-Chips vernachlässigbar: Selbst für einen zu hoch angenommenen Wert für den Dunkelstrom von etwa 2 Counts/sec und einem angenommenen Ausleserauschen von etwa 20 Counts beträgt die maximale Variation durch das Rauschen lediglich $20 + 2 \cdot 6.7 \approx 33$ Counts. Nach den bisherigen Messungen für die neue USB-Kamera kann man danach abschätzen, dass solche Sternabbilder mindestens mit der gleichen Genauigkeit aufgelöst würden.

4.3 Integration des CCD-Kamerasystems für H.E.S.S.

Die beiden vorangegangenen Kapitel (4.1 und 4.2) haben gezeigt, dass die neue USB-Kamera im Labor funktioniert und deshalb als Austauschkandidat für eine LidCCD in Frage kommt:

- Der Messbetrieb hat gezeigt, dass die interne Kommunikation des CCD-Kamerasystems zwischen USB-Kamera und MiniPC über die angepasste CCD-Kameraschnittstelle ohne Probleme abläuft.
- Die benötigten Optionen der USB-Kamera hinsichtlich einer Benutzung bei H.E.S.S. (Binning, Teilauslese und Kühlung des CCD-Chips) können verwendet werden.
- Der CCD-Chip zeigt keine gravierenden Fehler auf. Die im Labor gemessenen Werte des CCD-Chips der neuen USB-Kamera stimmen – zumindest in der Größenordnung – mit denen laut Hersteller überein. Damit erreicht der CCD-Sensor die geforderte Sensitivität und Genauigkeit bei Weitem (Kapitel 4.2).

Mit diesen Ergebnissen lassen sich die Kameramodelle der aktuellen LidCCDs (Ap2Ep) und der neuen USB-Kamera (Alta U2) vergleichen. In Tabelle 4.3 sind wichtige Spezifikationen der beiden Modelle im Hinblick auf H.E.S.S. gegenübergestellt:

Kamera	Ap2Ep	Alta U2
Anschluss	PPI	USB
Biaslevel	~ 2700 Counts	~ 1280
Dunkelstrom	0.15 e ⁻ /sec	0.1 e ⁻ /sec [> 0.05 e ⁻ /sec]
Quanteneffizienz (640 nm)	35 %	90 %
Ausleserate (bei 16 Bit)	50 kHz	1 MHz
Auslesezeiten	40-60 sec	> 2 sec [> 1 sec]
StartCooling	~ 20 min	~ 20 min
StopCooling	~ 15 min	~ 20 min

Tabelle 4.3: Vergleich von Spezifikationen der Ap2Ep und Alta U2, die im Hinblick auf H.E.S.S. relevant sind. Die temperaturabhängigen Werte sind für eine Kühl- und Zieltemperatur des CCD-Chips von etwa -25 °C angegeben. Die Angaben in eckigen Klammern sind die gemessenen bzw. abgeschätzten Werte, die in einer systematischeren Messung verifiziert werden müssten. [Vergleiche für die Ap2Ep Petz (2002) und Kapitel 2.5.1 und für die USB-Kamera Kapitel 3.2.2 und 4.2]

Eine Labormessung zu den Auslesezeiten des CCD-Chips bei der neuen Kamera wurde aufgrund der vergleichsmäßig geringen Angabe des Herstellers (> 2 sec) nicht durchgeführt. Nach den Erfahrungen aus dem Messbetrieb ist diese Angabe des Herstellers sogar eine obere Grenze: Die Dauer der Speicherung der Bilddaten in den Bildpuffer der CCD-Kameraschnittstelle liegt unter einer Sekunde. Hinzu

kommt, dass eine Messung der Gesamtauslesezeit der USB-Kamera erst sinnvoll ist, wenn die externe Kommunikation des CCD-Kamerasystems (Ethernet) geklärt ist (siehe Kapitel 4.3.2) und dieses sich an einem H.E.S.S.-Teleskop bzw. in einem vergleichbaren Netzwerk für eine Simulation befindet. Dennoch kann man davon ausgehen, dass die Auslesezeiten sich im Vergleich zum aktuellen LidCCD-Modell erheblich verringern.

Abschliessend sollen im Folgenden die letzten Schritte für eine Integration für H.E.S.S. vorgestellt werden. In Kapitel 4.3.1 werden die Punkte für die Installation des CCD-Kamerasystems an einem Teleskop diskutiert, und in Kapitel 4.3.2 eine Lösung zur Ansteuerung des CCD-Kamerasystems innerhalb der Softwareumgebung von H.E.S.S. beschrieben. Zuvor wird die veränderte Zielsetzung für eine Integration des CCD-Kamerasystems für H.E.S.S. noch mal erklärt.

Veränderte Zielsetzung

Wie eine Integration des Kamerasystems für ein H.E.S.S.-Teleskop konkret aussehen könnte, war lange Zeit innerhalb der H.E.S.S.-Kollaboration nicht geklärt. Zu Beginn dieser Arbeit war geplant, mit der neuen CCD-Kamera die LidCCD eines Teleskops auszutauschen.³¹ Dabei stand die technische Verbesserung im Vordergrund: Die Optik bleibt erhalten, die Technik der Kamera wird hinsichtlich einer stabileren und schnelleren Datenübertragung verbessert.

Auf einer internen Tagung (H.E.S.S.-CCD-Kamera-Workshop 2010) entwickelte sich ein konkreter Plan, der die ursprüngliche Zielsetzung eines Austausches zurückstellte: Die bisherigen CCD-Kameras werden nicht ausgetauscht, aber dazu wird parallel an einem H.E.S.S.-Teleskop das CCD-Kamerasystem installiert – als eine Art zweite LidCCD, die im Folgenden deshalb auch USB-LidCCD genannt wird. Diese Parallellösung ist für die Kollaboration die günstigste: Damit ist zum einen sichergestellt, dass der Messbetrieb der H.E.S.S.-Teleskope weiterhin so abläuft wie bisher, da die Funktionalität der CCD-Kameras momentan zumindest ausreichend für die Anwendungen ist. Zum anderen kann man das neuartige CCD-Kamerasystem konkret in der Umgebung der H.E.S.S.-Teleskope testen und das Wissen über die Funktionalität der USB-Kameras erweitern. Bei einem erfolgreichen parallelen Betrieb würde ein schneller und sicherer Austausch einer LidCCD von Statten gehen können. Zudem kann das Kamerasystem als mögliche Testumgebung beispielsweise für H.E.S.S. II dienen (vergleiche Kapitel 4.3.1 und 5). In den folgenden Unterkapiteln werden die bisherigen Vorbereitungen und Tests für eine solche parallele Installation vorgestellt.

4.3.1 Implementierung der Hardware des CCD-Kamerasystems

Das CCD-Kamerasystem soll an einem H.E.S.S.-Teleskop parallel zur LidCCD und SkyCCD angebracht werden. Für die USB-Kamera des Systems kommt der Bereich um die momentane LidCCD in Frage (vergleiche Abbildung 4.16): Dort ist einerseits ausreichend Platz zum Anbringen einer Halterung und eines Gehäuses, ande-

³¹CT03 galt hierbei als Kandidat, da an diesem Teleskop der erste Spiegelaustausch durchgeführt wird (vergleiche Kapitel 5).

rerseits sollte die USB-LidCCD eine möglichst ähnliche optische Ausrichtung wie die LidCCD selbst haben.

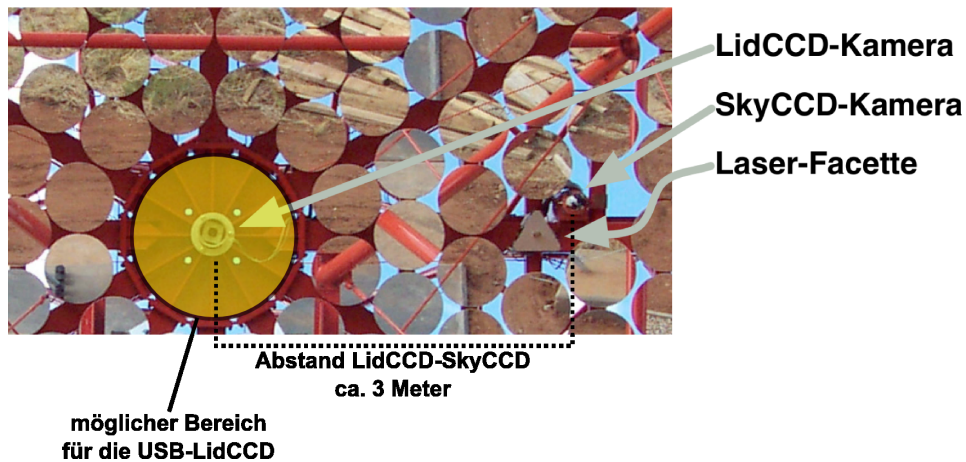


Abbildung 4.16: Mögliche Platzierung des CCD-Kamerasystems und Verdeutlichung der Größenordnung in der Mitte eines H.E.S.S.-Telskops im Bereich der CCD-Kameras. Der mit Gelb unterlegte Bereich gilt als möglicher Ort für die parallel zu installierende USB-Kamera (vergleiche Text). Der Abstand von 3 Metern zwischen LidCCD und SkyCCD bringt eine mögliche Erweiterung des Kamerasystems mit sich, wie man in Kapitel 5 sehen wird.

