

# Inbetriebnahme und Charakterisierung einer CCD-Kamera für das HESS-Experiment

## Bachelorarbeit aus der Physik

vorgelegt von

**Stefan Eschbach**

01.10.2012

Erlangen Centre for Astroparticle Physics  
Physikalisches Institut  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



1. Gutachter: Prof. Dr. Christopher van Eldik
2. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Katz

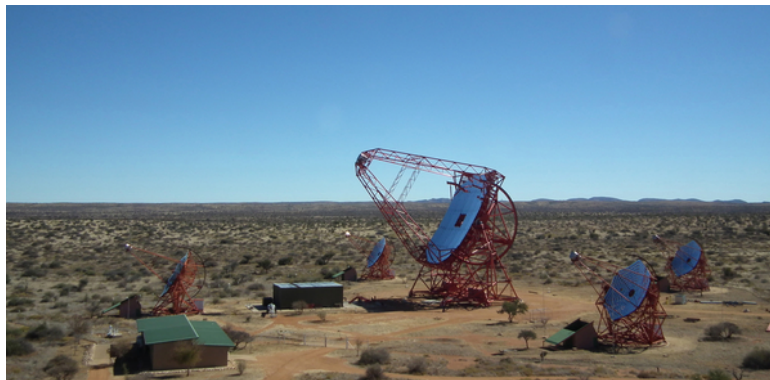
# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Inbetriebnahme der CCD-Kamera</b>	<b>6</b>
2.1	Funktionsweise einer CCD-Kamera . . . . .	6
2.2	Technische Daten der verwendeten Kamera . . . . .	7
2.3	Steuerung und Programmierbarkeit . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Charakterisierung des CCD-Chips</b>	<b>10</b>
3.1	Bias Level und Dunkelstrom . . . . .	10
3.2	Linearer Zusammenhang von Lichtmenge und Ladung . . . . .	13
3.3	Thermisches Rauschen . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der CCD-Kamera mit Objektiv</b>	<b>19</b>
4.1	Abbildungsmodell und zu bestimmende Parameter . . . . .	19
4.2	Kalibrierung mit OpenCV . . . . .	21
4.2.1	Aufnahme der Kalibrierungsbilder . . . . .	21
4.2.2	OpenCVCalibration . . . . .	22
4.2.3	Resultate . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>36</b>
	Literaturverzeichnis . . . . .	37

# Kapitel 1

## Einleitung

Das HESS Experiment (High Energy Stereoscopic System) in Namibia ist eines der größten abbildenden Cherenkov-Teleskope (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) der Welt (Abb. 1.1). Es wurde 2002 gebaut, um hochenergetische Gammastrahlung im Bereich von 100 GeV - 100 TeV zu beobachten. Diese erzeugt beim Eintritt in die Atmosphäre elektromagnetische Schauer, also Elektronen und Positronen, die sich schneller als das Licht im umgebenden Medium bewegen. Dabei entsteht Cherenkov-Strahlung, welche von den HESS Teleskopen detektiert werden kann und zur Bestimmung von Richtung und Energie der Primärphotonen verwendet wird.

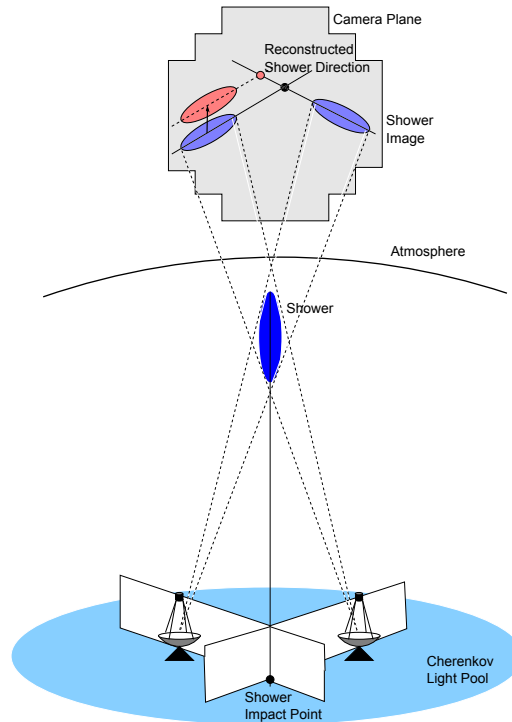


**Abbildung 1.1:** *Das HESS Experiment in Namibia, Quelle:[1].*

HESS I besteht aus vier Teleskopen, die auf einem Quadrat mit 120 m Seitenlänge angeordnet sind. Seit kurzem ist auch HESS II in Betrieb, in dem HESS I um ein fünftes, wesentlich größeres Teleskop in der Mitte der anderen Vier erweitert wurde. Jedes Teleskop ist an einer Altitude-Azimut-Halterung befestigt. Die Spiegel der kleineren Teleskope haben einen Durchmesser von 12 m und bestehen ihrerseits wieder aus je 382 kleinen, runden Spiegeln mit jeweils 60 cm Durchmesser, was insgesamt eine effektive Spiegelfläche von  $108 \text{ m}^2$  pro Teleskop ergibt. Das größere Teleskop hat eine effektive Spiegelfläche von  $614 \text{ m}^2$ . Der Spiegel eines Teleskops sammelt das schwache Cherenkovlicht und reflektiert es zur Kamera, bestehend aus 960 Photomultipliertubes (bzw. 2048 PMTs bei HESS II), die sich in 15 m (bzw. 30 m) Entfernung zum Spiegel befindet. Jeder PMT der Kamera entspricht dabei einem Pixel auf dem Bild, das vom Cherenkov-Lichtblitz aufgenommen wird [1].

Ein elektromagnetischer Schauer hat eine charakteristische Form, die sich im Bild des Cherenkov-Lichtblitzes widerspiegelt. So können hadronische Schauer, die eine deutlich zerfasere Schauerform als elektromagnetische Schauer aufweisen, von vornherein aussortiert werden. Wenn

mehrere Teleskope ein Bild desselben Gammaquants aufnehmen, ist dadurch stereoskopisches Sehen - analog zum menschlichen Sehen mit zwei Augen - möglich. Je mehr Teleskope denselben Schauer sehen, desto genauer ist die Richtungsrekonstruktion des Gammaquants, das ihn ausgelöst hat. So ist es möglich, Quellen von hochenergetischer Gammastrahlung mit einer Winkelauflösung ca.  $0.1^\circ$  relativ genau zu lokalisieren und somit Rückschlüsse auf kosmische Beschleuniger zu ziehen (siehe Abb. 1.2).

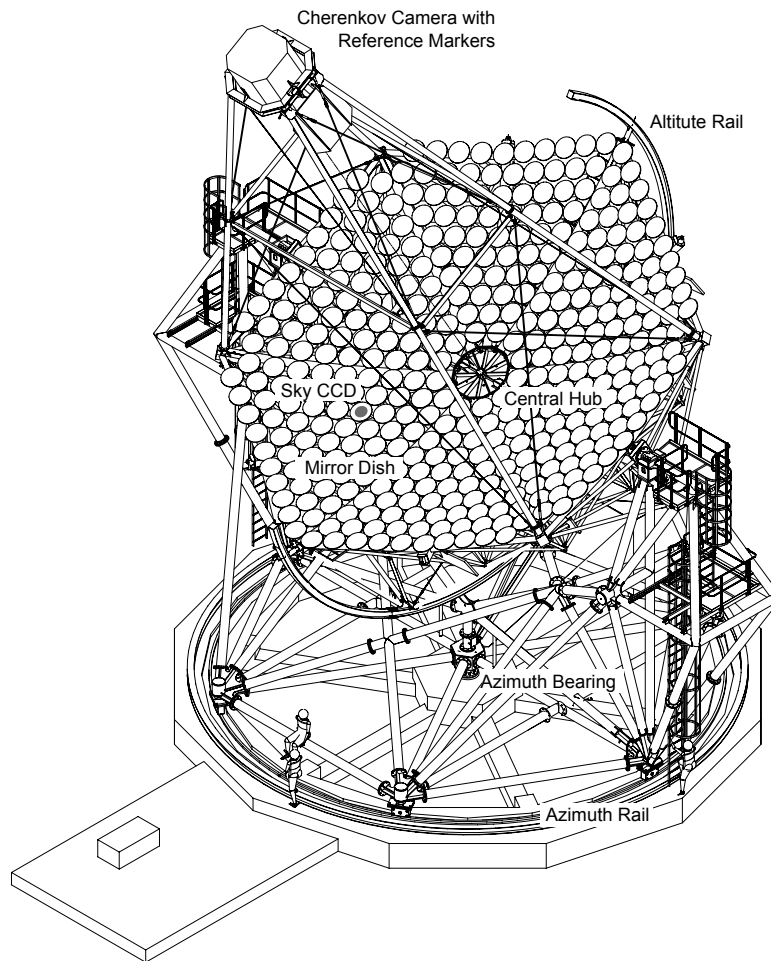


**Abbildung 1.2:** Richtungsrekonstruktion mit mehreren Teleskopen. Die Bilder der einzelnen Teleskope werden überlagert, um aus den aufgenommenen Schauern die genaue Richtung des eintreffenden Photons zu rekonstruieren. Quelle: [2].

Die HESS-Teleskope besitzen ein Gesichtsfeld von  $5^\circ$  [4]. Um die Position einer Gammastrahlen-Quelle zu bestimmen, ist es deshalb wichtig, genau zu wissen, wohin die Teleskope gerade schauen. Auf Abb. 1.3 ist eines der HESS-I Teleskope schematisch dargestellt. Um die genaue Blickrichtung zu bestimmen, befindet sich bei jedem Teleskop genau in der Mitte der Schüssel, in der die Spiegel befestigt sind, eine CCD-Kamera. Zur Richtungskalibration wird ein Fixstern mit bekannter Position anvisiert, die CCD-Kamera fotografiert sein Abbild auf dem geschlossenen Deckel der Cherenkov-Kamera, die während der Kalibration nicht verwendet wird. Um die Kamera sind in regelmäßigen Abständen insgesamt acht LEDs angebracht (Reference Markers). Mit ihrer Hilfe kann die Position des Mittelpunkts der Kamera berechnet werden. Diese wird mit der Position des Abbilds des Sterns verglichen. Befindet sich das Abbild des Sterns genau in der Mitte, zielt das Teleskop exakt auf die Position des Fixsterns. Zur Beobachtung des Himmels ist außerdem noch eine zweite Kamera im Spiegel integriert (Sky CCD). Aus den so erhaltenen Daten wird ein Modell erstellt, welches exaktes Pointing mit den HESS-Teleskopen ermöglicht [3].

Für genaues Pointing ist es von essentieller Bedeutung, dass die optischen Eigenschaften der CCD-Kameras gut verstanden sind. So können zum Beispiel Aberrationen oder andere nicht mit eingerechnete Ungenauigkeiten systematischen Einfluss auf das HESS-Pointing haben. Es ist also eine gute Kenntnis aller Parameter des optischen Systems aus CCD-Kamera und Linse





**Abbildung 1.3:** Schema eines HESS-I-Teleskops. Die zur Richtungskalibration verwendete CCD-Kamera befindet sich genau in der Mitte der sog. „Mirror Dish“, sie wird hier mit „Central Hub“ bezeichnet. Über die Sky CCD kann während der Kalibrierung der Himmel beobachtet werden. Quelle: [2].

nötig, um Abbildungsfehler rechnerisch ausgleichen zu können. Die Inbetriebnahme und Charakterisierung solch einer CCD-Kamera für das HESS-Experiment ist deshalb Thema dieser Bachelorarbeit.

# Kapitel 2

## Inbetriebnahme der CCD-Kamera

### 2.1 Funktionsweise einer CCD-Kamera

Die CCD-Kamera besteht aus einem Linsensystem, in welchem das einfallende Licht gesammelt und fokussiert wird, und dem eigentlichen CCD-Chip, der dann daraus das Foto erzeugt. CCD steht für „Charge-Coupled Device“: ein ladungsgekoppeltes Bauelement. Mit einer CCD-Kamera kann also das einfallende Licht in eine zur Lichtintensität proportionalen Anzahl an Ladung umgewandelt werden, welche anschließend ausgelesen wird. Die CCD-Technik beruht auf dem Photoeffekt.

Der CCD-Chip selbst besteht aus einem p-dotierten Halbleiter, einer darüberliegenden elektrisch isolierenden Schicht und sehr vielen Elektroden, die auf selbiger angebracht sind. An die Elektroden wird eine positive Spannung angelegt, so dass sich im Halbleiter Potentialtöpfe bilden. Fällt nun ein Photon auf den Halbleiter, kann es bei ausreichender Energie ein Elektron aufs Leitungsband heben und somit ein Elektron-Loch-Paar erzeugen (innerer photoelektrischer Effekt). Während die Majoritätsladungsträger abfließen, sammeln sich die Minoritätsladungsträger (Elektronen) im Potentialtopf. So wird unter jeder Elektrode die bei geöffneter Blende einfallende Lichtintensität in eine proportionale Menge an Ladungen im jeweiligen Potentialtopf umgewandelt. Eine Elektrode entspricht also einem Pixel auf dem entstehenden Bild. Zum Auslesen wird die an die Elektroden angelegte Spannung so variiert, dass die in den Potentialtöpfen gesammelten Ladungsträger nach dem Eimerketten-Prinzip zum Ausleseverstärker durchgereicht werden, wo eine zur Ladung proportionale Ausgangsspannung erzeugt wird. Diese wird dann in einem Analog-zu-Digital-Wandler in eine digitale Zahl umgerechnet.

Man unterscheidet zwischen front- und back-side-illuminated CCD-Kameras. Bei der gängigeren front-illuminated Version fällt das Licht durch die Elektroden und die Isolierschicht auf den Halbleiter, was voraussetzt, dass diese optisch möglichst transparent sind. Trotzdem kommt es bei dieser Version vor allem im kurzwelligen Bereich (blau) schon zu Absorptionen. Um dies zu verhindern, wird bei der back-illuminated Version der CCD-Chip mit der Rückseite nach oben eingebaut, so dass das Licht direkt auf den Halbleiter fällt. Da dieser dazu sehr dünn sein muss (im  $\mu\text{m}$  Bereich), was nur durch aufwendige Herstellungsverfahren zu erreichen ist, sind back-illuminated CCD-Kameras wesentlich teurer. Als Halbleitermaterial wird oft Silizium verwendet, als Isolator Siliziumdioxid und als Elektrodenmaterial polykristallines Silizium.

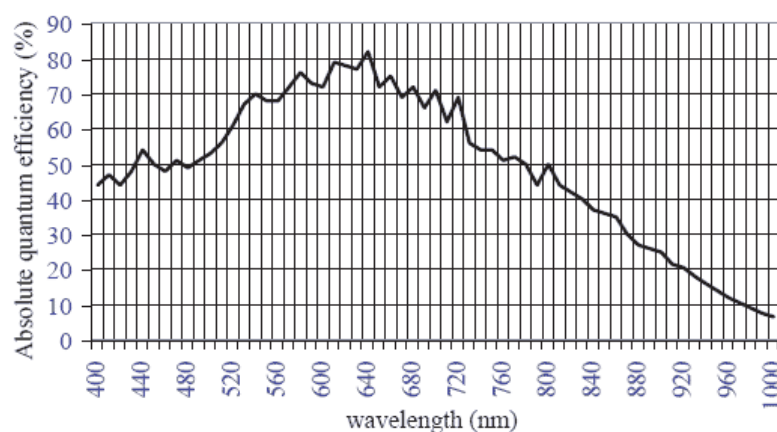
Ein Problem an CCD-Chips ist, dass bei Überbelichtung (zu vielen ankommenden Photonen) mehr freie Ladungsträger erzeugt werden, als in einen Potentialtopf passen. Überzählige Ladungsträger laufen dann in die angrenzenden Potentialtöpfe über, was zu einem Verschwimmen des entstehenden Bildes führt. Dieser Effekt, der mit „Blooming“ bezeichnet wird, lässt sich

durch sog. „Anti-Blooming-Gates“ verhindern, durch die die überschüssigen Ladungsträger abgeleitet werden können. Da durch diese Gates allerdings teilweise auch schon vor dem Überlaufen Ladung verloren geht, wurde bei der hier verwendeten Kamera auf Anti-Blooming-Gates verzichtet, um die Proportionalität zwischen Photonen- und Ladungsträgeranzahl zu erhalten und somit genauere Messungen durchführen zu können. Überbelichtung kann einfach durch Verkleinern der Blende (=Vergrößern der Blendenzahl) oder Verkürzen der Belichtungszeit verhindert werden. Ein weiterer Störfaktor ist der temperaturabhängige Dunkelstrom. Je höher die Temperatur im Halbleiter ist, desto wahrscheinlicher ist die spontane Bildung von Ladungsträgern (ohne Photoneinfall). Gleichzeitig erhöht sich das thermische Rauschen des Ausleseverstärkers. Außerdem treten mit erhöhter Temperatur gehäuft sogenannte Hotpixel auf, einzelne Pixel, die nicht proportional auf das eintreffende Licht reagieren, wodurch sie heller erscheinen als die Umgebung. Um diese temperaturabhängigen Effekte einzudämmen, verfügen gute CCD-Kameras über ein Kühlsystem, mit dem sie auf niedrigen Arbeitstemperaturen gehalten werden können[5][6].