Die Komponenten des CCD-Kamerasystems müssen nicht unbedingt direkt nebeneinander platziert werden. Die einzige Restriktion ist ein Abstand von 5 Metern: Überschreitet man die Länge des USB-Kabels zwischen Kamera und MiniPC müsste man eine Komponente zur Signalverstärkung dazwischenschalten. Das widerspricht der Idee, die meisten Datenwege über Ethernet herzustellen (vergleiche Kapitel 3.2). Ausgehend von der Platzierung der Kamera werden weiter unten mögliche Orte für die Platzierung des MiniPCs diskutiert.

Unterbringung der USB-Kamera

Die Kamera sollte wie oben erwähnt in dem Bereich des sternförmigen Kranzes in der Mitte platziert werden. Dafür muss eine stabile Halterung konzipiert werden, damit die Lage der USB-Kamera relativ zur Lage des übrigen Teleskops bei verschiedenen Ausrichtungen des H.E.S.S.-Teleskops während des Messbetriebs konstant bleibt. An diese Halterung kommt das wetterfeste Gehäuse für die neue USB-Kamera. Damit das Gehäuse kompatibel zur bisherigen LidCCD-Gehäusehalterung ist, ist geplant, das neue Gehäuse nach demselben Grunddesign des bisherigen LidCCD-Gehäuses zu bauen:³² Durch Verwendung des gleichen Unterbaus³³ ist die Kompatibilität zur Gehäusehalterung der jetzigen LidCCD für einen möglichen Austausch hergestellt.

Es stellte sich aber heraus, dass die inneren Haltesäulen für Kamera und Objektiv geändert werden müssen, da die Anschlüsse bei den neuen Kameras von Apogee seitlich angebacht sind – und nicht wie bei den bisherigen Kameramodellen an der

³² Aus einer privaten Kommunikation mit G. Hermann (H.E.S.S.).

³³ Vergleiche die runde Platte mit den drei dicken Feststellschrauben rechts in Abbildung 4.17.

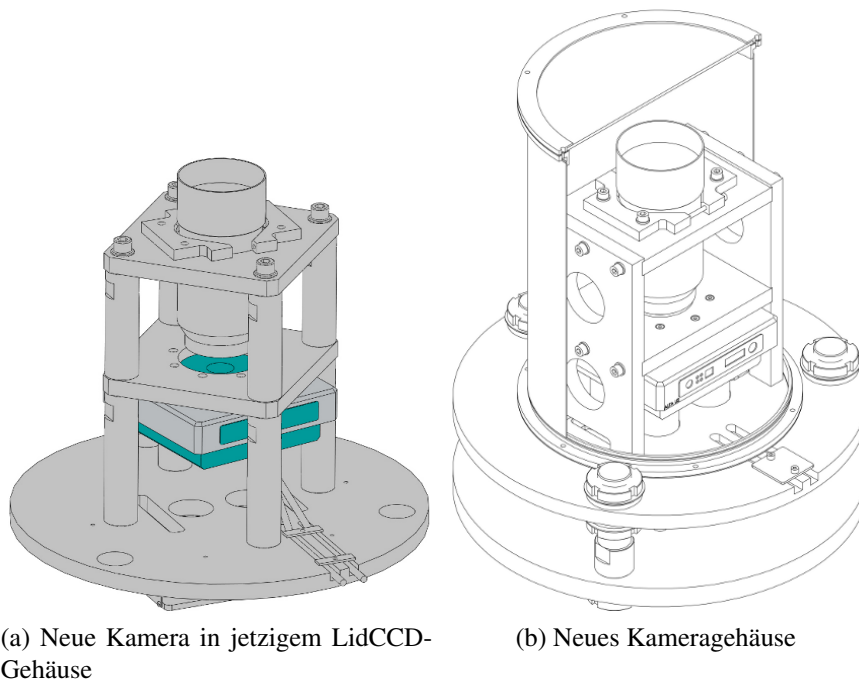


Abbildung 4.17: Ein neues Kameragehäuse für die USB-Kamera: Links (a) sieht man zur Verdeutlichung die neue Alta U2 im aktuellen LidCCD-Gehäuse: Da die Anschlüsse bei der neuen Kamera seitlich angebracht sind, ist die Säule der Halterung im Weg. Darum wurde nach dem Prinzip des LidCCD-Gehäuses ein neues entwickelt (b). [Zeichnungen: R. Kankanyan]

Unterseite.³⁴ Somit ist der einwandfreie Zugang an die Anschlüsse für USB und Stromversorgung nicht gewährleistet. Daher muss ein leicht verändertes Gehäuse nach einem Schubladenprinzip gebaut werden, wie es in der Konstruktionszeichnung in Abbildung 4.17 zu sehen ist. Die endgültige Größe des Gehäuses ist dabei abhängig von der Wahl des Objektivs – welche im Folgenden diskutiert wird.

Optik

Da eine Parallellösung für das Kamerasystem bei H.E.S.S. verfolgt wird, muss zusätzlich eine Optik beschafft werden. Die erste Idee ist, genau dasselbe Objektiv wie bei der LidCCD zu benutzen.³⁵ Dafür wurde bereits ein Adapter gekauft, um ein Objektiv mit einem F-Mount (Bajonettverschluss von Nikkor) an die USB-Ka-

³⁴Aus einer privaten Kommunikation mit R. Kankanyan (Max-Planck-Institut Heidelberg), der das LidCCD-Gehäuse konstruiert hat.

³⁵Das Objektiv Nikkor 135mm/2, welches momentan an den LidCCDs jeweils montiert ist, wird in dieser Ausföhrung nicht mehr produziert: Das Modell mit diesen optischen Eigenschaften gibt es von Nikkor nur noch als Auto-Focus-Objektiv (AF DC-Nikkor 135mm f/2D). Für eine Verwendung für die USB-Kamera des Kamerasystems wäre das aber kein Hindernis, da man dieses Objektiv auch manuell und ohne die Auto-Focus-Option einstellen kann. Lediglich die Abmessungen würden sich leicht verändern: Länge 120 mm (laut Hersteller: „from the camera’s lens mounting flange“) und Durchmesser 95 mm. Vergleiche dazu die Produktseiten des Objektivherstellers (Nikon 2010) sowie die Abmessungen des jetzigen Objektivs in Kapitel 2.5.1.

mera mit einem C-Mount anzuschliessen.

Würde man dieses Objektiv wählen und die USB-Kamera ebenfalls parallel zur optischen Achse des Teleskops ausrichten, würde sich das Gesichtsfeld (Abbildung 2.11) im Vergleich zur LidCCD verschieben. Die Richtung der Verschiebung ist davon abhängig, wo das Gehäuse der USB-Kamera um die LidCCD platziert wird – die Länge der Verschiebung davon abhängig, wie weit die CCD-Chips von LidCCD und neuer USB-Kamera entfernt sind. Bei einem Durchmesser von 36 cm der Unterplatte des Gehäuses, wäre das gleichzeitig der minimale Abstand zwischen den CCD-Chips der Kameras, was einer Verschiebung des Gesichtsfelds von 25% in die entsprechende Richtung gleichkommt.

Denkbar wäre aber auch die optische Ausrichtung oder die Wahl des Objektivs zu ändern. So könnte das Kamerasystem beispielsweise als Testumgebung für H.E.S.S. II dienen: Es gibt momentan Überlegungen für das neue H.E.S.S. II-Teleskop nur eine CCD-Kamera als optisches Feedback zu verwenden, die gleichzeitig die Aufgaben der LidCCD und der SkyCCD übernehmen kann.³⁶ Stattet man die USB-Kamera mit einem Objektiv mit einer kleineren Brennweite aus, könnte man das Gesichtsfeld dahingehend erweitern, dass die USB-Kamera die gesamte Hauptkamera mit einem Himmelsschnitt rundherum im Blickfeld hat. Damit könnte man testen, ob die dadurch verschlechterte Auflösung für die Anwendungen noch ausreichend gut ist. Momentan wird diese Lösung für die Implementierung des CCD-Kamerasystems an H.E.S.S. hinsichtlich des H.E.S.S. II-Teleskops favorisiert. Es muss nur noch ein entsprechendes Objektiv gewählt werden, um später die Ergebnisse der Messungen mit den optischen Dimensionen von H.E.S.S. II (Vincent *et al.* 2005) vergleichen zu können.

Unterbringung des MiniPCs

Desweiteren muss man eine geeignete Unterbringung und geschickte Platzierung für den MiniPC am Teleskop finden.