## 2.2 Technische Daten der verwendeten Kamera

Bei der für den Testaufbau dieser Arbeit verwendeten CCD-Kamera handelt es sich um eine Alta F1 von Apogee (Imaging Systems). Der CCD-Chip ist front-illuminated eingebaut. Er besteht aus  $768 \cdot 512 = 393\,216$  Pixeln, jeder  $9\,\mu\text{m} \cdot 9\,\mu\text{m}$  groß, womit sich eine Fläche von  $6.912\,\text{mm} \cdot 4.608\,\text{mm} = 31.9\,\text{mm}^2$  ergibt. Die Lichtintensität, der ein Pixel während der Belichtung ausgesetzt war, wird in einem Bild mit 16 Bits kodiert, was  $2^{16} = 65536$  verschiedene Helligkeitswerte ermöglicht[7]. Der Bildwinkel im Limit eines unendlich weit entfernten Objektes berechnet sich zu  $\omega = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d}{2f}\right)$ , wobei  $d$  die Kantenlänge des CCD-Chips bezeichnet und  $f$  die Brennweite der Kameralinse. Durch ein vorne aufgeschraubtes Nikon-Objektiv hat die verwendete Kamera eine Brennweite von 135 mm, damit ergibt sich ein Bildwinkel von  $2.9^\circ$  bzw.  $2.0^\circ$ .

Die Quantenausbeute, also die Wahrscheinlichkeit, mit der ein einfallendes Photon ein Elektron auslöst, ist wellenlängenabhängig und für die verwendete Kamera in Abb. 2.1 aufgetragen.



**Abbildung 2.1:** Quantenausbeute in Abhängigkeit der Wellenlänge, Quelle: [7].

Die genauen Daten der in dieser Bachelorarbeit verwendeten Kamera finden sich im Camera Data Sheet des Herstellers in Abb. 2.2.

Der Gain gibt an, wieviele Elektronen im Schnitt pro Count durch den Ausleseverstärker gezählt werden (1.7). Dort findet man ebenso die Standardabweichung (6.46 Counts) und das mittlere Rauschen (10.8 Elektronen). Die Maximum Digitized Well Capacity gibt an, wie viele

**Apogee**  
INSTRUMENTS INC

1020 Sundown Way #150  
Roseville CA 95661 USA  
Tel 916-218-7450  
Fax 916-218-7451  
www.ccd.com

## Camera Test Report

<b>Camera Serial Number</b>	A80532	<b>Test Date</b>	6/13/2008
<b>Part Number</b>	D01F-VS25D-E00402-MM1A	<b>Tested by</b>	L. Nguyen
<b>Camera Series</b>	Alta	<b>Interface</b>	E
<b>Sensor</b>	Kodak KAF-0402ME	<b>Model</b>	1
<b>Sensor Serial Number</b>	4H0230 15224	<b>CCD Type</b>	Front-illuminated
<b>Sensor Size</b>	768 x 512	<b>Bits</b>	16
		<b>Cooling</b>	2 Stage

## TEST DATA

<b>Gain</b>	1.7 (electrons per count)
<b>Standard Deviation</b>	6.46 (counts)
<b>RMS Noise</b>	10.8 (electrons)
<b>Maximum Digitized Well Capacity</b>	105K (electrons)
<b>Bias level</b>	2440 (counts)
<b>120 Second Dark</b>	2442 (counts; includes bias level)
<b>Dark Current</b>	0.03 (electrons per pixel per second)
<b>Test Temperature</b>	-26 ( °C ); <b>Delta</b> 50 ( °C )

<b>Firmware Version</b>	27	<b>Configuration</b>	D01	<b>ConfigRev</b>	
<b>MAC Address</b>	0009510000EB	<b>Drawing Rev</b>	PR3		
<b>DLL Version</b>	3.1.8	<b>Back Focal Distance (Physical)</b>		(inches)	
<b>Shutter Type</b>	V25	<b>Back Focal Distance (Optical)</b>		(inches)	
<b>Finish: Back</b>	Nickel-plated	<b>Window</b>	D		
<b>Finish: Front</b>	Blue Anodized	<b>Window Material</b>	Fused Silica w MF2		

Notes

Abbildung 2.2: Camera Data Sheet

Elektronen pro Pixel gespeichert werden können (105 000). Der Bias Level wird durch die Elektronik absichtlich verursacht, damit der Analog-zu-Digital-Wandler nie negative Eingangswerte bekommt; er beträgt laut Data Sheet 2440 Counts. Diese werden also immer gezählt, auch wenn kein Photon auf den Chip gelangt.

Der Dunkelstrom ist, wie bereits erwähnt, temperaturabhängig. Es wurde im Zuge des Herstellertests bei einer Betriebstemperatur von  $-26^{\circ}\text{C}$  eine 120 Sekunden Dunkelstrommessung (mit geschlossenem Shutter) durchgeführt; während dieser Zeit ergaben sich im Mittel 2442 Counts pro Pixel. Zieht man den Bias Level ab und multipliziert dann mit dem Gain, ergibt sich im Mittel ein Dunkelstrom von etwa 0.3 Elektronen pro Pixel und Sekunde.

Die Alta F1 verfügt über einen zweistufigen thermoelektrischen Kühler mit Luftgebläse, mit dem man auf bis zu  $50^{\circ}\text{C}$  unter Raumtemperatur kühlen kann, mit einer Stabilität von  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Die Kühlung ist völlig frei programmierbar, so dass auf jede beliebige Temperatur im möglichen Bereich gekühlt werden kann.

Weiter Informationen über das Modell Alta F1 finden sich auf der Internetseite von Apogee unter dem Link in [7].

## 2.3 Steuerung und Programmierbarkeit

Die Kamera lässt sich per Ethernet mit einem Computer mit dem Betriebssystem Linux verbinden, von wo sie bedient werden kann. Computer und Kamera wurden in einem Labor aufgebaut, das vollständig verdunkelt bzw. rein elektrisch beleuchtet werden konnte, um während der Messungen keinen Tageslichtfluktuationen ausgesetzt zu sein. Die Kamera wurde auf einem Tisch ausgerichtet und auf die gegenüberliegende, etwa 7 m entfernte Wand fokussiert.

Zur Steuerung gibt es bereits vordefinierte Programme der HESS-Collaboration. Damit kann man unter anderem Kühltemperatur sowie die Drehzahl des zur Kühlung benutzten Gebläses einstellen und die Kühlung an- bzw. ausschalten. Außerdem kann man ein Bild aufnehmen, das auf der Kamera zwischengespeichert wird. Dabei ist die Belichtungszeit, also die Dauer, die der Shutter geöffnet wird, völlig frei zwischen 10 ms und 183 min wählbar, auch Bilder mit geschlossenem Shutter sind möglich. Die Bilddaten können mit einem weiteren Befehl von der Kamera auf den Computer gezogen werden, um sie dort weiterzubearbeiten. Desweiteren sind mit diesen Programmen Abfragen diverser Kameraparameter möglich wie z.B. der eingestellten Solltemperatur, der aktuellen Temperatur am CCD-Chip bzw. im Heatsink, der Name des Kameramodells, ob aktuell Bilddaten auf der Kamera gespeichert sind, die Anzahl an Pixeln bzw. das maximale Binning in x- sowie y-Richtung des Chips und viele mehr. Die Befehle zur Steuerung können problemlos in selbstgeschriebene Programme eingebaut werden, um die Kamera leicht bedienen zu können.

Mithilfe der Befehle zur Steuerung der Kamera wurden Routinen erstellt, die Bilder nach dem Aufnehmen automatisch in einer Datei auf dem Computer speichern oder selbstständig mehrere Bilder bei verschiedenen Temperaturen aufnehmen. Einige Bilder wurden aufgenommen, um ein Gespür für ein Verhältnis zwischen gewählter Blende und Belichtungszeit zu finden, das guten Kontrast ohne Überbelichtung garantiert. Anschließend wurde versucht, den CCD-Chip näher zu charakterisieren.

# Kapitel 3

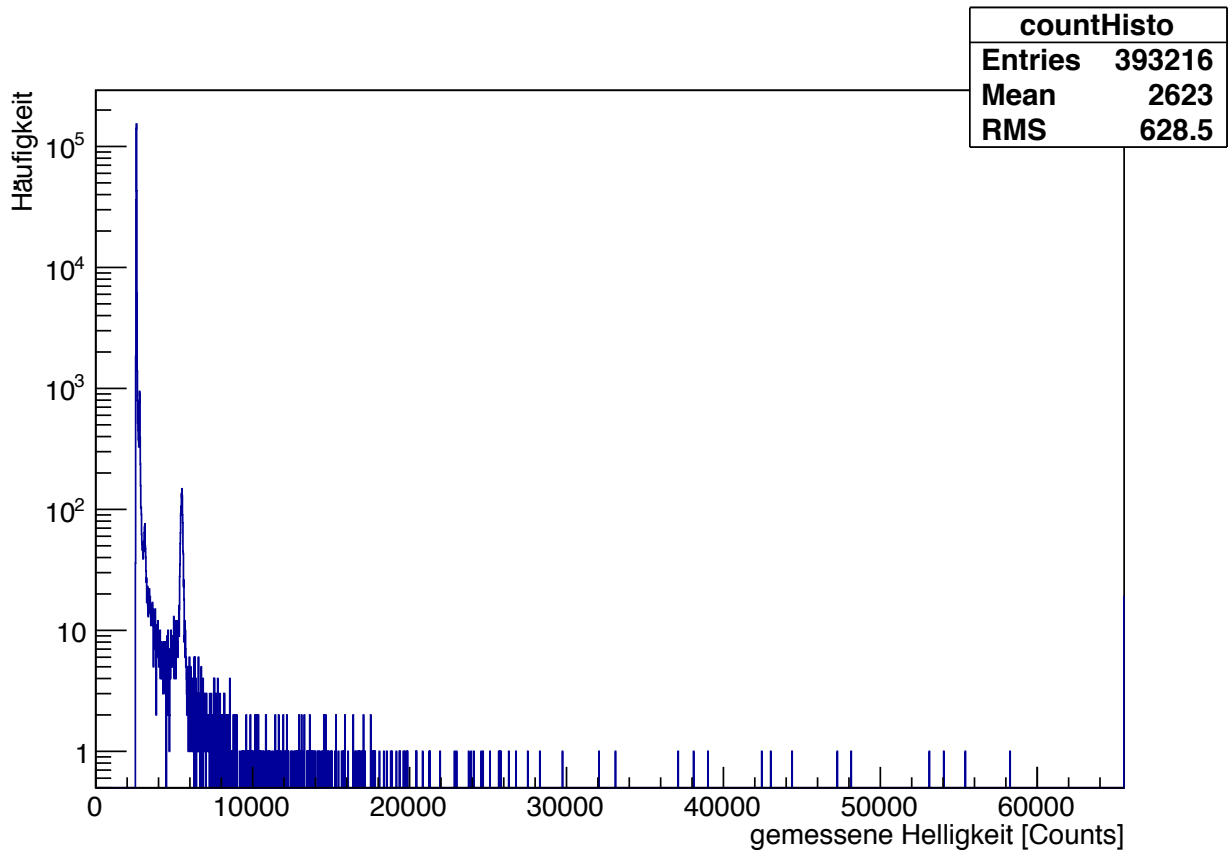
## Charakterisierung des CCD-Chips

### 3.1 Bias Level und Dunkelstrom

Als Erstes sollten die obigen Angaben zu Biaslevel und Dunkelstrom überprüft werden. Dazu wurden bei verschiedenen Temperaturen je zwei Darkframes aufgenommen, mit einer Belichtungszeit von 0s sowie 120s. Das Wort Darkframe bedeutet, dass der Shutter während der gesamten Aufnahme geschlossen bleibt, also kein Licht auf den CCD-Chip fällt. Die Bezeichnung „Belichtungszeit“ ist in diesem Zusammenhang etwas irreführend, da der Chip überhaupt nicht belichtet wird; gemeint ist die Zeit vom Start der Messung (mit leeren Potentialtöpfen) bis zum Auslesen der Potentialtöpfe. Wie bereits oben beschrieben, erhält in einem mit der CCD-Kamera aufgenommenen Bild jedes Pixel einen Helligkeitswert zwischen 0 und 65536, je nachdem, wie viel Ladung für dieses Pixel ausgelesen wurde. Er wurde mit Hilfe des am CERN entwickelten Statistikprogramms „ROOT“ [8] in einem Histogramm eingetragen, so dass man zu jedem Helligkeitswert ablesen kann, auf wie vielen Pixeln im Bild er vorkommt (Häufigkeit). Ein solches Histogramm ist in Abb. 3.1 zu sehen. ROOT berechnet selbständig den Mittelwert (Mean) sowie die mittlere quadratische Abweichung der Einträge von diesem (RMS). Die Zahl der Einträge entspricht der Anzahl an Pixeln auf einem Bild.

Anschließend wurde aus den so erhaltenen Histogrammen zu beiden Belichtungszeiten je ein Graph erstellt, in dem die Mittelwerte (Mean) der Histogramme gegen die jeweiligen Temperaturen aufgetragen sind. Jedes Histogramm liefert also einen Punkt auf einem Graphen, das Ergebnis ist in Abb. 3.2 bzw. Abb. 3.3 zu sehen.

Der Helligkeitswert bei einer Belichtungszeit von 0s ist der elektronische Bias Level der Kamera. Wie sich in den Messungen herausstellte, ist er temperaturabhängig und weicht stark vom von Apogee angegebenen Bias Level ab. Eigentlich erwartet man, dass er mit steigender Temperatur ebenfalls steigt, da bei höherer Temperatur mehr elektronisches Rauschen vorhanden ist und dieses für eine Erhöhung sorgen müsste. Es ist aber genau das Gegenteil der Fall: Der Bias Level nimmt mit sinkender Temperatur zu. Dies könnte evtl. daran liegen, dass die Ausleseelektronik, in der der Bias Level erzeugt wird, nicht ausreichend gekühlt ist und die Kühlung sich nur auf den CCD-Chip selbst beschränkt. Die Bilder wurden von hoher zu niedriger Temperatur aufgenommen; die Bilder bei  $-20^{\circ}\text{C}$  wurden also als letztes aufgenommen. Sollte obige Annahme wahr sein, könnte sich die schlecht gekühlte Elektronik im Laufe der Zeit erhitzt haben und so für eine Erhöhung des Bias Levels gesorgt haben. Um dies auszuschließen, wurde die gleiche Messung erneut durchgeführt, wobei diesmal mit den beiden Bildern bei  $-20^{\circ}\text{C}$  begonnen wurde und die Temperatur sukzessive erhöht wurde. Trotzdem zeigte sich wieder ein sinkender Bias Level bei steigender Temperatur, diesmal sogar ohne die Abweichung bei  $30^{\circ}\text{C}$ . Dahinter steckt eine bisher unverstandene Systematik.



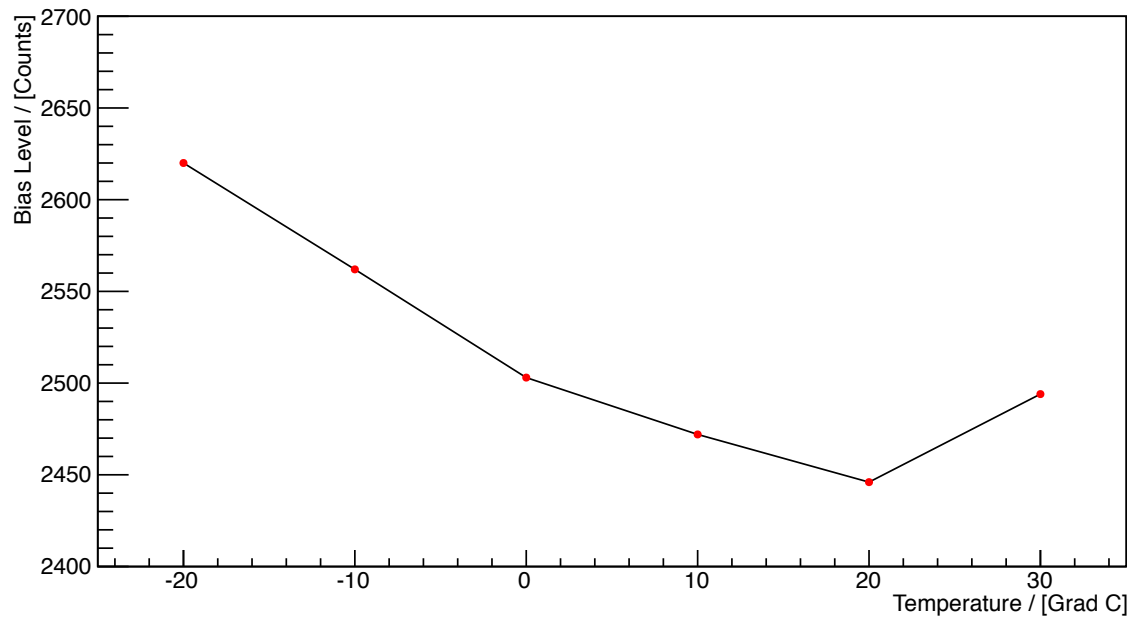
**Abbildung 3.1:** Histogramm (Häufigkeitsverteilung) der gemessenen Helligkeiten (Counts) in einem Darkframe bei 120 s Belichtungszeit und Temperatur 20° C. Für die Häufigkeiten wurde eine logarithmische Achse gewählt, damit auch die vielen Counts zu sehen sind, die nur einmal vorkommen. Das Maximum liegt bei 2600 Counts und ist mit ca.  $10^5$  Einträgen sehr viel häufiger als alle anderen Werte, weshalb der Mittelwert (Mean) bei 2623 Counts auch sehr nahe am Maximum liegt. Der kleinere Peak bei 5204 Counts ist nicht zu erklären. Wahrscheinlich wurde er durch defekte Pixel verursacht, dies wurde nicht näher untersucht.

Die gemessene Helligkeit im Graph in Abb. 3.3 setzt sich aus Bias Level und Dunkelstrom zusammen. Der Graph folgt dem Verlauf des Bias Levels für niedrige Temperaturen, da der Dunkelstrom hier noch vergleichsweise gering ist, ab 20°C steigt er aber wesentlich steiler als der Bias Level. Der Grund ist in Abb. 3.4 zu erkennen. Hier wurden die Werte der Bias Level aus Abb. 3.2 von den in Abb. 3.3 gemessenen Werten abgezogen, somit bleibt nur der Dunkelstrom (in Counts) übrig. Dieser steigt wie erwartet exponentiell mit der Temperatur an, er wurde mit einer Exponentialfunktion der Form

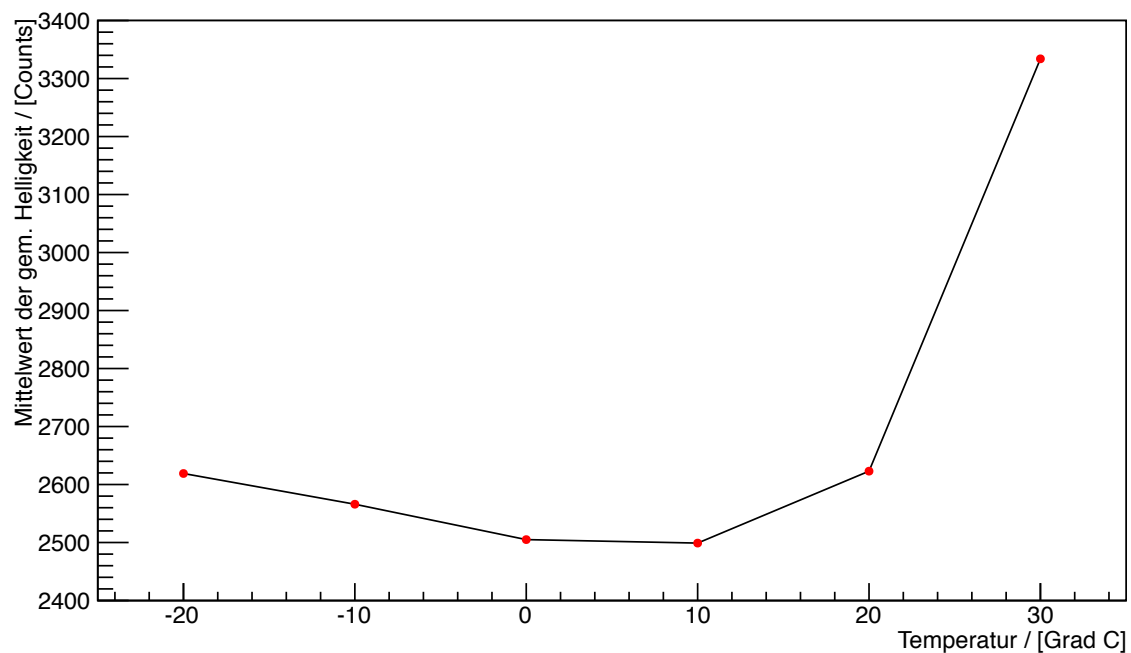
$$I_{Dunkel} = \exp\left(\frac{T - T_0}{a}\right) + I_0$$

gefitet. Die erhaltenen Werte lauten  $T_0 = -13.14 (\pm 1.02) ^\circ\text{C}$ ,  $I_0 = -3.02 (\pm 3.33)$  Counts und  $a = 6.40 (\pm 0.15) \frac{1^\circ\text{C}}{\ln(\text{Counts})}$ . Multipliziert man die Dunkelstrom-Counts noch mit dem Gain von  $1.7 \frac{\text{Elektronen}}{\text{Counts}}$  und dividiert anschließend durch die Duration von 120 s, erhält man den Dunkelstrom in Elektronen pro Sekunde.

$$I_{Dunkel}\left[\frac{\text{Elektronen}}{\text{s}}\right] = I_{Dunkel}[\text{Counts}] \cdot \frac{1.7 \frac{\text{Elektronen}}{\text{Counts}}}{120 \text{ s}}$$



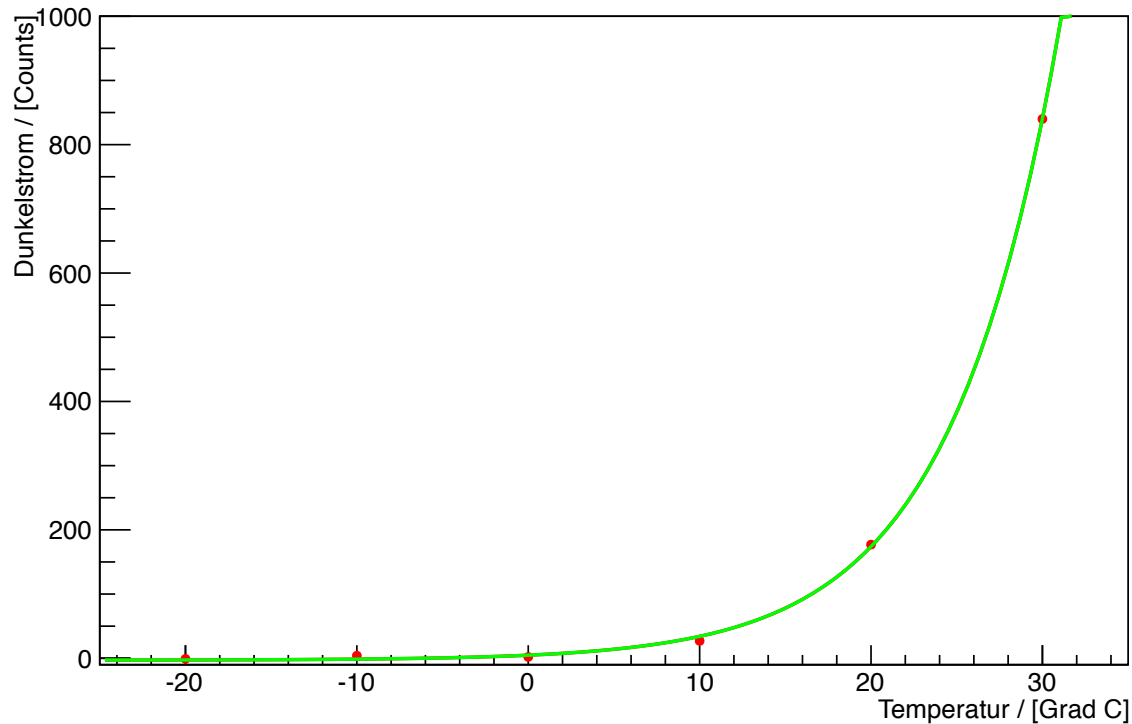
**Abbildung 3.2:** *Bias Level (Helligkeitswert bei 0 s Belichtungszeit) gegen Temperatur.*



**Abbildung 3.3:** *Gemessener Helligkeitswert bei geschlossenem Shutter gegen Temperatur bei 120 s Belichtungszeit.*

Die so erhaltenen Werte sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.





**Abbildung 3.4:** Dunkelstrom (also Helligkeitswert aus Abb. 3.3 minus Bias Level aus Abb. 3.2) bei 120 s Belichtungszeit, aufgetragen gegen die Temperatur. Die grüne Kurve ist ein exponentieller Fit an die Messwerte.

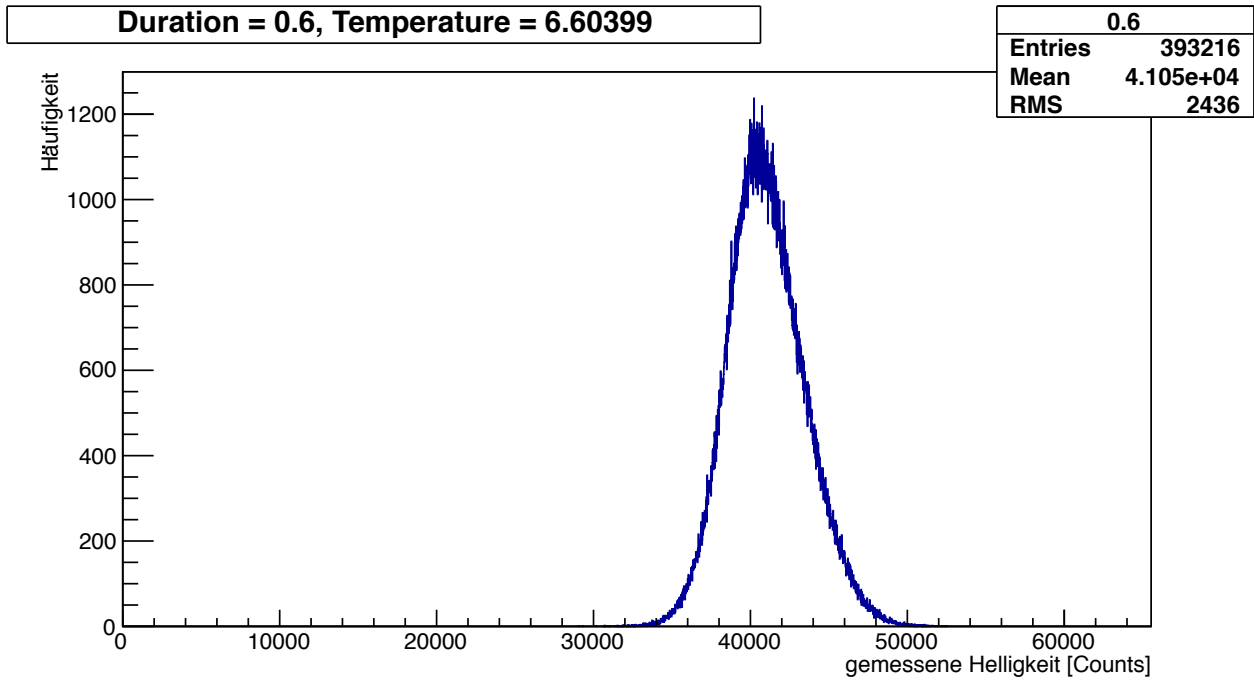
Temperatur in °C	Dunkelstrom in $\frac{\text{Elektronen}}{\text{s}}$
-20	-0.01
-10	0.06
0	0.03
10	0.38
20	2.51
30	11.9

Bei niedrigen Temperaturen ist der Dunkelstrom noch in der Größenordnung des Ausleserauschens. Aus diesem Grund ist bei  $-20^{\circ}\text{C}$  ein negativer Wert möglich, hier wurde in der 120 s Aufnahme ein Count weniger gezählt als in der 0 s Aufnahme, was nur durch Rauschen zu erklären ist. Darauf ist auch zurückzuführen, dass der Dunkelstrom bei  $0^{\circ}\text{C}$  kleiner ist als der bei  $-10^{\circ}\text{C}$ . Der bei diesen Temperaturen gemessene Dunkelstrom liegt in der gleichen Größenordnung wie der von Apogee angegebene Dunkelstrom von  $0.03 \frac{\text{Elektronen}}{\text{s}}$  bei  $-26^{\circ}\text{C}$ . Bei hohen Temperaturen ab  $20^{\circ}\text{C}$  liegt er schließlich in der Größenordnung von mehreren Elektronen pro Sekunde.

## 3.2 Linearer Zusammenhang von Lichtmenge und Ladung

Als Nächstes wurde untersucht, ob die Lichtmenge und die daraus resultierende Ladung in einem linearen Zusammenhang stehen. Wenn der Verstärker linear arbeitet, sollte dies der Fall sein. Der einfachste Parameter zur Steuerung der einfallenden Lichtmenge ist die Belichtungszeit (Duration). Ist der Shutter doppelt so lange offen, können in dieser Zeit bei gleicher Eingangsintensität auch doppelt so viele Photonen ins Innere der Kamera und damit auf den

CCD-Chip gelangen. Mit Hilfe der schon vordefinierten Befehle zur Steuerung der Kamera wurde ein Programm geschrieben, das bei einer fest eingestellten Temperatur eine Reihe von Bildern aufnimmt und dabei sukzessive die Belichtungszeit erhöht. Begonnen wird mit einer Belichtungszeit von 0.02 s, dann steigert sie sich in Schritten von 0.02 s, bis die Serie dann schließlich bei 4 s Belichtungszeit beendet wird. Alle Bilder wurden mit Blende 11 aufgenommen. Die Helligkeitswerte der einzelnen Pixel in jedem Bild wurden wieder mit ROOT für jede Belichtungszeit in einem separaten Histogramm aufgetragen. Da die Pixel nun auch wirklich belichtet wurden, unterscheiden sich die Histogramme von dem im vorigen Abschnitt gezeigten, die Helligkeitswerte sind nun Gaußförmig verteilt. Ein Beispiel ist in Abb. 3.5 zu sehen.