Der MiniPC hat sich im Laborbetrieb zwar als relativ staubdicht herausgestellt: Nach einem halben Jahr Betrieb wurde das Lüftergehäuse aufgemacht und es war kein sichtbarer Staub im Inneren des MiniPCs zu sehen. Dennoch ist ein spritzwassergeschütztes und einigermaßen gegen Staub abgeschlossenes Gehäuse in einer Umgebung der H.E.S.S.-Teleskope wünschenswert. Eine aktive Kühlung ist nach den Erfahrungen im Labor nicht notwendig: Das Gehäuse des MiniPCs, welches als Kühlkörper fungiert, wird bei Betrieb zwar merklich warm, doch solange der MiniPC sich in keiner völlig luftabgeschlossenen Umgebung befindet, ist die passive Luftzirkulation ausreichend.

Will man auf den Bau eines eigenen Gehäuses für den MiniPC verzichten, könnte man den MiniPC beispielsweise in dem Gehäuse für die USB-Kamera unterbringen. Damit wäre das Kamerasystem auch räumlich kompakt zusammen. Dafür müsste jedoch das bisherige Modell des Gehäuses für die USB-Kamera erweitert werden. Desweiteren könnte man den MiniPC auch in der Elektronikbox platzieren, die sich auf der Rückseite des Spiegelträgers etwa in der Mitte befindet. Zur

³⁶Vergleiche Vortrag von D. Lennarz auf dem CCD-Workshop (H.E.S.S.-CCD-Kamera-Workshop 2010).

Erinnerung: Die Elektronikbox ist die Verteilerbox vieler Kabelleitungen die aufs Teleskop geführt werden (Kapitel 2.5.3). Allerdings wäre hier vor Ort zu prüfen, ob ein sicher verlegtes USB-Kabel unter 5 Meter lang bleibt, wenn man den MiniPC in der Elektronikbox mit der USB-Kamera neben der LidCCD verbindet.

Verkabelung des CCD-Kamerasystems

Die Stromversorgung der beiden Komponenten des Kamerasystems läuft analog zur aktuellen Stromversorgung der CCD-Kameras (Kapitel 2.5.3). Danach werden die Netzteile in der Elektronikbox angeschlossen und können mit der Steuerungseinheit in der Elektronikhütte ein- und ausgeschaltet werden. Momentan sind sechs von acht Fernschalter (*remote*) für Komponenten am Teleskop belegt (Abbildung 4.18), so dass für MiniPC und USB-Kamera die übrigen zwei verwendet werden könnten.



Abbildung 4.18: Die Steuerungseinheit in der Elektronikhütte für die Stromversorgung am Teleskop: Zu sehen sind die Fernschalter (*REMOTE*) zum Ein- und Ausschalten von Komponenten am Teleskop. Damit werden LidCCD und SkyCCD ein- und ausgeschaltet (oben links). Rechts sind zwei bisher unbelegte Schalter. [Photo: H.-S. Zechlin, Dezember 2009]

Das Datenkabel für das CCD-Kamerasystem wäre bei H.E.S.S. ein Netzkabel. Es hat sich nach einiger Recherche innerhalb der H.E.S.S.-Kollaboration herausgestellt, dass momentan am Teleskop kein freier Netzzugang vorhanden ist. Jedoch können ohne weitere Probleme abgeschirmte Netzkabel verlegt werden, da andere Komponenten, wie bspw. die PMT-Hauptkamera, ebenfalls über Ethernet angesteuert werden. Ein solch neu verlegtes Netzkabel würde das Kamerasystem mit einem Hub in der Elektronikhütte verbinden, und somit den Anschluss zum lokalen Netzwerk herstellen.³⁷

Ein Vorteil des CCD-Kamerasystems ist es, dass das Datenkabel von System zur Steuerungseinheit (Anwendungsrechner) nicht direkt angeschlossen sein muss, wie es aufgrund des Übertragungsprotokolles bei den jetzigen CCD-Kameras der Fall ist (Kapitel 2.5.3). Die Kommunikation mit dem CCD-Kamerasystem kann

³⁷Diese Informationen stammen aus einer privaten Kommunikation mit H.-S. Zechlin (H.E.S.S.), der im Dezember 2009 auf H.E.S.S.-Site in Namibia war.

über ein Netzwerk an Hand des standardisierten Ethernetprotokolls funktionieren (Kapitel 4.3.2).

4.3.2 Ansteuerung des CCD-Kamerasystems

Für eine Fernsteuerung sollte das CCD-Kamerasystem stabil laufen. Falls es doch zu einem Systemfehler kommt, sollte die Option gegeben sein, die Komponenten aus der Ferne neuzustarten. Dafür wurde am Motherboard des MiniPCs ein Jumper umgestellt, um den Switch-Schalter am MiniPC zu umgehen: Dadurch ist der MiniPC im sogenannten *auto-button mode* und schaltet sich automatisch ein, sobald dieser an die Stromversorgung angeschlossen wird. Damit ist ein Neustart mit der oben beschriebenen Steuerungseinheit möglich.

Inzwischen besteht bei vielen Rechnern die Möglichkeit diese sogar über das Netzwerk einzuschalten (*Wake-On-Lan-Option*). Dabei sendet ein anderer Rechner des Netzwerks einen bestimmten Schlüssel an den zu startenden Rechner, der sich bei Empfang des Schlüssels einschaltet. Der hier verwendete MiniPC für das Kamerasystem hat eine solche *Wake-On-Lan-Option* noch nicht: Zum Zeitpunkt der Tests gab es noch kein entsprechendes BIOS-Update, welches diese Option aktiviert.³⁸ Eine solche Option wäre für spätere Systeme sicherlich von Vorteil – dann könnte man den MiniPC als externe Kommunikationsschnittstelle des Kamerasystem komplett über Ethernet steuern.

Server-Client Lösung

Wie Kapitel 2.5.3 aber vor allem Kapitel 3.1 gezeigt haben, ist der momentane Status der Ansteuerung der CCD-Kameras bei H.E.S.S. nicht zufriedenstellend. Daher soll an dieser Stelle ein unabhängiger Ansatz der Ansteuerung für das Kamerasystem vorgestellt werden, der die momentanen Probleme bei den CCD-Kameras vermeidet.

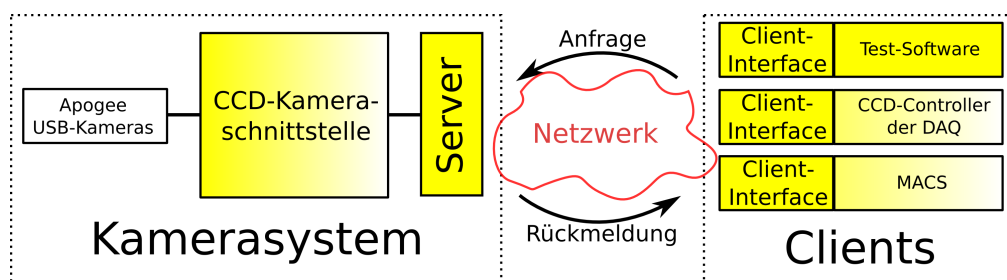


Abbildung 4.19: Die Server-Client Lösung: Das Schema aus Abbildung 4.2 wird um eine Server-Client-Architektur erweitert. Dafür ist auf Seite des CCD-Kamerasystems ein Serverprogramm notwendig, welches auf die Schnittstelle zugreift; und auf Seite der Clients jeweils dasselbe Client-Interface, welches für die bestehenden Programme den bisherigen direkten Zugriff auf die Schnittstelle simuliert und mit dem Server kommuniziert.

Die Idee ist dabei, eine Server-Client-Kommunikation aufzubauen: Der MiniPC stellt dabei den Server dar und die Anwendungsprogramme, die die CCD-Kame-

³⁸Aus einer privaten Kommunikation mit W. Lüers (PLUG-IN Electronic GmbH) am 17.12.2009.

ra benötigen, die Clients – was schematisch in Abbildung 4.19 dargestellt ist. Der MiniPC als Server regelt damit die Kommunikation zwischen CCD-Kamera und Anwendungsprogrammen: Bei einer Anfrage der Clients verarbeitet der Server diese Anfrage, indem dieser über die CCD-Kameraschnittstelle mit der USB-Kamera kommuniziert; den Rückgabewert der Schnittstelle schickt der Server an den anfragenden Client zurück.

Das Konzept der CCD-Kameraschnittstelle (Abbildung 4.2) wird somit um eine zusätzliche Kommunikationsebene erweitert. Client und Server kommunizieren miteinander mit den Grundbefehlen `send` und `recv`³⁹, die jeweils eine Zeichenkette einer bestimmten Länge senden bzw. empfangen können⁴⁰. Dafür muss eine Verbindung zwischen Server und Client über sogenannte *sockets* hergestellt werden, die bis zur Beendigung der Anfrage des Clients aufrechterhalten wird (Hall 2009). Dadurch ist die Hardware-Bindung zwischen Anwendungsprogramm und CCD-Kamera aufgehoben – was zum Beispiel bedeutet, dass auf dem MiniPC jegliches Betriebssystem laufen könnte, unabhängig von dem Betriebssystem der Anwendungssoftware.