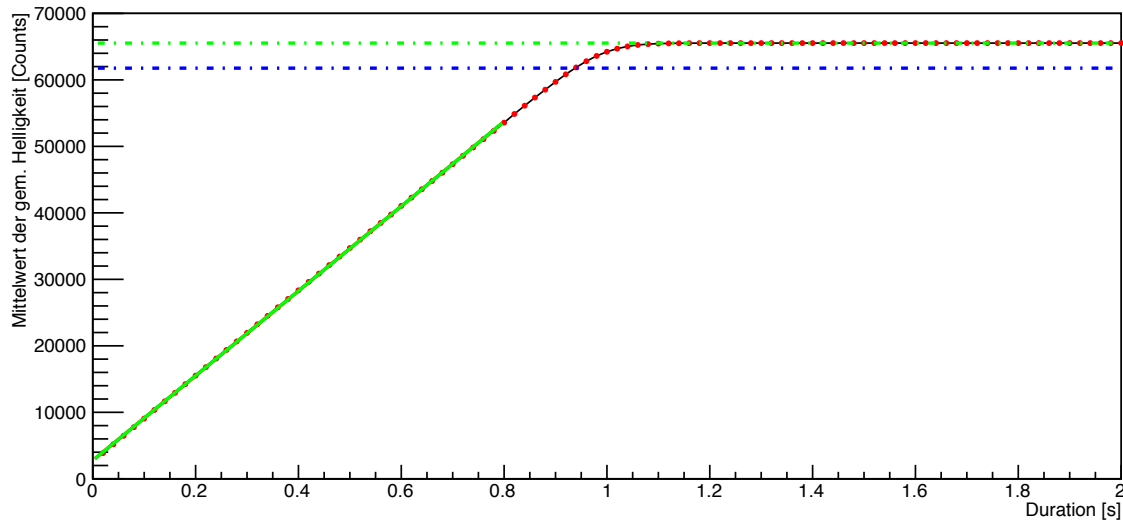
**Abbildung 3.5:** Histogramm (Häufigkeitsverteilung) der gemessenen Helligkeiten (Counts) der einzelnen Pixel bei 0.6 s Belichtungszeit und Temperatur 6.6°C, aufgenommen mit Blende 11.

Auf diese Weise wurde für jedes Bild der Serie und somit für jede Duration ein Histogramm erstellt. Anschließend wurde aus den so erhaltenen Histogrammen wieder ein Graph erzeugt, in dem der Mittelwert (Mean) des Histogramms gegen die jeweilige Duration aufgetragen ist. Jedes Histogramm liefert also einen Punkt auf dem Graphen, das Ergebnis ist in Abb. 3.6 zu sehen.

Die Punkte wurden im vorderen Bereich bis zu einer Belichtungszeit von  $t=0.8$  s durch eine lineare Funktion der Form

$$\text{Counts} = m \cdot t + C_0$$

gefittet. Der Fit ergab  $m = 63725.5(\pm 55.2) \frac{\text{Counts}}{\text{Sekunde}}$  und  $C_0 = 2759.4(\pm 26.0) \text{ Counts}$ . Der Schnittpunkt mit der Count-Achse  $C_0$  gibt an, wie viele Counts im Mittel bei einer Belichtungszeit von 0 s gezählt werden, also wenn kein einziges Photon ankommt. Er ist höher als der zwei Abschnitte zuvor gemessene Bias Level von 2472 Counts für diese Temperatur, was auf den ersten Blick nicht zu erklären ist. Die Steigung  $m$  gibt an, um wie viele Counts sich der Mittelwert erhöht, wenn man die Belichtungszeit um eine Sekunde verlängert. Sobald man in den Bereich der Überbelichtung kommt, geht der lineare Zusammenhang verloren. In einem Potentialtopf können maximal 105 000 Elektronen gespeichert werden, bei 1.7 Elektronen pro Count ergeben sich umgerechnet 61764.7 Counts. Dies ist die maximal mögliche Anzahl



**Abbildung 3.6:** Mittelwert der Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit der Belichtungszeit bei 10° C. Die roten Punkte sind die Messwerte, die durchgezogene grüne Linie ist der Fit im linearen Bereich, die gestrichelte grüne Linie markiert die Digitalisierungsgrenze bei 65536 Counts. Die gestrichelte blaue Linie markiert die maximale Anzahl an Elektronen pro Potentialtopf bei 61764.7 Counts. Die Fehler auf die Punkte sind in der Größenordnung von  $\pm 1$  Count und damit kleiner als die Punktsymbole, sie wurden deshalb nicht mit eingezeichnet.

an Counts, die durch das CCD Verfahren ohne Fehler gezählt werden können. Da bei starker Überbelichtung aber noch viel mehr Ladungen frei werden, die ebenfalls in die Ausleseelektronik gelangen, steigen die gemessenen Counts noch weiter bis zur Digitalisierungsgrenze von 65536 Counts. Ab diesem Wert bleibt die gemessene Helligkeit einfach deshalb konstant, weil sie den höchstmöglichen digitalen Wert darstellt, der gezählt werden kann.

Der lineare Bereich wurde noch näher untersucht, indem die gleiche Prozedur noch bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurde. Da nur der vordere Bereich interessierte, wurde die Duration nur bis 0.8 s erhöht. In Schritten von 5° C wurde je ein Graph mit den Mittelwerten der Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit der Belichtungszeiten erstellt. In jedem der so gewonnenen Graphen konnte der lineare Zusammenhang zwischen Lichtmenge und Ladung bestätigt werden. Die Graphen wurden alle durch eine Gerade gefittet, die Fitparameter wurden gegen die Temperatur aufgetragen. Sie sind in Abb. 3.8 und Abb. 3.7 zu sehen. Bei der Steigung  $m$  zeigt sich eine leichte Tendenz in dem Sinne, dass sie bei steigender Temperatur abnehmen. Der letzte Wert bei 27° weicht allerdings von diesem Trend ab, hier nimmt die Steigung wieder zu. Der Mittelwert aller Messwerte für  $m$  beträgt  $63328.2 \frac{\text{Counts}}{\text{Sekunde}}$  mit einer größten Abweichung von  $740 \frac{\text{Counts}}{\text{Sekunde}}$  (bei 0°). Der durch den Fit erhaltene Gesamtbias  $C_0$  bleibt dagegen bei niedrigeren Temperaturen nahezu konstant bei 2785 Counts, mit Abweichungen von höchstens 46 Counts (bei 25°). Das sind ca. 200 Counts mehr als beim in der vorherigen Aufgabe gemessenen Bias Level. Dieser doch relativ große Unterschied von gemessenem und durch Fit ermittelten Bias Level ist nicht zu erklären. Der Wert bei 27° weicht auch hier mit einem Bias von 3051 Counts wieder stärker von den anderen ab, bezieht man ihn mit ein, ergibt sich ein Mittelwert für  $C_0$  von 2823.2 Counts. Bei Temperaturen über 25° scheint das elektronische Rauschen über den Bias Level zu dominieren, was auch in den Ergebnissen aus dem vorherigen Abschnitt erkennbar war.

Die gemessene Intensität lässt sich also nur durch einen Darkframe unmittelbar vor bzw. nach der Belichtung zuverlässig bestimmen.

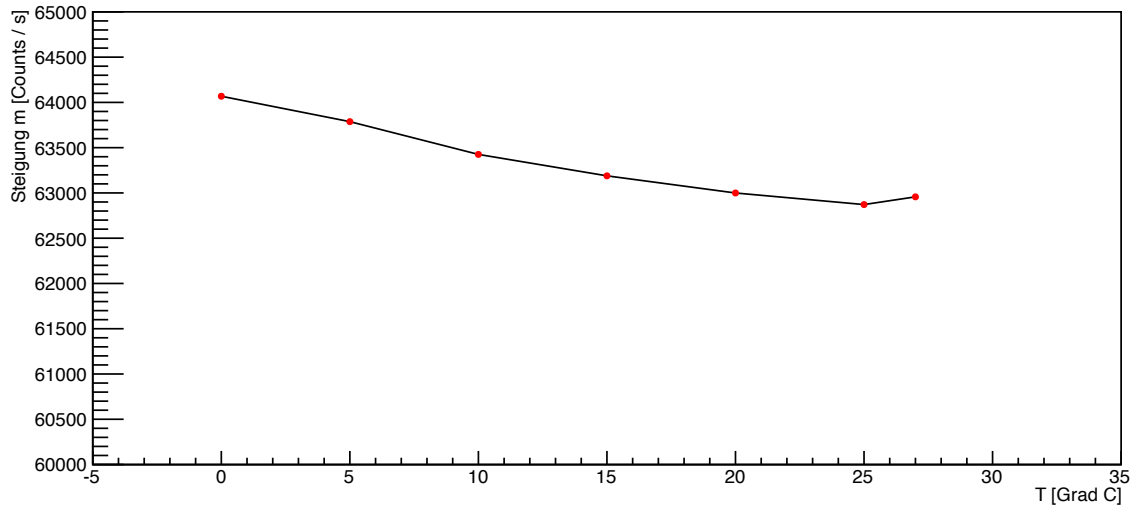


Abbildung 3.7: Steigung  $m$  in Abhängigkeit der Temperatur.

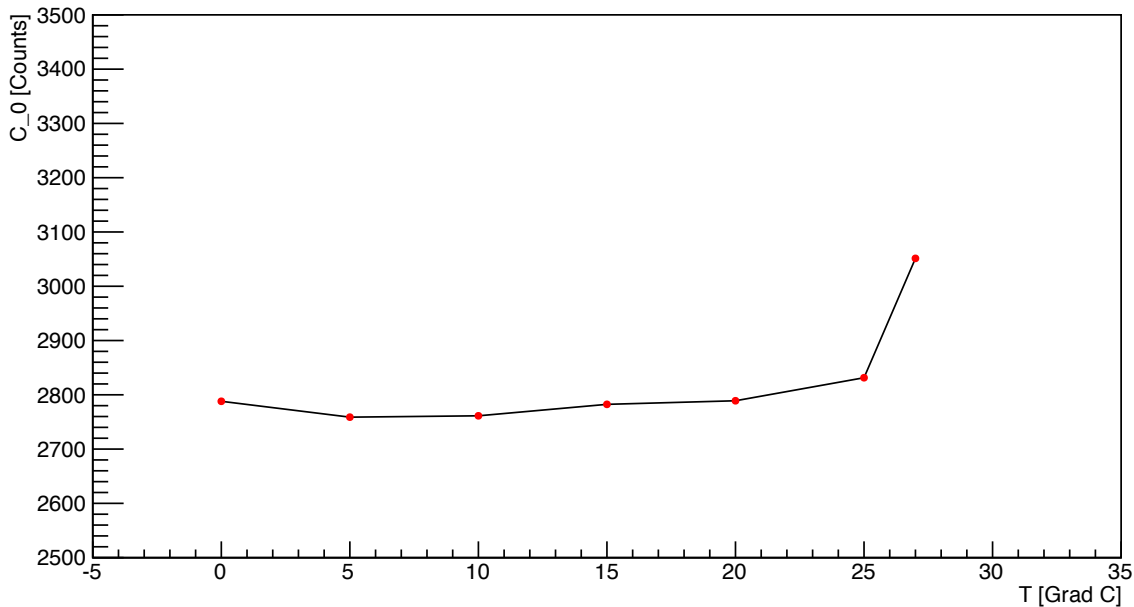
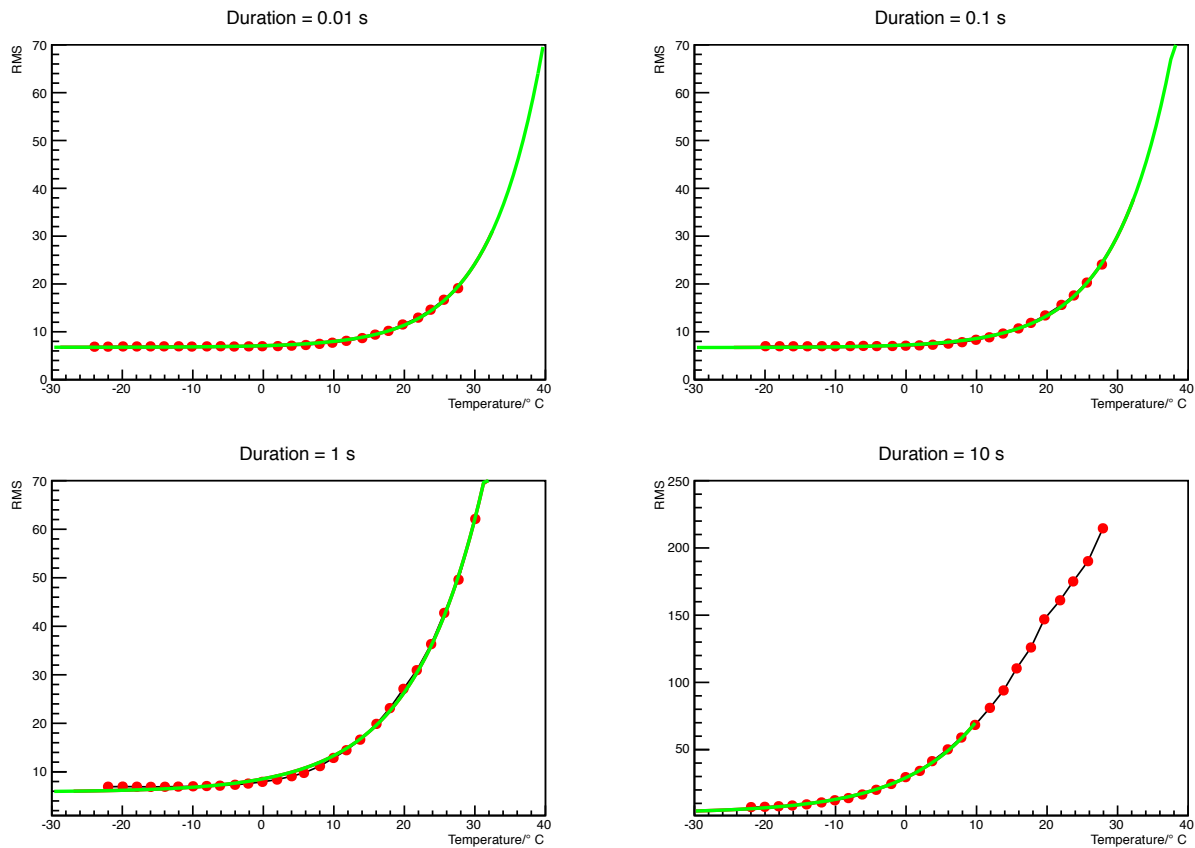


Abbildung 3.8: Bias Level  $C_0$  in Abhängigkeit der Temperatur. Er bleibt konstant bei ca. 2760 Counts.

### 3.3 Thermisches Rauschen

Als Letztes wurde die Abhängigkeit des Rauschens von der Temperatur untersucht. Dazu wurde mit Hilfe der schon vordefinierten Befehle zur Steuerung der Kamera ein Programm geschrieben, das die Temperatur mit Hilfe des Kühlers kontinuierlich in 2°C Schritten herunterfährt und bei jeder Temperaturstufe einen Darkframe aufnimmt. Die Helligkeitswerte der einzelnen Pixel in diesem Darkframe wurden wieder mit ROOT für jede Temperatur in einem separaten Histogramm aufgetragen. Die entstehenden Histogramme gleichen dem in Abb. 3.1 gezeigten. Der Mittelwert liegt wie zu erwarten nahe am Bias Level der Kamera. Der RMS-Wert ist ein Maß für die Stärke des Rauschens, da bei stärkerem Rauschen auch die Varianz der Verteilung zunimmt. Nun wurde aus den aufgenommenen Histogrammen ein Graph erstellt, in dem

der jeweilige RMS-Wert gegen die Temperatur aufgetragen ist. Das Ganze wurde bei unterschiedlichen, jeweils konstanten Belichtungszeiten (Durations) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 3.9 zu sehen.



**Abbildung 3.9:** *RMS der Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit der Temperatur bei verschiedenen Belichtungszeiten. Zu beachten ist, dass die RMS-Achse beim letzten Plot (10 s) anders skaliert ist als die übrigen drei. Bei niedrigen Temperaturen ist das konstante Ausleserauschen, bei höheren das temperaturabhängige Dunkelstromrauschen dominant. Je größer die Belichtungszeit gewählt wird, desto schneller steigt der RMS mit zunehmender Temperatur an.*

Wie zu erwarten nimmt das Rauschen bei steigender Temperatur zu bzw. bei sinkender Temperatur ab. Die Punkte wurden mit einer Exponentialfunktion der Form

$$RMS = \exp\left(\frac{T - c}{a}\right) + b$$

gefittet. Die Werte für  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Duration	$a$ in $\frac{^{\circ}\text{C}}{\ln(\text{Counts})}$	$b$ in Counts	$c$ in $^{\circ}\text{C}$
0.01 s	$7.54 \pm 0.17$	$6.76 \pm 0.05$	$8.44 \pm 0.42$
0.1 s	$7.97 \pm 0.16$	$6.70 \pm 0.071$	$4.90 \pm 0.45$
1 s	$9.93 \pm 0.18$	$5.83 \pm 0.21$	$-10.02 \pm 0.69$
10 s	$10.53 \pm 0.32$	$2.80 \pm 0.66$	$-34.45 \pm 1.39$

Die Punkte im letzten Graphen wurden nur bis 10°C gefittet, da bei 20°C aus systematischen, nicht komplett verstandenen Gründen ein Ausreißer den Fit ansonsten unbrauchbar machen

würde.