Für einen ersten Test einer solchen Kommunikation wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Server- und Client-Programm geschrieben. Das Grundgerüst dieser Programme wurde der Einführung zum *Network Programming* von Hall (2009) entnommen. Der Server wurde so angepasst, dass dieser direkt auf die Methoden der CCD-Kameraschnittstelle zugreift, sobald er eine Zeichenkette mit dem gleichen Namen der Methode empfängt: Empfängt der Server beispielsweise die Zeichenkette `StartCamera`, ruft der Server die Methode `ApogeeUSBCamera::StartCamera` auf (Kapitel 4.1). Bei diesem Test handelte es sich dabei nur um eine Auswahl von Methoden, wie `StartCamera`, `StopCamera` und `CCDTemperature`. Der Client wurde in diesem Test als eine einfache kommandozeilenbasierende Routine geschrieben, die beim Aufruf den Befehl und etwaige Eingabewerte des Befehls erwartet, und diese dann an den Server schickt. Der Programmablauf von Server und Client sieht in diesem Fall wie folgt aus:

0. Der Server ist aktiv und wartet auf eine Anfrage.
1. Der Client sendet einen Befehl und etwaige Eingabewerte an den Server. Der Server stellt die Verbindung her und sichert diese, empfängt den Befehl und die etwaigen Eingabewerte und ruft die entsprechende Methode der CCD-Kameraschnittstelle auf.
2. Der Server schickt eine Information über das Ergebnis des Aufrufs der Kameramethode an den Client: Entweder eine Bestätigung über eine erfolgreiche

³⁹Diese Befehle sind unter Linux in der C-Standardbibliothek `sys/socket.h` enthalten.

⁴⁰Die Funktionen `send` und `recv` verarbeiten die Datenpakete, die verschickt bzw. empfangen werden, jeweils als einen Array des Datentyps `char` – also eine Zeichenkette einer bestimmten Länge (Prinz & Kirch-Prinz 2002). Der Sender (`send`) muss dabei die Länge der Zeichenkette wissen, um dies dem Empfänger (`recv`) mitzuteilen. Somit weiss der Empfänger, wie viele Datenpakete unterwegs sind, auf die er warten muss.

Kommunikation mit der Kamera und ob der Client noch Daten als Ausgabewerte bekommt; oder eine Fehlermeldung über einen nicht gültigen Befehl bzw. über eine Fehlerausgabe der Kameramethode.

3. Der Server sendet die entsprechenden Daten an den Client: Entweder wird der Ausgabewert der Methode gesendet oder die Fehlermeldung der Methode.
4. Die Verbindung wird geschlossen. Der Server bleibt aktiv und wartet auf weitere Anfragen.

Im lokalen Netzwerk des Labors funktionierte diese Ansteuerung des CCD-Kamerasystems: Auf dem MiniPC lief der Server und kommunizierte mit dem Test-Client-Programm, welches auf einem anderen Rechner im Netzwerk gestartet wurde. Damit konnte gezeigt werden, dass die Ansteuerung des CCD-Kamerasystems und damit der USB-Kamera über eine solche Server-Client-Architektur funktioniert.

Für eine Implementierung des Kamerasystems bei H.E.S.S. muss das Serverprogramm um alle Methoden erweitert werden. Zudem wäre eine allgemeine Client-Schnittstelle für die Anwendungsprogramme zu empfehlen (vergleiche Abbildung 4.2): Die Client-Schnittstelle kommuniziert mit dem Server und simuliert den bisherigen direkten Zugriff der Anwendungsprogramme auf die Methoden der CCD-Kameraschnittstelle. Nach diesem Prinzip müssten die Anwendungsprogramme (CCD-Controller der DAQ oder CCDCameraWrapper von MACS) jeweils nur geringfügig für die neue Art der Kommunikation angepasst werden (vergleiche Kapitel 2.5.3).

Nach Aufbau einer stabilen Kommunikation wäre abschliessend die Gesamtausleszeit des CCD-Kamerasystems zu testen. Die Übertragungsgeschwindigkeit war in der Testumgebung des lokalen Netzwerks zwar sehr schnell, für eine genauere Untersuchung sollte das Kamerasystem aber in einer Testumgebung der DAQ bzw. dann an einem H.E.S.S.-Teleskop betrieben werden. Es ist aber zu erwarten, dass selbst die Dauer der Datenübertragung der Bild-Arrays als maximale Datengröße unter 2 Sekunden liegen wird.

Weitere Anmerkungen

Der MiniPC sollte nach diesem Plan so konfiguriert werden, dass dieser nach dem Hochfahren des Betriebssystems den Server startet, der sodann im Bereitschaftszustand auf Anfragen wartet. Zusätzlich könnte man im Serverprogramm weitere Kommandos integrieren, die die Kontrolle bzw. die Bedienung des MiniPCs aus der Ferne erleichtern.

Da der MiniPC für den Außeneinsatz konzipiert wurde, hat dieser zum Beispiel auch Messsensoren zur Überprüfung der Temperatur integriert. Je nach Betriebssystem kann man diese während des Betriebs auslesen – unter Ubuntu kann man beispielsweise zwei Temperaturen des MiniPCs auslesen.⁴¹ Eine solche Informa-

⁴¹Im Verzeichnis `/proc/acpi/thermal_zone$` sind es die temporären Dateien `TZ01/temperature` und `THRM/temperature`, die die momentane Temperatur angeben.

tion zur aktuellen Temperatur des MiniPCs wäre in der Umgebung der H.E.S.S.-Teleskope sicherlich hilfreich.

Beim Entwickeln der CCD-Kameraschnittstelle hat sich der USB-Port – zumindest unter dem Betriebssystem Ubuntu – zeitweise aufgehängt; was zum Beispiel bedeutet, dass die Schnittstelle die Kamera am USB-Port nicht mehr erkennen konnte. War dies der Fall, musste man die USB-Verbindung zwischen MiniPC und USB-Kamera kurzzeitig trennen. Danach hat das Testprogramm die angeschlossene Kamera wieder gefunden. Obwohl in der Endversion der Kameraschnittstelle dieser Fehler nicht mehr auftrat, wäre es von Vorteil im Falle eines Falles den USB-Port von der Ferne aus neuzustarten. Dafür gibt es unter Linux diverse Befehle für einen Neustart der USB-Verbindung – ohne das Kabel aus- und einzustecken. Eine solche Funktion wäre für das Server-Client-Programm sicherlich hilfreich.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges CCD-Kamerasystem zur Kontrolle der Optik eines H.E.S.S.-Cherenkovteleskops aufgebaut und getestet. Zunächst wurde gezeigt, dass die CCD-Kameras eine wichtige Komponente für das Verständnis der Optik der H.E.S.S.-Teleskope sind (Kapitel 2), aber gleichzeitig deren aktueller technischer Status nicht zufriedenstellend bis kritisch ist und optimiert werden kann (Kapitel 2.5 und 3.1).

Deshalb wurde ein neuartiges CCD-Kamerasystem entwickelt, welches eine technische Neuerung zu den LidCCDs bei H.E.S.S. darstellt, und welches gleichzeitig die bestehenden Probleme der CCD-Kameras bei H.E.S.S. vermeidet (Kapitel 3.2). Das neuartige CCD-Kamerasystem besteht aus zwei Hardwarekomponenten: aus einer CCD-Kamera zusammen mit einem CCD-Rechner. In diesem Fall handelte es sich um das Kameramodell Alta U2 des Herstellers Apogee, welches über einen USB-Anschluss angesteuert werden kann (USB-Kamera); und einem Rechner im PicoITX-Format (MiniPC), der einerseits die interne Kommunikation mit der USB-Kamera regelt und andererseits die externe Kommunikation mit den Programmen, die die Kamera für ihre Anwendung benötigen.

Die Hardwarekomponenten wurden einzeln und im Verbund des CCD-Kamerasystems erfolgreich auf ihre Funktionalität und ihre Leistungsfähigkeit getestet – soweit es vom Labor aus, fern der H.E.S.S.-Teleskope, möglich war (Kapitel 4).