Das Rauschen einer CCD-Kamera setzt sich zusammen aus Dunkelrauschen, welches unabhängig von der Lichtmenge auftritt, und dem lichtabhängigen Rauschen, was sich seinerseits aus Schrotrauschen und Photonenrauschen zusammensetzt. Da hier nur Darkframes betrachtet werden, ist aber nur Ersteres relevant. Das Dunkelrauschen lässt sich in zwei Komponenten aufteilen: Das durch die Elektronik bedingte Ausleserauschen, welches einen konstanten Untergrund bildet und auch bei niedrigen Temperaturen nicht völlig verschwindet, und das Dunkelstromrauschen, welches stark temperaturabhängig ist und bei hohen Temperaturen dominant wird. Das Ausleserauschen kommt vor allem durch die Digitalisierung zustande, dieser Anteil wird auch als Quantisierungsrauschen bezeichnet. Da die digitalen Werte diskret sind, müssen die analogen Messwerte gerundet werden; die dabei auftretende Differenz ist die Ursache des Quantisierungsrauschens. Außerdem produziert die Elektronik selbst auch falsche Elektronen, die aber dennoch mitgezählt werden, was auch einen nicht zu unterschätzenden Teil des Ausleserauschens ausmacht. Das Dunkelstromrauschen wird durch den schon beschriebenen Dunkelstrom verursacht, welcher mit steigender Temperatur seinerseits ansteigt. Es sorgt für einen starken Anstieg der Breite der Verteilung (und damit des RMS) mit zunehmender Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit ist dabei von der Form  $\exp(\frac{-E}{kT})$  mit der Energie  $E$ , da bei hohen Temperaturen irgendwann keine zusätzlichen Ladungen mehr produziert werden können [5].

# Kapitel 4

## Charakterisierung der CCD-Kamera mit Objektiv

### 4.1 Abbildungsmodell und zu bestimmende Parameter

Nachdem nun einige grundlegende Eigenschaften des CCD-Chips untersucht wurden, sollen jetzt die Parameter bestimmt werden, die maßgeblich zu Abbildungsfehlern der Kamera beitragen. Dazu muss zuerst ein Abbildungsmodell erstellt werden. Das Aufnehmen eines Bildes mit einer Kamera ist die Projektion eines dreidimensionalen Gegenstandes auf die zweidimensionale Ebene des Kamera-Chips. Im sog. Lochkamera-Modell wird die Abbildung einfach durch ein Loch in der Kamera erzeugt. Das Modell geht dabei von einer idealen Abbildung aus, Verzerrungen und Aperturgrenzen werden vernachlässigt. Die Abbildung kann deshalb durch zwei einfache Matrizen (Kameramatrix  $K$  und Bewegungsmatrix  $B$ ) beschrieben werden, die jeden Punkt im Raum  $\vec{o}$  (object point) auf einen bestimmten Punkt im Bild  $\vec{i}$  (image point) abbilden:

$$\vec{i} = K \cdot B \cdot \vec{o}$$

bzw. in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Dabei sind (X,Y,Z) die dreidimensionalen Koordinaten im Weltkoordinatensystem und (u, v) die Pixelkoordinaten des projizierten Punktes im Bild.

Die Bewegungsmatrix  $B$  beschreibt die Bewegung der Kamera im Raum (bzw. die Bewegung des aufgenommenen Objekts relativ zur Kamera). Multiplikation mit  $B$  bewirkt eine Transformation der Objektkoordinaten aus dem Weltkoordinatensystem in ein dreidimensionales Kamerakoordinatensystem. Jede Bewegung im Raum lässt sich durch eine Rotation, d.h. Multiplikation mit einer Rotationsmatrix

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

und einer Translation, also anschließende Addition eines Translationsvektors  $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)$  darstellen. In der projektiven Geometrie vereinfacht die Wahl von homogenen Koordinaten diese Transformation zu einer einfachen Matrixmultiplikation mit der Bewegungsmatrix  $B$ , indem

der 3D-Vektor im Weltkoordinatensystem  $(X, Y, Z)$  auf den 4D-Vektor  $(X, Y, Z, 1)$  erweitert wird. Diese Methode hat den Vorteil, dass alle Veränderungen der Koordinaten nur durch Multiplikation einer Matrix zustande kommen, und so alle Abbildungsmatrizen durch Matrixmultiplikation zu einer einzigen abbildenden Matrix zusammengefasst werden können. Da die Position der Kamera bzw. des aufgenommenen Objekts relativ zur Kamera zeitabhängig sein kann, handelt es sich bei der Bewegungsmatrix um eine extrinsische Matrix, die für jedes aufgenommene Bild anders aussieht.

Die Kameramatrix beschreibt die Abbildung eines 3D-Punktes im Kamerakoordinatensystem auf einen 2D-Punkt (Pixel) im Bild. Dabei entsprechen  $(f_x, f_y)$  den in x- bzw. y-Richtung ermittelten Fokallängen (in der Einheit Pixel pro mm), die bei einer guten Optik möglichst nah beieinander liegen;  $(c_x, c_y)$  sind die Koordinaten des Bildmittelpunktes (in Pixeln pro mm), der vom Mittelpunkt des CCD-Chips abweichen kann, wenn dieser nicht genau im Zentrum der Kamera eingebaut wurde bzw. mit Neigung gegenüber der x-y-Ebene. Es handelt sich bei der Kameramatrix um eine intrinsische Matrix, die unabhängig vom aufgenommenen Objekt ist (sofern die Fokallänge nicht mehr geändert wird) und damit für jede Koordinatentransformation benutzt werden kann, sobald man sie einmal berechnet hat.

Bei realen Linsen kommen noch Abbildungsfehler hinzu, vor allem radiale Verzerrung, aber auch tangentielle Verzerrung kann auftreten. Sie lassen sich nicht mehr durch einfache Matrixmultiplikation beschreiben. Zuerst werden die Koordinaten im Kamerakoordinatensystem  $(x, y, z)$  durch  $z$  normiert:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = B \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$x' = \frac{x}{z}$$

$$y' = \frac{y}{z}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$$

Dadurch sind  $(f_x, f_y)$  sowie  $(c_x, c_y)$  nun reine Pixelkoordinaten. Nun lässt sich die Verzerrung ins Modell einfügen. Dazu wird der Winkelabstand eines Punktes im Kamerakoordinatensystem  $(x, y, z)$  von der optischen Achse  $r$  definiert als:

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

Man beachte, dass durch  $z > x$  und  $z > y$  gilt:  $x', y' < 1$  und somit  $r < 1$ . Da  $x' = \frac{x}{z} = \tan \omega$  mit dem Bildwinkel  $\omega < 2.6^\circ$ , ergibt sich ein  $x'$  von maximal 0.05.  $y'$  und  $r$  liegen ebenfalls in der Größenordnung von  $10^{-2}$ . Das Modell mit Verzerrung sieht wie folgt aus:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = B \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \frac{1}{z} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix}$$

Die Koeffizienten  $k_1$  bis  $k_6$  sind die Parameter der radialen Verzerrung, während  $p_1$  und  $p_2$  die Parameter der tangentialen Verzerrung sind. Durch die vorherige Normierung auf  $(x', y')$  sind sie einheitenlos. Korrekturen höherer Ordnung sind typischerweise vernachlässigbar und werden in diesem Modell nicht mit einbezogen. Auch die Verzerrungsparameter sind intrinsisch, also in jedem Bild identisch. Einmal bestimmt, ermöglichen sie, die Verzerrung in einem aufgenommenen Bild rechnerisch zu entfernen und so ein völlig verzerrungsfreies Bild zu erhalten.

Um die verwendete CCD-Kamera und ihre Abbildungsfehler zu beschreiben und Bilder nachträglich verzerrungsfrei darstellen zu können, müssen also alle intrinsischen Parameter der Abbildung bestimmt werden; die Kameramatrix  $K$  und damit  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $c_x$  und  $c_y$  sowie der Verzerrungsvektor  $\vec{s} = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ . In dieser Bachelorarbeit wurde das Modell der radialen Verzerrung auf die Parameter  $k_1$  bis  $k_3$  beschränkt, womit sich der Verzerrungsvektor auf  $\vec{s} = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$  reduziert [9][10].

## 4.2 Kalibrierung mit OpenCV

Zur Kalibrierung der Kamera wurde die Programmbibliothek OpenCV benutzt. Der Name steht für **Open** Source **Computer Vision**, es handelt sich um eine im Internet kostenlos erhältliche Bibliothek. Sie enthält Algorithmen zum maschinellen Sehen in Echtzeit und zur Bildverarbeitung und ist in C bzw C++ geschrieben. Die Entwicklung der Bibliothek wurde 2006 von Intel initiiert, heute wird sie hauptsächlich von Willow Garage gepflegt. In dieser Arbeit wurde auf die aktuellste Version 2.4.0 zurückgegriffen [13][14]. In OpenCV findet man unter anderem auch Programme, die zur Kalibrierung einer Kamera mit dem im letzten Abschnitt beschriebenen Modell gedacht sind. Dabei nimmt man eine Reihe von Bildern eines bekannten Musters auf und berechnet dann durch Vergleich zwischen Bild und Muster die intrinsischen und extrinsischen Kameraparamter. Als Kalibrationsmuster wurde in der hier vorgestellten Kalibrierung ein ausgedrucktes Schachbrettmuster im DIN-A4-Format verwendet, das auf eine Holzplatte geklebt wurde. Es handelte sich um ein neun mal sechs Feldern großes Schachbrett, die Seitenlänge eines Feldes betrug 25 mm.

### 4.2.1 Aufnahme der Kalibrierungsbilder

Das Programm **CCDCalibrationImages** wurde geschrieben, um die zur Kalibrierung nötigen Bilder einfach und schnell aufnehmen zu können. Es nimmt eine Reihe von Bildern in Abständen von je 5 s auf und zeigt jedes Bild unmittelbar nachdem es aufgenommen wurde auf dem Monitor des Computers an. Der Experimentator stellt sich mit dem Schachbrett vor die Kamera und hat nach jeder Aufnahme Zeit, die Position des Schachbretts zu verändern. Da der Bildwinkel der Kamera unter  $3^\circ$  beträgt, ist bei der gewählten Mustergröße ein großer Abstand zur Kamera erforderlich, um das Schachbrettmuster komplett aufnehmen zu können. Der Experimentator musste in etwa 7 m Entfernung vor der Kamera stehen. Durch das auf dem Monitor angezeigte Bild hat man eine direkte Rückmeldung, ob sich das Schachbrett noch im Bildausschnitt befindet. Die Anzahl der aufzunehmenden Bilder sowie die Belichtungszeit ist vor jeder Messreihe frei wählbar.

Auf Kühlung der Kamera während der Aufnahme der Bilder wurde bewusst verzichtet, da die die minimale Verbesserung der Genauigkeit die lange Wartezeit bis zum Erreichen der optimalen Arbeitstemperatur von  $-20^\circ$  nicht rechtfertigen würde. Durch die kleinen Belichtungszeiten ist das Rauschen vernachlässigbar. Größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Kalibrierung als die thermische Fluktuation der Elektronen haben makroskopische Einflüsse wie etwa Unebenheiten im 0,1 mm-Bereich durch imperfektes Aufkleben des Schachbretts auf die Holzplatte oder kleinste Bewegungen beim Halten der Holzplatte durch den Experimentator. Es sollte darauf geachtet werden, möglichst viele Bilder aufzunehmen, in denen das Schachbrett jeweils unter anderen Winkeln zu sehen ist, um gute Daten für die Kalibrierung zu erhalten. Die Bilder werden als zweidimensionale Histogramme (Ausgelesener Helligkeitswert zu 2D-Koordinaten für jedes Pixel) in einem ROOT-File gespeichert. Anschließend können die Histogramme mit dem selbstgeschriebenen Programm **OpenCVImagelist** in JPEG-Bilder umgewandelt werden. Dieses Programm erzeugt außerdem eine sogenannte „imagelist“, auf der alle Bilder gelistet sind und die zur weiteren Kalibrierung mit OpenCV benötigt wird. Nun kann der eigentliche Kalibrierungsvorgang mit dem im Zuge dieser Arbeit erstellten Programm **OpenCVCalibration** gestartet werden.

### 4.2.2 OpenCVCalibration

Das Programm beruht wie bereits erwähnt darauf, die 3D-Koordinaten von ausgewählten Referenzpunkten im Weltkoordinatensystem  $\vec{o} = (X, Y, Z)$  mit den 2D-Koordinaten ihrer Abbildungen im Pixelkoordinatensystem eines Bildes  $\vec{i} = (u, v)$  in Verbindung zu bringen und daraus die intrinsischen Abbildungseigenschaften zu extrahieren. Als Referenzpunkte werden dabei alle Ecken im Schachbrettmuster benutzt, in denen je vier Felder aufeinandertreffen. Im gewählten Muster mit neun mal sechs Feldern gibts es also sieben mal zehn Referenzpunkte.

Als Erstes werden die Koordinaten der Objectpoints berechnet. Dazu benötigt das Programm die Information, dass es sich beim verwendeten Muster um ein Schachbrett handelt, welche Seitenlänge ein quadratisches Feld auf diesem hat (hier: 25 mm) und wie viele Eckpunkte es lang bzw. breit ist (hier:  $7 \cdot 10$ ). Das Programm geht dabei davon aus, dass die Seitenlänge in Pixeln angegeben wird. Dazu teilt man die Seitenlänge einfach durch die Größe eines Pixels (hier:  $9 \mu\text{m}$ ). Die im Fall des hier verwendeten Schachbretts angegebene Seitelänge muss also  $\frac{25 \text{ mm}}{9 \frac{\text{mm}}{\text{Pixel}}} = 2777 \text{ Pixel}$  lauten.

Da es sich um ein ebenes Muster handelt, wird die  $Z$  Koordinate Null gesetzt; die  $X$ - sowie die  $Y$ -Koordinate jedes Punktes können mit den vorhandenen Informationen berechnet werden. So erhält das Programm eine Reihe von Objectpoints im Koordinatensystem des Schachbretts, das hier das Weltkoordinatensystem darstellt und von dem nicht bekannt ist, wie es zur Kamera steht. Die Objectpoints beschreiben also nur die Anordnung der Ecken auf dem Schachbrett, nicht dessen Position im Raum relativ zur Kamera. Sie sind deswegen für jedes aufgenommene Bild identisch.

Als Zweites müssen die Imagepoints bestimmt werden. Sie beschreiben die Positionen  $(u, v)$  der Schachbrettecken im aufgenommenen Bild, die sich von Aufnahme zu Aufnahme unterscheiden, da das Schachbrett zwischen den Aufnahmen im Raum bewegt wird. Deshalb müssen sie in jedem Bild neu gefunden werden. Dazu werden die in OpenCV definierten Funktionen **FindChessboardCorners** bzw. für noch genauere Koordinaten **cornerSubPix** auf die aufgenommenen Bilder angewendet. Sie beruhen darauf, dass (große) Helligkeits-Gradienten im Bild immer dort zu finden sind, wo eine weiße Fläche auf eine schwarze trifft und somit orthogonal auf den Kanten stehen, die weiße von schwarzen Schachbrettfeldern trennen (siehe

Abb. 4.1). Natürlich gibt es aufgrund von Bildrauschen auch Gradienten innerhalb der weißen bzw. schwarzen Flächen, die aber bei gutem Kontrast wesentlich kleiner sind und nicht stark ins Gewicht fallen. Zur Eckendetektion muss man einen Punkt  $\vec{q}$  finden, so dass die Vektoren von dort entlang der Kanten senkrecht auf den Gradienten stehen. Alle Punkte in unmittelbarer Nähe von  $\vec{q}$  werden im Folgenden mit  $\vec{p}_i$  bezeichnet.

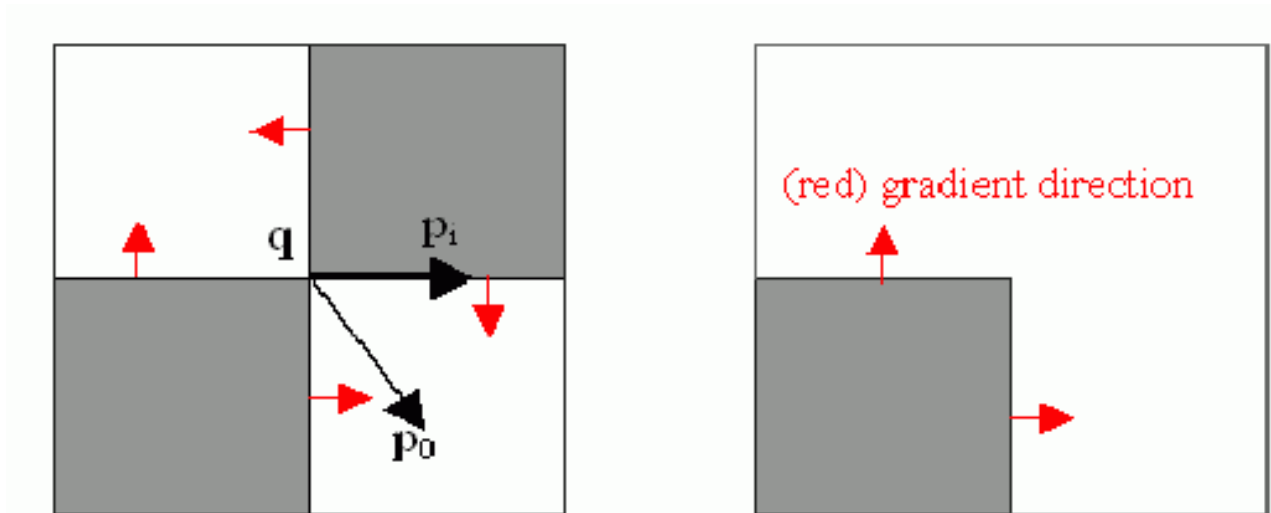
Für das Skalarprodukt zwischen dem Vektor von  $\vec{q}$  zu  $\vec{p}_i$  und dem Gradienten  $grad_{p_i}$  am Punkt  $\vec{p}_i$  gilt also:

- $(\vec{q} - \vec{p}_i) \cdot grad_{p_i} = 0$  wenn  $\vec{p}_i$  auf einer Kante liegt (Vektoren senkrecht aufeinander, siehe  $\vec{p}_1$  in Abb.4.1)
- $(\vec{q} - \vec{p}_i) \cdot grad_{p_i} = \epsilon_i$  wenn  $\vec{p}_i$  nicht auf einer Kante liegt ( $\epsilon_i$  klein, da  $grad_{p_i}$  dann sehr klein, siehe  $\vec{p}_0$  in Abb.4.1)

Da das Programm schon weiß, wie viele Ecken es im Bild gibt, muss es genauso viele Punkte  $\vec{q}$  finden, so dass  $\epsilon_i$  im Ausdruck

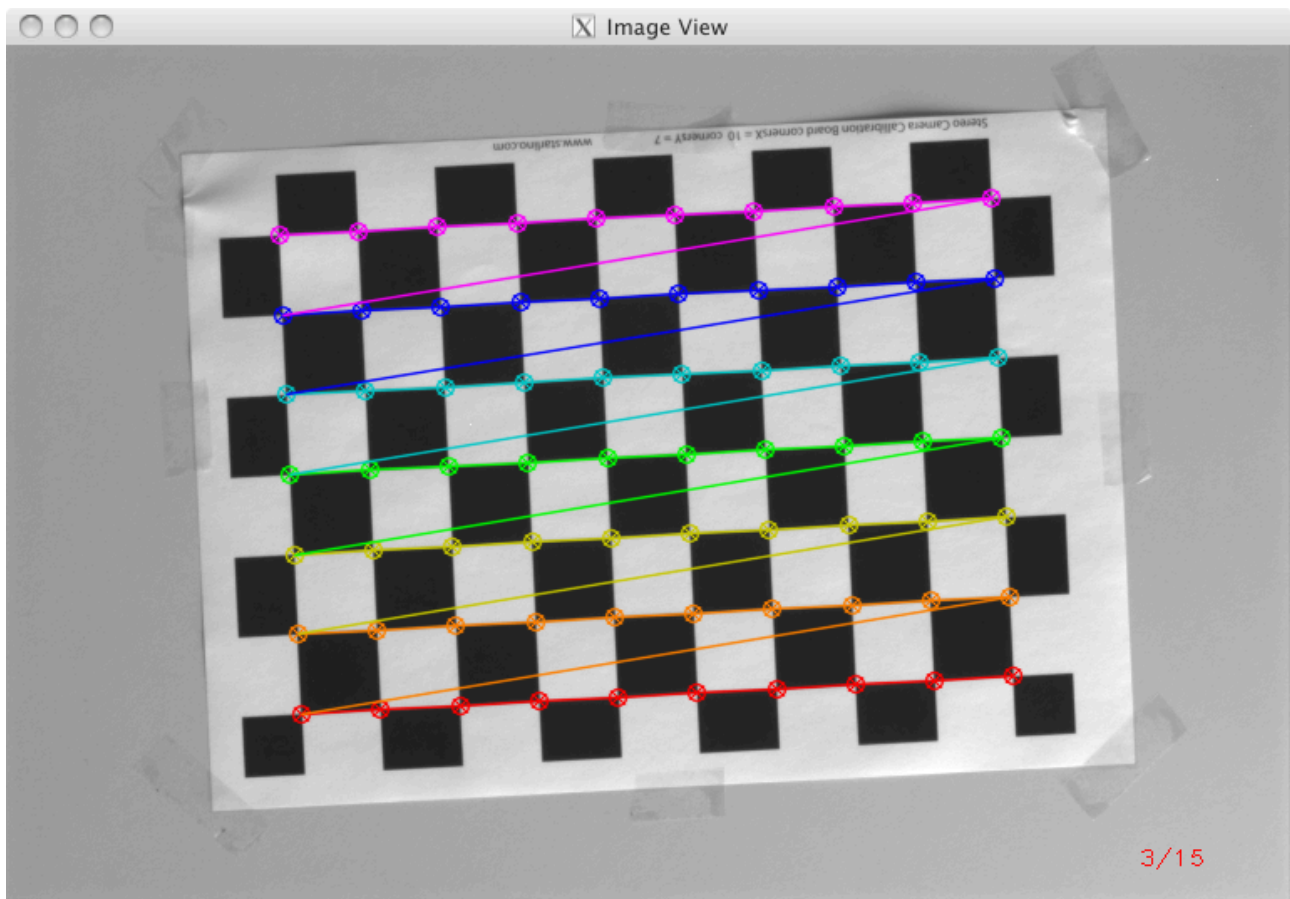
$$(\vec{q} - \vec{p}_i) \cdot grad_{p_i} = \epsilon_i$$

für alle  $i$  minimal wird.



**Abbildung 4.1:** Verfahren zur Eckendetektion über Gradienten im aufgenommenen Schachbrettmuster, mit deren Hilfe die Eckpunkte  $q$  berechnet werden können. Quelle: [15].

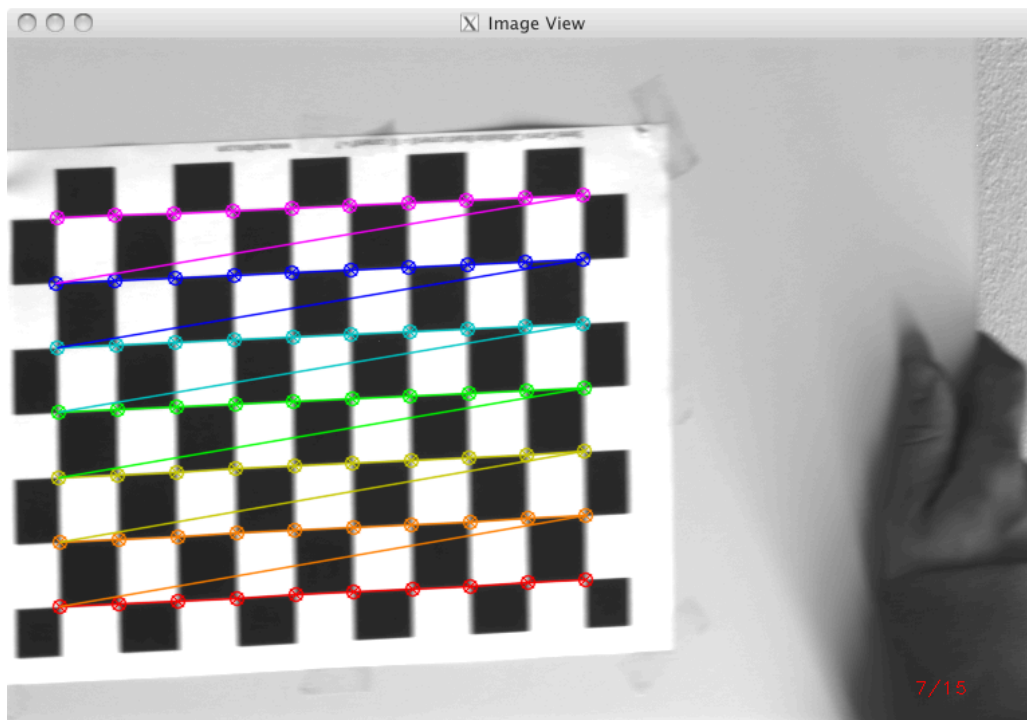
Damit findet man automatisch die Punkte, an denen vier Kanten aufeinander treffen, egal unter welchem Winkel sie dies tun. Mit der Funktion **DrawChessboardCorners** werden sie ins aufgenommene Bild eingezeichnet und dieses angezeigt, um dem Benutzer eine Rückmeldung zu geben, wie in Abb. 4.2 dargestellt. Die Anzahl an gefundenen Imagepoints in einem Bild muss identisch zur Anzahl an berechneten Objectpoints sein, andernfalls benutzt OpenCV es im Zuge der restlichen Kalibrierung nicht weiter, was dem Benutzer durch Anzeigen des Bildes ohne eingezeichnete Ecken verdeutlicht wird. Der Algorithmus zur Eckenerkennung ist extrem stabil und funktioniert oft auch noch bei verwackelten (siehe Abb. 4.3) oder schlecht belichteten Aufnahmen (siehe Abb. 4.4). Trotzdem sollten diese nach Möglichkeit nicht zur Kalibrierung verwendet werden, da eine Studie der durch schlechte Bilder hervorgerufenen systematischen Unsicherheiten im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.



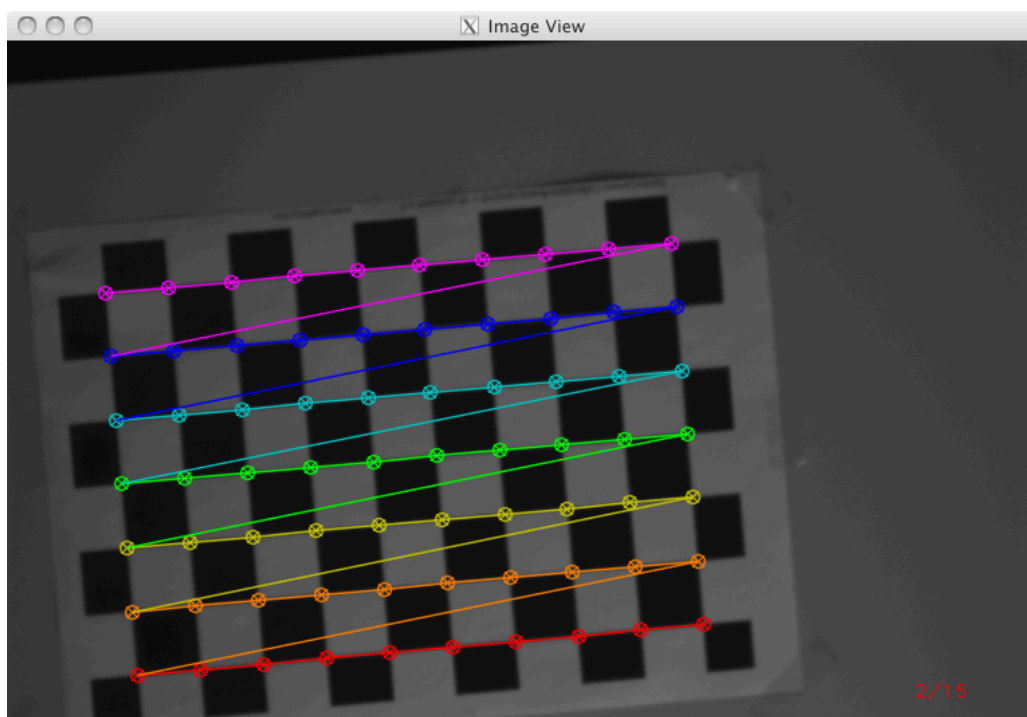
**Abbildung 4.2:** Mit der CCD-Kamera aufgenommenes Bild eines Schachbretts. Die Ecken wurden mithilfe von OpenCV erkannt und eingezeichnet, wobei unterschiedliche Reihen durch unterschiedliche Farben verdeutlicht werden. Hier handelt es sich um ein mit Blende 8 aufgenommenes Bild, das 0.4 s belichtet wurde. Die rote Zahl rechts unten gibt an, welche Nummer das Bild in der aktuellen Messreihe trägt.

Alle Bilder, für die nun sowohl Imagepoints als auch Objectpoints bekannt sind, werden der OpenCV-Funktion **CalibrateCamera** übergeben. Sie basiert auf [11] und [12]. Zuerst werden die intrinsischen Kamera-Parameter berechnet, wobei die Verzerrungs-Parameter zunächst alle auf Null gesetzt werden. Dann werden für jedes Bild die extrinsischen Parameter mit der Funktion **solvePnP** berechnet, die bei Kenntnis der intrinsischen Parameter sowie der object und image points die Position des aufgenommenen Objekts relativ zur Kamera berechnen kann. Sind intrinsische und extrinsische Parameter gefunden, können damit die Objectpoints in die Bildebene projiziert werden. Die erhaltenen Abbildungspunkte nennt man Projectpoints. Die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Projectpoints und den tatsächlichen Imagepoints eines Bildes (in Pixeln) wird als Reprojection-Error bezeichnet, gemittelt über alle Bilder ergibt sich der Gesamt-Reprojection-Error. Mit dem Levenberg-Marquardt Optimierungs-Algorithmus wird dieser minimiert, bis gute Parameter gefunden sind. Dabei werden auch die Verzerrungs-Parameter freigegeben. Die Parameter mit dem kleinsten Reprojection-Error werden schließlich in einer Datei gespeichert. Je mehr Bilder zur Kalibrierung verwendet werden, desto genauer können dabei die einzelnen Parameter bestimmt werden.

Sind Verzerrungs-Parameter und Kameramatrix bestimmt, kann die Funktion **undistort** aufgerufen werden. Sie kann Bilder, die mit Verzerrung aufgenommen wurden, in verzerrungsfreie Bilder umrechnen und diese anzeigen. Da Verzerrungs-Parameter und Kameramatrix intrinsisch, also für alle mit dem gleichen Objektiv aufgenommenen Bilder dieselben sind, kann so



**Abbildung 4.3:** Ein verwackeltes Bild (bei gleicher Blende und Belichtung), in dem OpenCV trotzdem noch alle Ecken erkennt. Allerdings wird die Kalibrierung durch verwackelte Bilder ungenauer, da die Eckenposition nicht mehr exakt ist. Deshalb sollten keine verwackelten Bilder zur Kalibrierung verwendet werden.



**Abbildung 4.4:** Dieses Bild wurde mit Blende 2 und 0.01 s Belichtungszeit aufgenommen, welche sich als zu kurz herausstellt. Trotzdem reicht der vorhandene Kontrast OpenCV zum Erkennen der Ecken aus.