Dafür wurde zunächst eine Treiber-Schnittstelle geschrieben, die für die interne Kommunikation zwischen MiniPC und USB-Kamera verantwortlich ist. Das Design der Schnittstelle orientiert sich dabei an dem Design der CCD-Kameraschnittstelle für die Kameramodelle von LidCCD und SkyCCD bei H.E.S.S.. Somit wurde diese CCD-Kameraschnittstelle um die USB-Kameras von Apogee erweitert und damit die erste Kompatibilitätsstufe zu H.E.S.S. erreicht (Kapitel 4.1). Der parallele Messbetrieb der USB-Kamera ergab, dass die Alta U2 als Nachfolgermodell der jetzigen LidCCDs in Frage kommt: Die von Anwendungen bei H.E.S.S. benötigten Ausleseoptionen (Kapitel 4.2.1), das Starten und Stoppen des Kühlsystems der Kamera (Kapitel 4.2.2), der Betrieb über eine längere Zeit der Kamera (Kapitel 4.2.3), sowie die charakteristischen Eigenschaften des CCD-Sensors (Kapitel 4.2.4) wurden im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich getestet.

Die Messungen im Labor haben also gezeigt, dass die interne Kommunikation des CCD-Kamerasystems und die USB-Kamera funktionieren. Damit war der

wichtigste Schritt für eine Integration bei H.E.S.S. getan.

Desweiteren wurde die konkrete Integration des CCD-Kamerasystems mit der H.E.S.S.-Kollaboration abgesprochen und vorbereitet (Kapitel 4.3): Danach soll das CCD-Kamerasystem parallel zu den bisherigen CCD-Kameras an einem H.E.S.S.-Teleskop für Testzwecke installiert werden (siehe unten). Es wurde erörtert, dass dafür einige Anpassungen aus Sicht der Hardware notwendig sind (Kapitel 4.3.1). Desweiteren konnte gezeigt werden, dass die externe Kommunikation des Kamerasystems und damit die Integration in das DAQ-System bei H.E.S.S. mit einer Server-Client Lösung leicht umzusetzen ist und funktioniert (Kapitel 4.3.2).

Im Vergleich zum jetzigen System der CCD-Kameras bei H.E.S.S. hat das somit aufgebaute CCD-Kamerasystem einen entscheidenden Vorteil: Die USB-Kamera zusammen mit dem MiniPC stellt ein flexibles Modul dar, welches aus Sicht der Hardware komplett abgekapselt vom übrigen DAQ-System bei H.E.S.S. ist. Damit ist die CCD-Kamera – nicht wie bei der momentanen Installation – an die Hardware der DAQ gebunden. Und somit ist die Wartungsmöglichkeit aller Komponenten sichergestellt.

Mit der Verwendung der standardisierten und inzwischen etablierten Protokolle zur Datenübertragung Ethernet und USB, erhofft man sich, dass das CCD-Kamerasystem über einen längeren Zeitraum wartbar ist. Davon kann man ausgehen, wenn man sich die technische Entwicklung dieser Protokolle anschaut: Inzwischen ist man bei den Generationen USB 3.0 und 10-Gigabit-Ethernet angelangt.¹

Ausblick für H.E.S.S.

Am 25. März 2010 beginnt die erste Periode der Spiegelaustauschkampagne bei H.E.S.S.. Die Kampagne ist die erste große Renovierung der vier H.E.S.S.-Teleskope nach sechs bis acht Jahren Messbetrieb – je nach Teleskop (Kapitel 2.1). Über die Jahre haben die Spiegelemente an ihrer Reflexivität eingebüßt (Kapitel 2.2), so dass die Leistungsfähigkeit des H.E.S.S.-Systems merklich abgenommen hat. Zudem hat man festgestellt, dass viele der Motoren nicht mehr lauffähig sind, da diese durch den äußeren Wettereinfluss, zum Teil korrodiert und festgerostet sind (Spikofsky *et al.* 2008).

Deshalb werden in den nächsten zwei Jahren alle vier Teleskope reihum und nacheinander mit neuen Spiegeln bestückt und die Motoren getestet und gegebenenfalls ausgetauscht: In einer ersten Periode wird CT03 mit komplett neuen Spiegeln bestückt, und die heruntergenommenen werden zur Neubeschichtung verschifft. Ein halbes Jahr später werden diese neubeschichteten Spiegel für das nächste Teleskop verwendet usw.

Das CCD-Kamerasystem soll während dieser Spiegelaustauschkampagne an einem H.E.S.S.-Teleskop installiert werden. Zeigt sich, dass das CCD-Kamerasystem in der Umgebung der H.E.S.S.-Teleskope funktioniert, kann man das Kamerasystem als LidCCD für ein Teleskop benutzen und die dabei entstehenden Vorteile bei den Anwendungen für H.E.S.S. nutzen (Kapitel 3.1).

¹Vergleiche zum Beispiel die Artikel bei Wikipedia: de.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus und de.wikipedia.org/wiki/Ethernet.

Falls es zu einem CCD-Kameraaustausch kommt, sollte man überlegen, ob man das Kameramodell der SkyCCD ebenfalls erneuert. Es hat sich gezeigt, dass bei dem jetzigen Kameramodell der SkyCCD der spezielle PCI/ISA-Anschluss und die *Remote Boost Units* veraltet und anfällig sind – was bedeutet, dass bei einem Ausfall einer Komponente, dass eine schnelle und sichere Reparatur nicht gegeben ist.² Mit einem Nachfolgermodell (Apogee Alta U1) für die SkyCCD mit USB-Anschluss, könnte man das Kamerasystem dahingehend erweitern, dass sowohl die LidCCD als auch die SkyCCD jeweils über einen USB-Anschluss mit dem MiniPC kommunizieren.

Ausblick für zukünftige Teleskopsysteme

Der Ansatz für ein unabhängiges, flexibles CCD-Kamerasystem ist im Hinblick auf die zukünftigen Großprojekte für Cherenkovteleskope interessant. Bei dem Projekt CTA (*Cherenkov Telescope Array*) werden bis zu 50 Cherenkovteleskope dieses System bilden (CTA-Kollaboration 2010). Bei einer solchen Größe sind Überlegungen zur Dezentralisierung der Datenverarbeitung unerlässlich. Ausgehend von dem Prinzip des CCD-Kamerasystems könnte man ein Modul entwickeln, welches die Spiegeleinstellung selbstständig am Teleskop regelt. Dabei würde das Modul nur für die nötigsten Informationen mit dem Hauptsystem kommunizieren – alles andere könnte innerhalb des Systems geregelt werden. Ein möglicher Versuch mit dem CCD-Kamerasystem bei H.E.S.S. wäre dafür, MACS auf dem MiniPC zu installieren: Der MiniPC würde dann mit den entsprechenden Komponenten (LidCCD-Kamera und VMEbus zur Steuerung der Motoren) kommunizieren und eine Spiegeleinstellung regeln.



Wenn man den Gedanken der Dezentralisierung weiterführt, könnte man jedes einzelne Spiegelement mit einem Kamera-Modul ausstatten: Dabei würde an jeder Spiegelfacette ein Kamerasystem montiert sein, welches die Ausrichtung des Spiegels kontrolliert und gegebenenfalls eine Nachjustierung selbstständig regelt. Damit könnte ein Verfahren entwickelt werden, um die Spiegelfacetten während des Messbetriebs ständig nachzujustieren. Diese Korrekturen während des Messbetriebs könnten für große Teleskope, wie sie bei CTA geplant sind, interessant werden: Der Einfluss der Schwerkraft wird sich voraussichtlich stärker auf die Teleskopstruktur – und damit auch auf die elevationsabhängige Abbildungsfunktion des Teleskops – auswirken, als es bei den bisher gebauten Teleskopen der Fall war.

Damit die Kosten für solche Kamerasysteme bei einer Vielzahl von Spiegelementen nicht zu hoch ausfallen, müsste man Kameras verwenden, die nicht 7000 Euro kosten und eine Optik für 1300 Euro benötigen, wie es bei der LidCCD der Fall ist. Bei der Optik kann man sparen, wenn man Objektive mit kleinerer Brennweite verwendet. Damit dieselbe Auflösung – wie z. B. bei der LidCCD – erreicht werden kann, muss die Pixelgröße des Bildsensors angepasst werden, wie in Abbildung 5.1 zu sehen. Inzwischen gibt es auf dem Markt Digitalkameras mit kleineren

²Aus einer privaten Kommunikation mit C. Stegmann (H.E.S.S.).