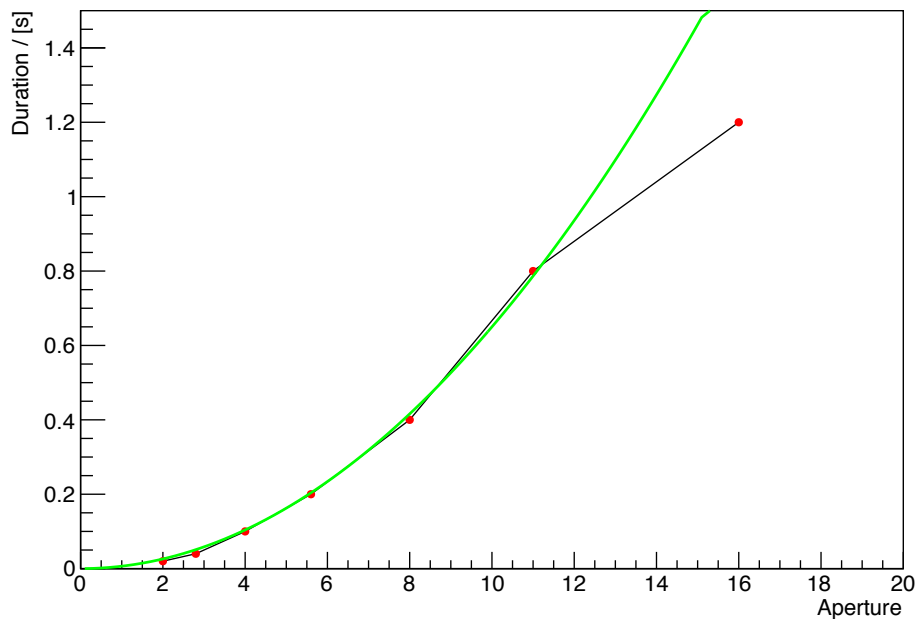
nachträglich die Verzerrung aus jedem aufgenommenen Bild entfernt werden.

### 4.2.3 Resultate

Die Kalibrierung der Kamera mit den oben beschriebenen Programmen wurde mehrfach durchgeführt, wobei in jeder Messreihe 15-20 Bilder aufgenommen wurden, dabei wurde die Blendenzahl  $k$  nach jeder Messreihe erhöht. Diese beschreibt die Größe der Blendenöffnung; sie gibt das Verhältnis der Brennweite  $f$  zum Durchmesser  $D$  der wirksamen Eintrittspupille an:

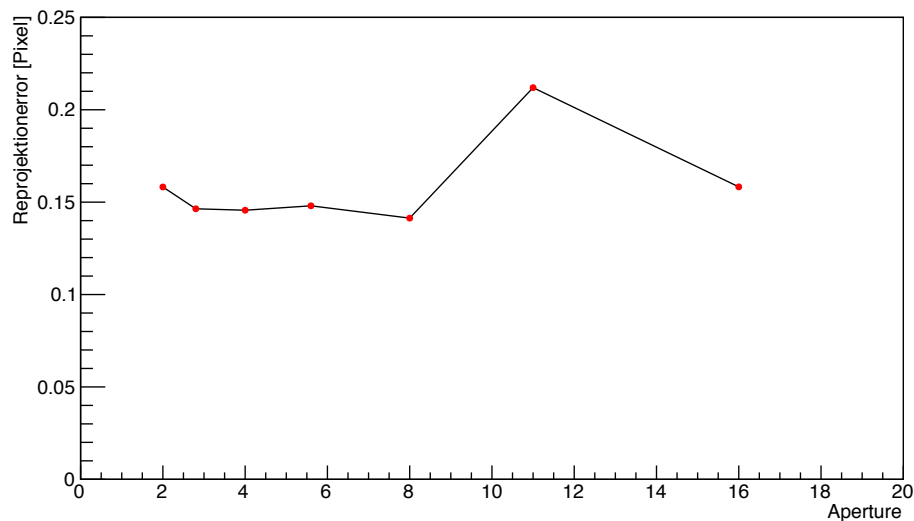
$$k = \frac{f}{D}$$

Geht man zur nächsthöheren Blendenzahl, halbiert sich offene Fläche  $A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$  und damit die durchgelassene Lichtmenge. Die Blendenzahl wächst also mit dem Faktor  $\sqrt{2}$ , wobei sie immer gerundet angegeben wird. Die Blenden des bei der Kalibrierung verwendeten Objektives tragen die Nummern 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16 und 22. Je größer die Zahl, desto kleiner die Blendenöffnung; es muss also eine doppelt so lange Belichtungszeit gewählt werden, um nach einer Erhöhung der Blendenzahl wieder die gleiche Lichtmenge auf den Chip zu bekommen. In Abb. 4.5 ist die jeweils gewählte Belichtungszeit (Duration) in dieser Arbeit gegen die Blendenzahl (Aperture) aufgetragen. Bei Blende 16 wurde bewusst weniger als die doppelte Belichtungszeit gewählt, da die Gefahr, dass Bilder verwackeln, mit höherer Belichtungszeit deutlich steigt, da das fotografierte Schachbrett per Hand gehalten wird. Auf Aufnahmen mit Blende 22 wurde aus demselben Grund komplett verzichtet. Bei allen zu kalibrierenden Werten hat sich gezeigt, dass die verwendete Blende keinen Einfluss auf die Kalibrierung hat. Die Abweichungen in den einzelnen Werten sind auf zufällige Schwankungen zurückzuführen, sind aber in keiner Form mit der Blendenzahl korreliert. Deshalb wurden die Messreihen zu den einzelnen Blenden als gleichwertige, unabhängige Messreihen behandelt. Durch Mittelung über alle Messreihen wurde der statistische Fehler im Gesamtergebnis reduziert.



**Abbildung 4.5:** Gewählte Belichtungszeit (Duration) zu jeder verwendeten Blende (Aperture). Beim Erhöhen der Blendenzahl (um Faktor  $\sqrt{2}$ ) muss die Belichtungszeit verdoppelt werden, um die gleiche Lichtmenge einzufangen. Die grüne Linie stellt zum Vergleich die erwartete Parabelform dar. Die Belichtungszeit bei Blende 16 wurde bewusst kleiner gewählt, so dass sie von der Parabelform abweicht.

Da die einzelnen Abbildungsparameter durch das Programm OpenCV ohne Fehlerberechnung berechnet werden, ist eine Fehlerangabe zu jedem einzelnen Wert nicht möglich. Der Gesamt-Reprojection-Error gibt aber ein Maß für die Größe des Fehlers der Kalibration. In Abb. 4.6 ist der Gesamt-Reprojection-Error zu jeder Messreihe zu sehen. Er beschreibt die mittlere quadratische Abweichung von Projectpoints und Imagepoints in Pixeln. Der Reprojection-Error ist also ein Maß dafür, wie gut das angepasste Abbildungsmodell die tatsächliche Abbildung repräsentiert. Bei einer guten Kalibrierung liegt er bei unter einem Pixel. Den höchsten Reprojection-Error mit 0.21 Pixeln weist die Messreihe zu Blende 11 auf, die in dieser Reihe gefundenen Parameter sind also nicht so genau wie die der anderen Reihen. Der mittlere Reprojection-Error aller Kalibrierungen beträgt 0.16 Pixel.

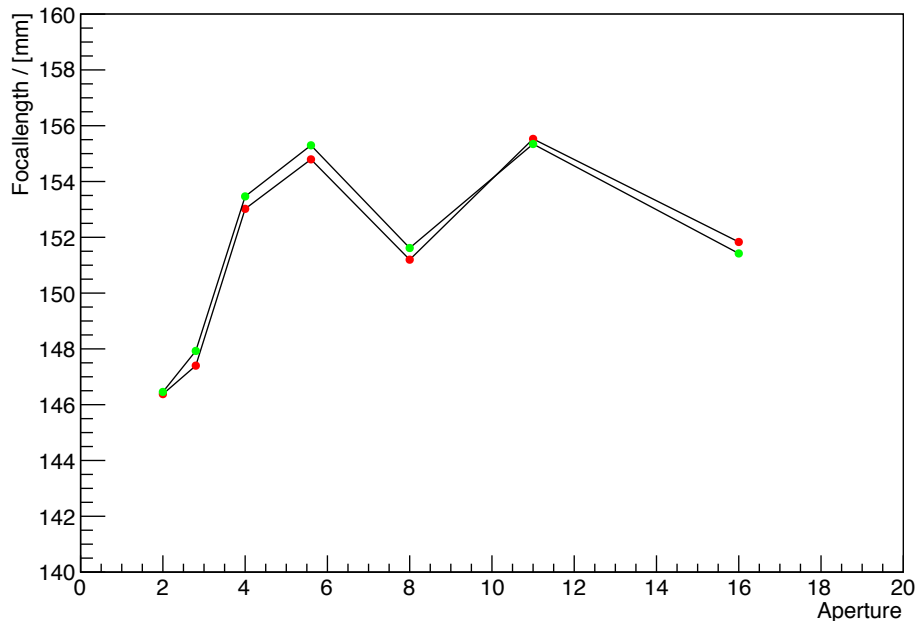


**Abbildung 4.6:** Gesamt-Reprojection-Error der jeweiligen Messreihe über der verwendeten Blende. Er beschreibt die mittlere quadratische Abweichung von Projectpoints und Imagepoints. Je kleiner der Reprojectionerror, desto besser werden die aufgezeichneten Bilder durch das Abbildungsmodell beschrieben, mit denen die Projectpoints berechnet wurden; er ist somit ein Maß für die Genauigkeit der Kalibrierung.

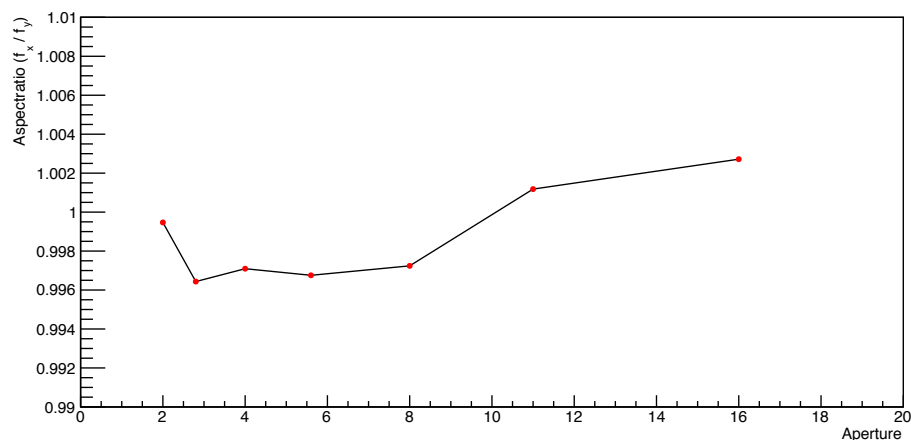
Abb. 4.7 zeigt die im Zuge der Kalibrierung ermittelten Fokallängen ( $f_x$ ,  $f_y$ ) der Kamera. Dazu wurden die Fokallängen in Pixeln, die der Kameramatrix entnommen wurden, mit der Pixelgröße von  $9 \cdot 10^{-3}$  mm multipliziert, um die Fokallängen in mm zu erhalten. Auch sie geben eine gute Rückmeldung, ob die Kalibrierung sinnvoll ist. Die in x-Richtung ermittelte Fokallänge  $f_x$  sollte nicht zu stark von der in y-Richtung ermittelten Fokallänge  $f_y$  abweichen, wenn die Abbildungsmatrix die Abbildung gut repräsentiert. Das Verhältnis  $\frac{f_x}{f_y}$ , dargestellt in Abb. 4.8, sollte also nahe bei 1 liegen. In der hier durchgeführten Kalibrierung weicht es um höchstens 0.004 von 1 ab. Die ermittelten Fokallängen selbst liegen im Bereich von 146 mm bis 156 mm. Im Mittel ergibt sich für  $f_x$  ein Wert von 151,5 mm und für  $f_y$  ein Wert von 151,6 mm. Die auf dem Nikon-Objektiv angegebene Brennweite lautet aber 135 mm. Die Abweichung ist damit zu erklären, dass das Objektiv über einen Nikon-zu-C-Mount-Adapter an die Kamera geschraubt wird, welcher aber selbst noch ein Stück vom CCD-Chip entfernt ist. Damit ergibt sich eine zusätzliche Strecke, die das Licht zurücklegen muss, welche also in etwa  $152 \text{ mm} - 135 \text{ mm} = 17 \text{ mm}$  lang ist. Rechnet man den Bildwinkel  $\omega = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d}{2 \cdot f}\right)$  mit der kalibrierten Brennweite aus, ergibt sich ein Bildwinkel von  $2.6^\circ$  in x-Richtung bzw.  $1.7^\circ$  in y-Richtung.

In Abb. 4.9 sind die ebenfalls aus der Kameramatrix entnommenen Koordinaten des Bildmit-





**Abbildung 4.7:** Durch die Kalibrierung gefundene Fokallängen zu jeder Blende. Die roten Punkte stellen die durch die  $x$ -Koordinaten bestimmte Fokallänge  $f_x$ , die grünen die durch die  $y$ -Koordinaten bestimmte Fokallänge  $f_y$  dar. Das Verhältnis der beiden ist in Abb. 4.8 dargestellt.

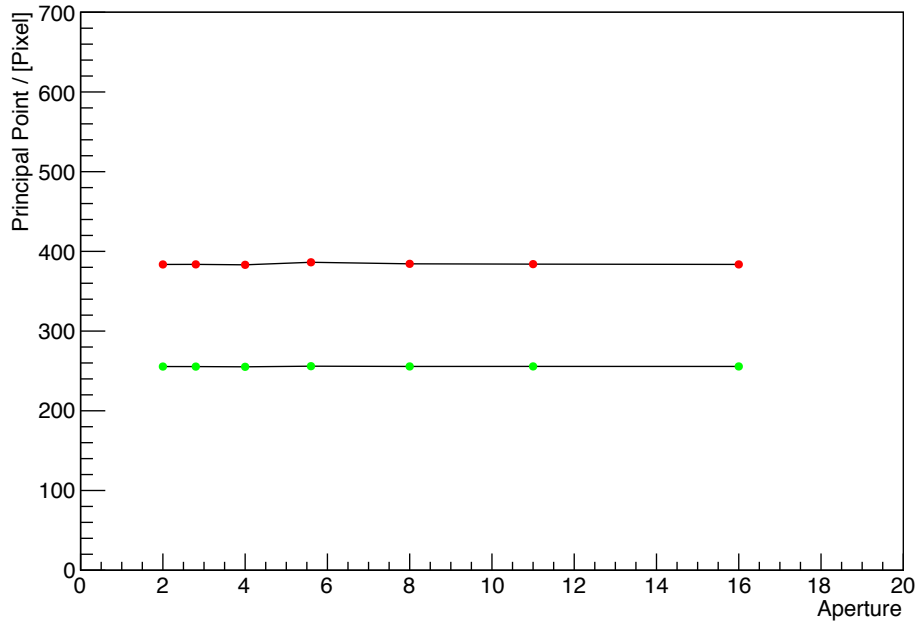


**Abbildung 4.8:** Aspectratio, also Verhältnis der beiden Fokallängen  $\frac{f_x}{f_y}$  für jede Blende. Bei einer guten Kalibration sollte dieses Verhältnis sehr nahe an 1 liegen, hier ist die maximale Abweichung 0.004.

telpunktes ( $c_x, c_y$ ) in Pixeln zu sehen, die bei der Kalibrierung berechnet wurden. Dabei stehen die roten Punkte für die ermittelten  $x$ -Koordinaten  $c_x$ , die grünen für die  $y$ -Koordinaten  $c_y$ . Wie bereits beschrieben, kann der Bildmittelpunkt vom Mittelpunkt des CCD-Chips abweichen, wenn dieser nicht genau im Zentrum der Kamera eingebaut ist. Das Pixel-Koordinatensystem der Kamera hat seinen Ursprung in der linken unteren Ecke des CCD-Chips, bei einer Chip-Größe von 768 Pixeln in  $x$ -Richtung und 512 Pixeln in  $y$ -Richtung liegt der Mittelpunkt des Chips also bei Pixelkoordinate  $(\frac{768}{2}, \frac{512}{2}) = (384, 256)$ . Die im Zuge der Kalibrierung ermittelten Werte für den Bildmittelpunkt streuen nur wenig. Der Mittelwert für die Pixel-Koordinate von  $c_x$  beträgt 384,1 der für  $c_y$  255,6; die größte Abweichung davon liegt im Bereich von 4 Pixeln. Die ermittelten Koordinaten des Bildmittelpunktes entsprechen den Koordinaten des Mittel-



punktes des CCD-Chips. Dieser wurde also exakt mittig in die Kamera eingebaut.