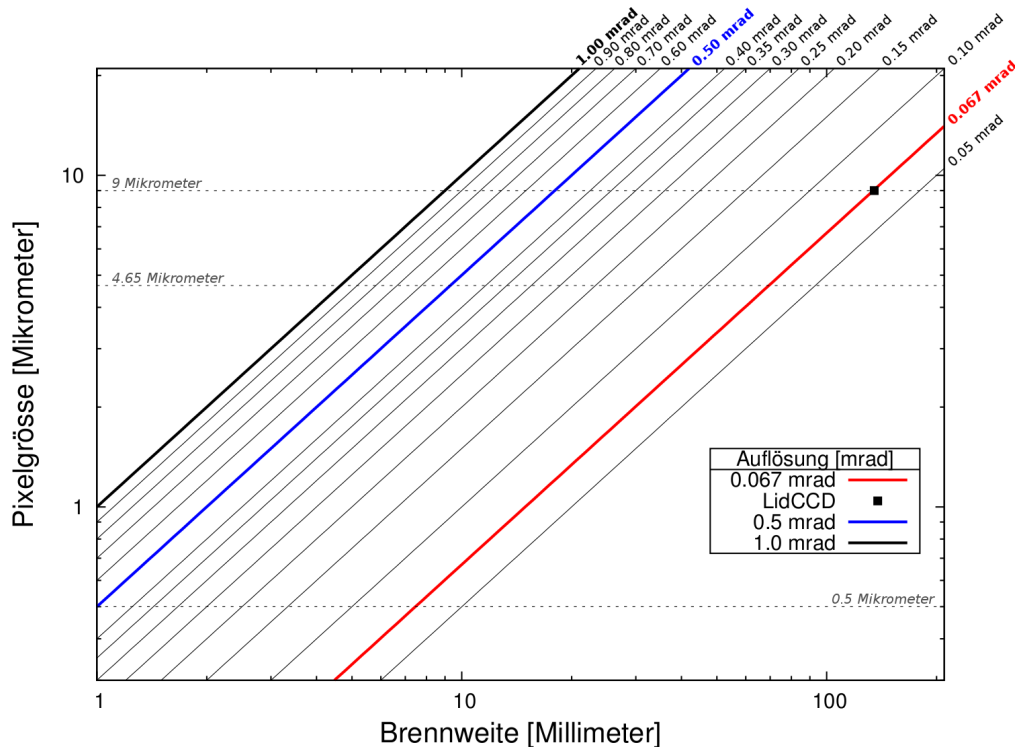


Abbildung 5.1: Geradenscharen zu verschiedenen großen Auflösungen: Eine bestimmte Auflösung α kann man durch eine bestimmte Kombination aus der Brennweite f des verwendeten Objektivs und der Kantenlänge des Pixels a des verwendeten Bildsensors erreichen: $a(f, \alpha) = 2f \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$ (nach Gleichung 2.1)

Kantenlängen der Pixel als $9 \mu\text{m}$: Als Beispiel kostet eine Kamera mit einem CCD-Chip mit Pixelgröße $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ inklusive Linuxtreibern rund 500 Euro.³ Um dieselbe Auflösung wie bei der LidCCD von 0.067 mrad zu erreichen, könnte man ein Objektiv verwenden, welches eine Brennweite um die 70 cm hat (vergleiche Abbildung 5.1). Solche Objektive sind mit einem momentanen Marktpreis von 100 bis 200 Euro vergleichsmäßig erschwinglich.

Webcams haben heutzutage oft eine noch kleinere Pixelgröße und inzwischen werden auch Bildsensoren entwickelt, die aus Pixeln mit einer Kantenlänge im Submikrometer-Bereich – in diesem Fall $0.5 \mu\text{m}$ – aufgebaut sind (Fife *et al.* 2007). Somit könnte man noch kleinere Brennweiten für die gleiche Auflösung verwenden. Zu Prüfen wäre noch, ob diese ungekühlten Bildsensoren eine ausreichende Sensitivität und Genauigkeit für zukünftige Anwendungen erreichen. Um die einleitende Worte dieser Arbeit aufzugreifen: Man darf gespannt sein, was die neuen Technologien und Techniken für einen Erkenntnisgewinn für die Astronomie und die Astroteilchenphysik in Zukunft mit sich bringen.

³Vergleiche beispielsweise die CCD-Kameras beim Vertrieb The Imaging Source Europe GmbH unter www.astronomycameras.com/de/products und die entsprechenden Linuxtreiber aus frei zugänglichem Quellcode unter unicap-imaging.org.

Anhang A

Dateiaufbau der CCD-Kameraschnittstelle

Tabelle A.1: Dateiaufbau der CCD-Kameraschnittstelle: Zu sehen ist der Aufbau der in dieser Arbeit aufgebauten CCD-Kameraschnittstelle. Diese enthält Ordner (fett), die Basisdateien der CCD-Kameraschnittstelle von H.E.S.S. (kursiv) und die notwendigen Treiberdateien für die USB-Kameras von Apogee (normal). Vergleiche dazu vor allem Kapitel 4.1, für die Basisdateien Petz (2002) und für die Treiberdateien Mills (2010).

Ordner- oder Dateinamen	Beschreibung
lib	für die statische Bibliothek
out	für sämtliche compilierte Dateien
bin	für das Testprogramm (nicht Teil der Schnittstelle)
kamera_prog.cpp	Quellcode des Testprogramms (main), greift auf die stat. Bibliothek zu
makefile	zum Erstellen des Testprogramms
src	für die cpp-Quelldateien
ApnCamdata	für verschiedene Kameramodelle
ApnCamData.cpp	Basisklasse für ver. Kameramodelle
ApnCamData_KAF1602EB.cpp	spezielle Klasse für die Alta U2
...	weitere Klassen für weitere Modelle
ApnCamera.cpp	Methoden der Treiberklasse CApnCamera
ApnCamera_USB.cpp	spezielle USB-Methoden (CApnCamera)
ApnCamTable.cpp	für die Zuordnung eines Kameramodells
ApogeeUsbLinux.cpp	für die Komm. mit dem USB-Port
CCDCameraAsyncAction.cpp	<i>für threads</i>
ApogeeUSBCamera.cpp	<i>Methoden der Klasse ApogeeUSBCamera</i>
include	für die Header-Dateien
constants	Ordner mit Dateien mit konstanten Def.
ApnCamData	für ver. Kameramodelle
ApnCamData.h	Def. der Basisklasse für ver. Kameramodelle

ApnCamData_KAF1602EB.h	Def. der speziellen Klasse für die Alta U2
...	weitere Klassen für weitere Modelle
ApnCamera.h	Def. der Treiberklasse CApnCamera
ApnCamera_USB.h	Def. spezieller USB-Methoden (CApnCamera)
ApnCamTable.h	für die Zuordnung eines Kameramodells
ApogeeUsb.h	für die Komm. mit dem USB-Port
usb.h	für den Zugriff auf libusb
CCDCameraAsyncAction.h	<i>für threads</i>
ApogeeUSBcamera.h	<i>Def. der Klasse ApogeeUSBcamera</i>
CCDCamera.h	<i>Def. der Basisklasse CCDCamera</i>
makefile	zum Erstellen der statischen Bibliothek, die alle Funktionen und Treiber der Schnittstelle beinhaltet

Anhang B

Methoden der CCD-Kameraschnittstelle

In Tabelle B.1 folgt eine detaillierte Auflistung und Beschreibung der Methoden der CCD-Kameraschnittstelle. Dabei handelt es sich genau genommen um die Methoden der Klasse `ApogeeUSBKamera`, also der Schnittstellenkomponente für die CCD-Kameras. Insofern diese Methoden nicht neu sind, haben die Methoden für die bisherigen Kameras die gleiche Funktionalität.

Tabelle B.1: In der ersten Spalte stehen die Methoden (fettgedruckt) – der Typ definiert den des Ausgabewertes und in Klammern stehen etwaige Eingabewerte. In der gleichen Spalte folgt jeweils eine Beschreibung der Methode, gegebenenfalls mit Hinweis auf eine wichtige Treibermethode der Klasse `CApnCamera`. Die Spalte **M** gibt an, ob MACS diese Methode direkt aufruft (x) oder nicht (-); die Spalte **C**, ob der Controller der DAQ-Software diese direkt aufruft; und die Spalte **n**, ob diese Methode im Vergleich zur bisherigen Schnittstelle neu ist, also im Rahmen dieser Arbeit hinzugefügt wurde.

Methoden	M	C	n
void StartCamera() Startet die Kamera und initialisiert die Schnittstelle. Details: Kamera wird mit <code>CApnCamera::InitDriver(...)</code> initialisiert. Abhängig von der angeschlossenen USB-Kamera wird ausreichend Speicherplatz für den Bildpuffer reserviert und der Vektor der möglichen Kameramodi wird gefüllt (vergleiche <code>Modes()</code>). Anschließend wird der Lüfter auf seine höchste Stufe geschaltet (<code>SetFanMode(3)</code>) und die Zieltemperatur des CCD-Kühlers wird auf -25 °C gesetzt (<code>SetTemperature(-25.0)</code>).	x	x	-

Methoden	M	C	n
void StopCamera() Stoppt die Kamera, bringt den CCD-Chip auf Umgebungstemperatur und schließt die Kameratreiber. Details: Startet den Stoppvorgang mit der Hilfsmethode <code>PerformStopCamera()</code> . Die Schnittstelle wird in den Status <code>ShuttingDown</code> gesetzt. void PerformStopCamera() wird in einem neuen thread geöffnet, um den Stoppvorgang abzuwickeln. <code>PerformStopCooling()</code> wird aufgerufen, nach Beendigung dieser Routine der Lüfter auf die niedrigste Stufe geschaltet (<code>SetFanMode(1)</code>) und die Kameratreiber werden geschlossen (<code>CApnCamera::CloseDriver(...)</code>), sowie reservierter Speicher freigegeben.	x	x	-
void TakeImage(double seconds, const CCDCameraMode& mode, bool shutterOpen, int xMin, int yMin, int xMax, int yMax) Macht ein CCD-Bild und schreibt die Daten in den Bildpuffer, auf den mit einer <code>GetImage</code> -Methode zugegriffen werden kann. Details: Startet die Belichtung (<code>CApnCamera::Expose(...)</code>) über die Zeit <code>seconds</code> , in einem bestimmten Binning-Modus (<code>mode</code>), mit offenem (<code>shutterOpen = true</code>) oder geschlossenem (<code>shutterOpen = false</code>) Kameraverschluss, und über einen bestimmten Bereich des CCD-Chips (von <code>xMin</code> bis <code>xMax</code> in horizontaler und von <code>yMin</code> bis <code>yMax</code> in vertikaler Richtung). Der Wert für die Belichtungszeit muss zwischen 0.001 und 3600 Sekunden liegen; liegt der eingegebene Wert außerhalb des Bereichs, wird er automatisch auf die jeweilige Grenze gesetzt. Werden für die Werte des Chip-Bereichs jeweils 0 eingegeben, wird automatisch der gesamte CCD-Chip abhängig vom Binningmodus ausgelesen; sind die Werte positiv, aber liegen außerhalb des Wertebereichs für den eingegebenen Binningmodus, werden diese automatisch auf die entsprechenden maximalen Werte gesetzt. Während der Belichtung befindet sich die Schnittstelle im Status <code>Exposure</code> , wird danach in den Status <code>ImageReadout</code> gesetzt und die Hilfsmethode <code>PerformImageReadout()</code> wird gestartet.	x	x	-

Methoden	M	C	n
void PerformImageReadout() wird in einem neuen thread geöffnet, um die Bilddaten in den Bildpuffer zu schreiben (CApnCamera::GetImageData(...)). Nach dem Auslesevorgang wird die Schnittstelle wieder in den Bereitschaftsstatus Ready gesetzt.	-	-	-
void GetImage(unsigned short *imageBuffer, unsigned int maxCount)	-	X	-
void GetImage(int *imageBuffer, unsigned int maxCount)	-	X	-
void GetImage(float *imageBuffer, unsigned int maxCount)	X	X	-
void GetImage(double *imageBuffer, unsigned int maxCount)	-	X	-
Schreibt die ausgelesenen Pixelwerte aus dem Bildpuffer der Schnittstelle in einen externen Array. Details: Die überladene GetImage(...)-Methode schreibt die ausgelesenen Pixelwerte in einen externen Bildpuffer (imageBuffer), der von verschiedenem Datentyp sein kann. Die Variable maxCount gibt dabei die maximale Anzahl von Pixeln an, die in den Puffer geschrieben werden. Alternativ können auch folgende Methoden verwendet werden:			
vector<unsigned short>* GetImageUShort()	-	-	-
vector<int>* GetImageInt()	-	-	-
vector<float>* GetImageFloat()	-	-	-
vector<double>* GetImageDouble()	-	-	-
Details: Diese vier GetImage-Methoden für verschiedenen Datentypen schreiben die ausgelesenen Pixelwerte in einen Vektor.			
Status GetCameraStatus() Gibt den Status der Schnittstelle der Aufzählung Status zurück. Elemente der Aufzählung sind: NotAvailable, Ready, Exposure, ImageReadout und ShuttingDown.	X	X	-
string& Identification() Gibt als Zeichenkette (engl. <i>string</i>) das Modell und die Seriennummer der Kamera aus.	X	X	-

Methoden	M	C	n
void StopCoolingRaw() Stoppt den Kühler direkt. (Nicht empfohlen!)	-	-	x
bool IsCooling() Zeigt an, ob der Kühler aktiv ist oder nicht.	x	x	-
double CCDTemperature() Gibt die aktuelle Temperatur des CCD-Chips in °C zurück.	x	x	-
double HSTemperature() Gibt die aktuelle Temperatur des Kühlkörpers in °C zurück.	-	-	x
void SetTemperature(double targetTemperature) Setzt die Zieltemperatur des Kühlers auf den eingegebenen Wert targetTemperature in °C.	x	x	-
double GetTemperature() Gibt die eingestellte Zieltemperatur in °C zurück.	x	-	-
void SetFanMode(int fanmode) Regelt die Lüftergeschwindigkeit. Möglich sind vier Werte: 0 für off, 1 für low, 2 für medium und 3 für high.	-	-	x
int GetFanMode() Gibt den Status des Lüfters wieder (Zahl von 0 bis 3).	-	-	x
bool CanAbortShuttingDown() Gibt ein <i>true</i> zurück.	-	-	x
bool AbortStopiShuttingDown() Bricht den Stoppvorgang des Kühlers (vergleiche PerformStopCooling) ab, falls möglich.	-	-	x
bool CanAbortExposure() Gibt ein <i>true</i> zurück.	x	-	-
bool AbortExposure() Bricht die Belichtung ab, falls möglich.	x	-	-

Methoden	M	C	n
bool CanAbortImageReadout() Gibt ein <i>false</i> zurück.	x	-	-
bool AbortImageReadout() Bricht die Bildauslese ab, falls möglich.	x	-	-
double ExposureTime(double magnitude, double saturation, unsigned short binX, unsigned short binY) Berechnet die Belichtungszeit, für eine bestimmte Sternhelligkeit, Sättigung der Pixelwerte zu einem bestimmten Binningmodus. (Diese Methode greift nicht direkt auf die Kamera zu.)	x	-	-

Literaturverzeichnis

- AHARONIAN, F.A., *et al.* (H.E.S.S. COLLABORATION). 2004. High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant. *Nature*, **432**(7013), 75–77.
- APOGEE. 2010. *Webseiten des Kameraherstellers Apogee Instruments Inc.* www.ccd.com.
- AXIOMTEK. 2009. *PICO820 Series, Intel Atom All-In-One, Pico ITX CPU Board: User's Manual*.
- BARNEY, B. 2009. *POSIX Threads Programming*.
<https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/>.
- BEILICKE, M. 2004. *The H.E.S.S. site manual*. H.E.S.S. Internal Note. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- BEILICKE, M., & PETZ, A. 2002. *Results of the cable tests for the H.E.S.S. Lid- and the Sky-CCD camera*. H.E.S.S. Internal Note 02/12. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- BERNLÖHR, K., CARROL, O., CORNILS, R., ELFAHEM, S., ESPIGAT, P., *et al.* 2003. The optical system of the H.E.S.S. imaging atmospheric Cherenkov telescopes. Part I: layout and components of the system. *Astroparticle Physics*, **20**, 111–128.
- BOYLE, W. S., & SMITH, G. E. 1970. Charge Ccoupled Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal*, **49**, 587–93.
- BRAUN, I. 2007. *Improving the Pointing Precision of the H.E.S.S. Experiment*. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- BRUNS, R. 2010. *ROOT-Software*.
root.cern.ch.
- CORNILS, R. 2001. *Untersuchungen zur automatisierten Justierung der Spiegelfacetten der H.E.S.S. Cherenkov-Teleskope*. Diplomarbeit, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- CORNILS, R., GILLESSEN, S., JUNG, I., HOFMANN, W., HEINZELMANN, G., *et al.* (H.E.S.S. COLLABORATION). 2003a. Mirror alignment and performance of the optical system of the H.E.S.S. imaging atmospheric Cherenkov telescopes. *Seiten*

- 2875–2878 in: KAJITA, T., ASAOKA, Y., KAWACHI, A., MATSUBARA, Y., & SASAKI, M. (Hg.), *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference*, Bd. 5. Universal Academy Press.
- CORNILS, R., GILLESSEN, S., JUNG, I., HOFMANN, W., BEILICKE, M., *et al.* 2003b. The optical system of the H.E.S.S. imaging atmospheric Cherenkov telescopes. Part II: mirror alignment and point spread function. *Astroparticle Physics*, **20**, 129–143.
- CORNILS, RENE. 2006. *Justierung und Abbildungsfunktion der H.E.S.S. -Reflektoren sowie Untersuchung der ultraleuchtkräftigen Infrarot-Galaxie Arp 220 mit dem H.E.S.S. -Teleskopsystem*. Dissertation, Universität Hamburg.
- CRAMME, S. 2009. *Untersuchungen an CCDs mit Hinblick auf das ALPS-Experiment*. Diplomarbeit, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- CTA-KOLLABORATION. 2010. *Offizielle Webseiten von CTA*.
www.cta-observatory.org.
- DAVIES, J.M., & COTTON, E.S. 1957. Design of the quartermaster solar furnace. *Journal for Solar Energy Science and Engineering*, **1**(16), 16–22.
- FIFE, K., EL GAMAL, A., & WONG, H.-S. P. 2007. A 0.5 μ m Pixel Frame-Transfer CCD Image Sensor in 110nm CMOS. *IEEE International Electron Devices Meeting*, 1003–1006.
- FUNK, S., HERMANN, G., HINTON, J., BERGE, D., BERNLÖHR, K., *et al.* 2004. The trigger system of the H.E.S.S. telescope array. *Astroparticle Physics*, **22**, 285–296.
- GILLESSEN, S. 1999. *Überwachung der Abbildung eines Čerenkov-Teleskops und automatische Spiegeljustierung mit einer CCD-Kamera*. Diplomarbeit, Fakultät für Physik und Astronomie, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- GILLESSEN, S. 2001. *CCD-cameras for the H.E.S.S. telescopes*. H.E.S.S. Internal Note 01/02. Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.
- GILLESSEN, S. 2004. *Sub-Bogenminuten-genaue Positionen von TeV-Quellen mit H.E.S.S.* Dissertation, Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- GNU. 2010a. *GIMP – GNU Image Manipulation Program*.
www.gimp.org.
- GNU. 2010b. *Gnuplot – A Graphing Utility*.
www.gnuplot.info.
- HALL, B. 2009. *Beej's Guide to Network Programming – Using Internet Sockets*.
beej.us/guide/bgnet.

- H.E.S.S.-CCD-KAMERA-WORKSHOP. 2010. *Interner CCD-Kamera-Workshop im Januar 2010 am MPIK in Heidelberg.*
- H.E.S.S.-KOLLABORATION. 2010. *Offizielle Webseiten von H.E.S.S..*
www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS.
- HINTON, J. 2007. Gamma-ray Astronomy. *ArXiv e-prints*, **0712.3352**.
- HOFMANN, W. 1998 (Oktober). *Alignment of the HESS mirrors using images of stars.*
H.E.S.S. Internal Note 98/15. Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.
- HOLST, GERALD C. 1996. *CCD arrays, cameras, and displays.* JCD Pub.; SPIE Optical Engineering Press, Winter Park, FL: Bellingham, Wash.
- HORNS, D. 2009. *Private Kommunikation.*
- HOWELL, STEVE B. 2006. *Handbook of CCD Astronomy.* Cambridge University Press.
- JOYE, W. A., & MANDEL, E. 2003. New Features of SAOImage DS9. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII ASP Conference Series*, **295**, 489.
- KODAK. 1998. *KAF-1600 Full-Frame CCD Image Sensor – Performance Specification.*
- KODAK. 2009. *Kodak KAF-1603E/ME Image Sensor – Device Performance Specification.*
- MAGIC-KOLLABORATION. 2010. *Offizielle Webseiten von MAGIC.*
www.magic.mppmu.mpg.de.
- MILLS, D. FOR THE RANDOM FACTORY. 2010. *Webseiten der Apogee-Treiber von The Random Factory.*
www.randomfactory.com.
- NIKON, KAMERAHERSTELLER. 2010. *Offizielle Webseiten von Nikon mit den Nikkor-Objektiven.*
www.nikon.com.
- PETZ, A. 2002. *Entwicklung einer CCD-Kameraschnittstelle für das H.E.S.S-Projekt und Untersuchung der Deformation des Spiegelträgers des ersten H.E.S.S-Teleskops.* Diplomarbeit, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- PLÖTNER, JOHANNES, & WENDZEL, STEFFEN. 2008. *Linux. Das distributionsunabhängige Handbuch.* Bonn: Galileo Computing.
- PRINZ, PETER, & KIRCH-PRINZ, ULLA. 2002. *C++ lernen und professionell anwenden.* Bonn: Mitp.
- PÜHLHOFER, G., *et al.* (HEGRA COLL.). 1997. Locating TeV γ -ray sources with sub-arcminute precision: the pointing calibration of the HEGRA system of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes. *Astroparticle Physics*, **8**, 101–108.

- RIEGE, H., SCHÜTT, J., & VAN STAA, R. 2000 (November). *HESS Mirror Motor Control Manual*. II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- SPIKOFISKY, A., LECHNER, D., & G., HEINZELMANN. 2008 (September). *Überprüfung der Branchkabel und Spiegelsteuerung von H.E.S.S. I*. H.E.S.S. Internal Note. II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg.
- VAN ELDIK, C., BOLZ, O., BRAUN, I., HERMANN, G., HINTON, J., & HOFMANN, W. 2007. Localising the H.E.S.S. Galactic Centre point source. *ArXiv e-prints*, **0709.3729**.
- VAN ROSSUM, G. 2010. *Python – Programming language*. www.python.org.
- VINCENT, P., *et al.* (H.E.S.S. COLLABORATION). 2005. H.E.S.S. Phase II. *Seiten 163–166 in: ACHARYA, B.S., GUPTA, S., JAGADEESAN, P., JAIN, A., KARTHIKEYAN, S., MORRIS, S., & TONWAR, S. (Hg.), Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference*, Bd. 5. Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai.
- WELLS, D. C., GREISEN E. W., & HARTEN, R. H. 1981. FITS: A Flexible Image Transport System. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **44**, 363–370.

Tabellenverzeichnis

2.1	Dauer der Justierprozedur	20
2.2	Anzahl der CCD-Bilder während des Betriebs der H.E.S.S.-Teleskope	26
2.3	Technische und optische Spezifikationen der LidCCD	30
2.4	Auslesezeiten der Ap2Ep (LidCCD)	32
2.5	Technische und optische Spezifikationen der SkyCCD	33
3.1	Spezifikationen des MiniPCs (eBOX530-820-FL)	45
3.2	Spezifikationen der CCD-Kamera Alta U2	47
4.1	Testdaten vom Hersteller der Alta U2	72
4.2	Exemplarische Überprüfung der Testdaten der Alta U2	74
4.3	Vergleich von Spezifikationen der Ap2Ep und der Alta U2	79
A.1	Dateiaufbau der CCD-Kameraschnittstelle	93
B.1	Methoden der CCD-Kameraschnittstelle	95

Abbildungsverzeichnis

1.1	Neuentdeckte Quellen der Hochenergie-Astronomie	2
2.1	Panoramaaufnahme des H.E.S.S.-Teleskopsystems	6
2.2	H.E.S.S.-Teleskop	8
2.3	PMT-Hauptkamera	10
2.4	Justage-Prinzip und Spiegelaufhängung	13
2.5	Justiersterne	14
2.6	Veranschaulichung des Justieralgorithmus	18
2.7	Abbildung eines Sterns auf dem Kameradeckel	21
2.8	Abbildungsfunktion als Funktion des Winkelabstandes zur optischen Achse und als Funktion des Elevationswinkels	23
2.9	Abbildungsfunktion als Funktion der Zeit	24
2.10	CCD-Kameras am H.E.S.S.-Teleskop	27
2.11	Gesichtsfeld der LidCCD	28
2.12	Gehäuse und Halterung der LidCCD	29
2.13	Nikkor-Objektiv 135mm/2 (Objektiv der LidCCD)	32
2.14	Verkabelung der CCD-Kameras	35
3.1	Schema des neuartigen CCD-Kamerasystems	43
3.2	Der MiniPC: die eBOX530-830-FL mit ihren Anschlüssen	44
3.3	Die USB-Kamera: die Alta U2	46
3.4	Vergleich der Quanteneffizienzen der CCD-Chips KAF-1600 und KAF-1603ME	47
4.1	Das CCD-Kamerasystem im Labor	51
4.2	Schema der CCD-Kameraschnittstelle für H.E.S.S.	52
4.3	Orientierung der Kamera zum Kamerabild	57
4.4	Teilauslese des CCD-Chips	59
4.5	Binning des CCD-Chips	59
4.6	Verhalten des Kameraverschlusses im Millisekundenbereich	60
4.7	Lichtdurchlässigkeit des Kameraverschlusses	61
4.8	Exemplarischer Verlauf der Kameratemperaturen beim Einschalten der Kühlung	65
4.9	Exemplarischer Verlauf der Kameratemperaturen beim Ausschalten der Kühlung	67
4.10	Temperaturstabilität der Kamera	68

4.11	Veränderung der Biaswerte über einen längeren Zeitraum und Verdeutlichung zur Temperaturstabilität	69
4.12	Linearität des CCD-Chips	71
4.13	Temperaturabhängigkeit der Biaswerte	75
4.14	Dunkelstrommessung zu einer Temperatur von -25 °C	76
4.15	Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms	77
4.16	Mögliche Platzierung des CCD-Kamerasystems an einem H.E.S.S.-Teleskop	81
4.17	Ein neues Kameragehäuse für die USB-Kamera	82
4.18	Die Steuerungseinheit für die Stromversorgung	84
4.19	Die Server-Client Lösung	85
5.1	Geradenscharen zu verschieden großen Auflösungen	92

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine weiteren Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe. Mit einer universitätsinternen Veröffentlichung bin ich einverstanden.

Hamburg, den

Jan L. R. Dreyling-Eschweiler