**Abbildung 4.9:** Pixelkoordinaten des Bildmittelpunktes (principal point). Die roten Punkte geben die  $x$ -Koordinate  $c_x$ , die grünen die  $y$ -Koordinate  $c_y$  an.

Die berechneten Werte für die Parameter  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  der radialen Verzerrung  $1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6$  sind in Abb. 4.10, Abb. 4.11 und Abb. 4.12 zu sehen. Diese Parameter werden mit  $x'$  bzw.  $y'$  und Potenzen von  $r$  multipliziert, welche alle in der Größenordnung  $10^{-2}$  oder bei höheren Potenzen auch darunter liegen und ebenfalls einheitenlos sind. Der erste Koeffizient  $k_1$  liegt im Bereich von -2 bis 0.5, der Mittelwert beträgt -0.38. Er macht somit den Hauptanteil der radialen Verzerrung aus. Der zweite Koeffizient  $k_2$  liegt im Bereich von -50 bis 10, der Mittelwert beträgt -12.5. Dieser Koeffizient ist zwar eine Größenordnung größer als der vorherige, wird aber auch mit  $r^4$  multipliziert, so dass er insgesamt weniger zur radialen Verzerrung beiträgt als der Erste. Der dritte Koeffizient  $k_3$  ist vernachlässigbar klein, er liegt im Bereich von -0.04 und 0.01, der Mittelwert beträgt -0.009. Da er der kleinste Koeffizient ist und noch mit  $r^6$  multipliziert wird, leistet er praktisch keinen Beitrag zur radialen Verzerrung. Die Mittelwerte aller Parameter der radialen Verzerrung sind negativ, das heißt die Punkte im aufgenommenen Bild scheinen durch die Verzerrung näher am Bildzentrum zu liegen, als sie es eigentlich tun. Dieser Effekt verstärkt sich mit größerem Abstand  $r$  vom Bildmittelpunkt. Es handelt sich bei der Verzerrung des Objektives also um eine tonnenförmige Verzeichnung. Bei kissenförmiger Verzeichnung wären positive Koeffizienten die Folge. Zur Veranschaulichung sind diese beiden Arten von Verzeichnung in Abb. 4.13 skizziert.

Die Parameter der tangentialen Verzerrung  $p_1$  und  $p_2$  sind in Abb. 4.14 zu sehen. Sie liegen beide im Bereich von -0.01 bis 0.02, der Mittelwert für  $p_1$  beträgt 0.008, der für  $p_2$  0.002. Sie sind damit um 2 Größenordnungen kleiner als der größte Parameter der radialen Verzerrung, werden allerdings nicht wie dieser noch mit  $x'$  bzw.  $y'$  multipliziert, welche auch in der Größenordnung von  $10^{-2}$  liegen. Damit tragen sie genauso stark zur Verzerrung bei wie  $k_1$ .

Um eine anschaulichere Vorstellung der Verzerrung zu bekommen, wurde eine Karte erstellt, auf der die Verschiebung für jedes Pixel farbig dargestellt ist. Dazu wurden die über alle Messungen gemittelten Werte für die jeweiligen Parameter benutzt, wie sie in der folgenden Tabelle

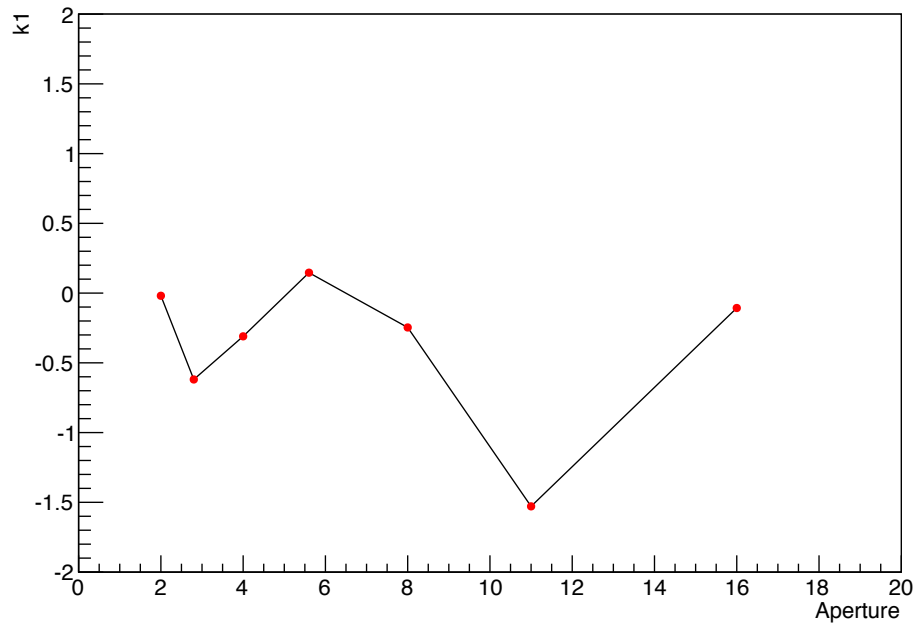


Abbildung 4.10: Wert des ersten Koeffizienten der radialen Verschiebung  $k_1$  über der Blendenzahl.

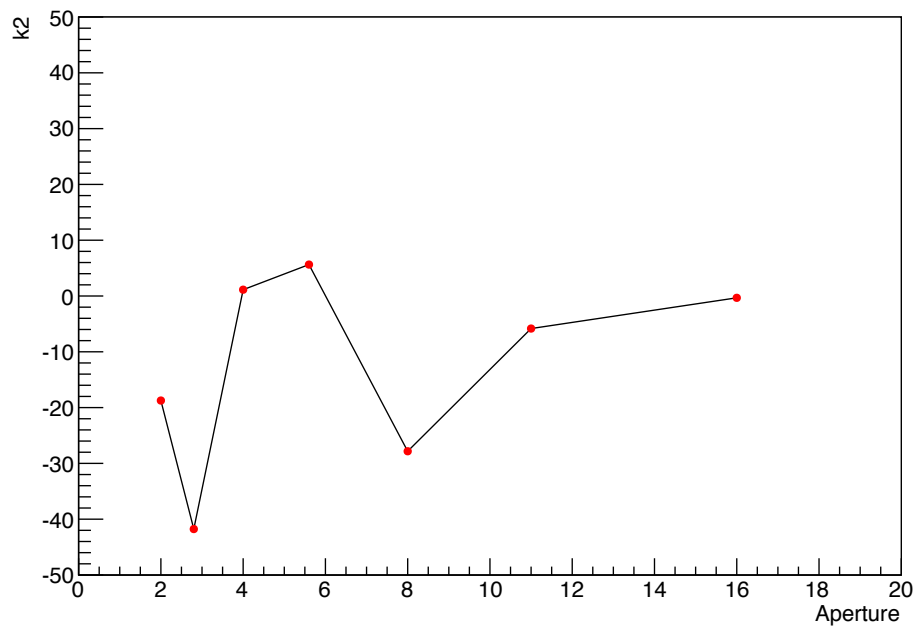
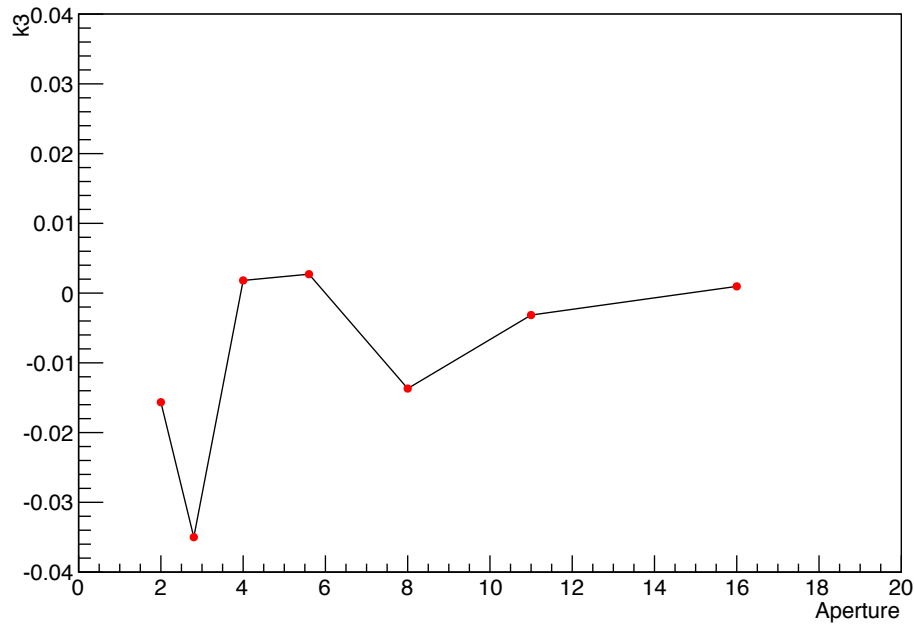
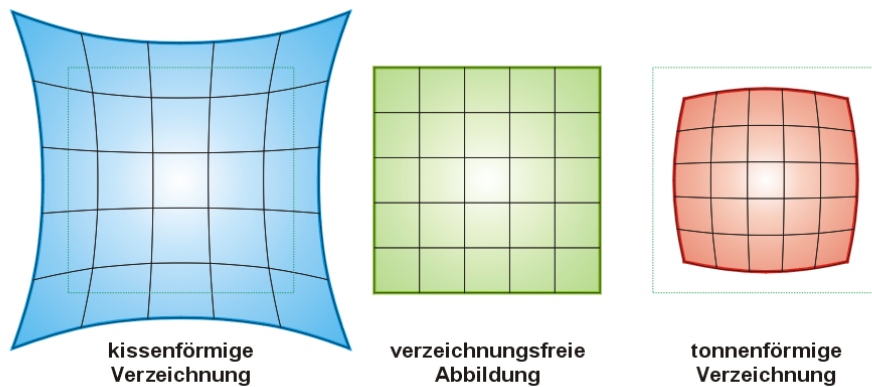


Abbildung 4.11: Wert des zweiten Koeffizienten der radialen Verschiebung  $k_2$  über der Blendenzahl.

aufgeführt sind.



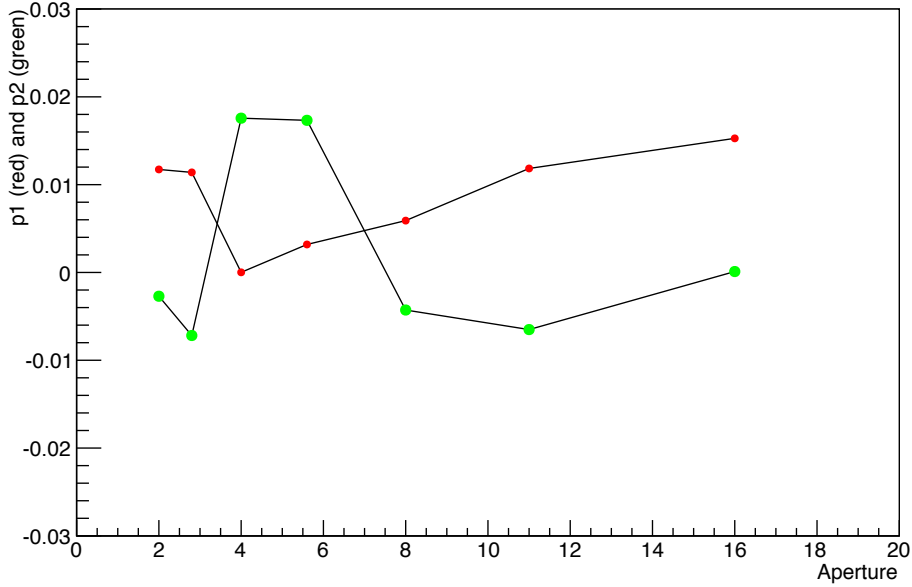
**Abbildung 4.12:** Wert des dritten Koeffizienten der radialen Verschiebung  $k_3$  über der Blendenzahl.



**Abbildung 4.13:** Die beiden Hauptarten radialer Verzerrung im Vergleich. Handelt es sich um eine kissenförmige Verzeichnung, dann lässt sich die Abbildung durch positive Koeffizienten  $k_1$  bis  $k_3$  beschreiben. Bei der Verzeichnung der hier untersuchten Kamera handelt es sich um eine tonnenförmige Verzeichnung, die Koeffizienten  $k_1$  bis  $k_3$  sind negativ.

Messgröße	Mittelwert in Kalibrierung
$f_x$	16 828 Pixel
$f_y$	16 850 Pixel
$c_x$	384,1 Pixel
$c_y$	255,6 Pixel
$k_1$	-0.38
$k_2$	-12.5
$k_3$	-0.009
$p_1$	0.008
$p_2$	0.002

Zuerst wurden die Koordinaten jedes Punktes  $(u, v)$  im Bild mit den ermittelten Brennweiten



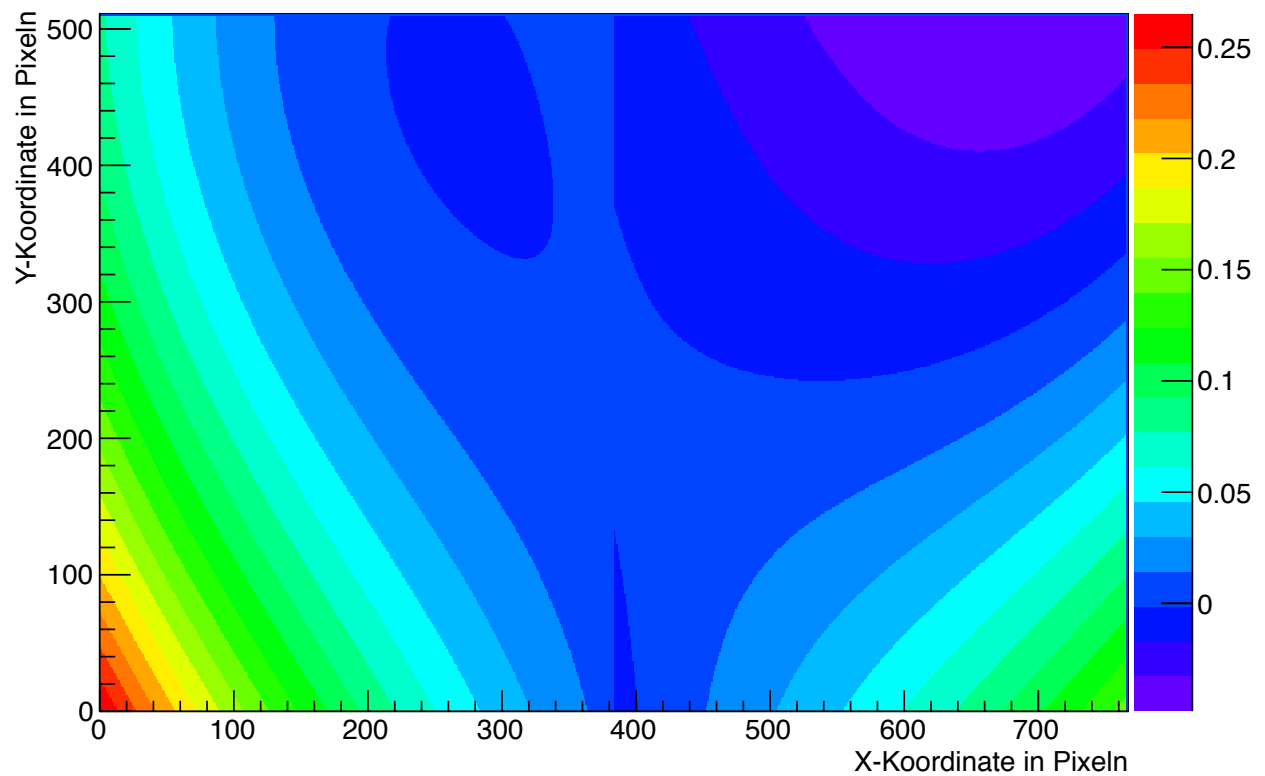
**Abbildung 4.14:** Wert der Koeffizienten der tangentialen Verschiebung  $p_1$  und  $p_2$  über der Blendenzahl.

$(f_x, f_y)$  und Bildmittelpunkten  $(c_x, c_y)$  in einheitenlose Koordinaten  $(x', y')$  umgerechnet, als wäre keine Verzerrung vorhanden:

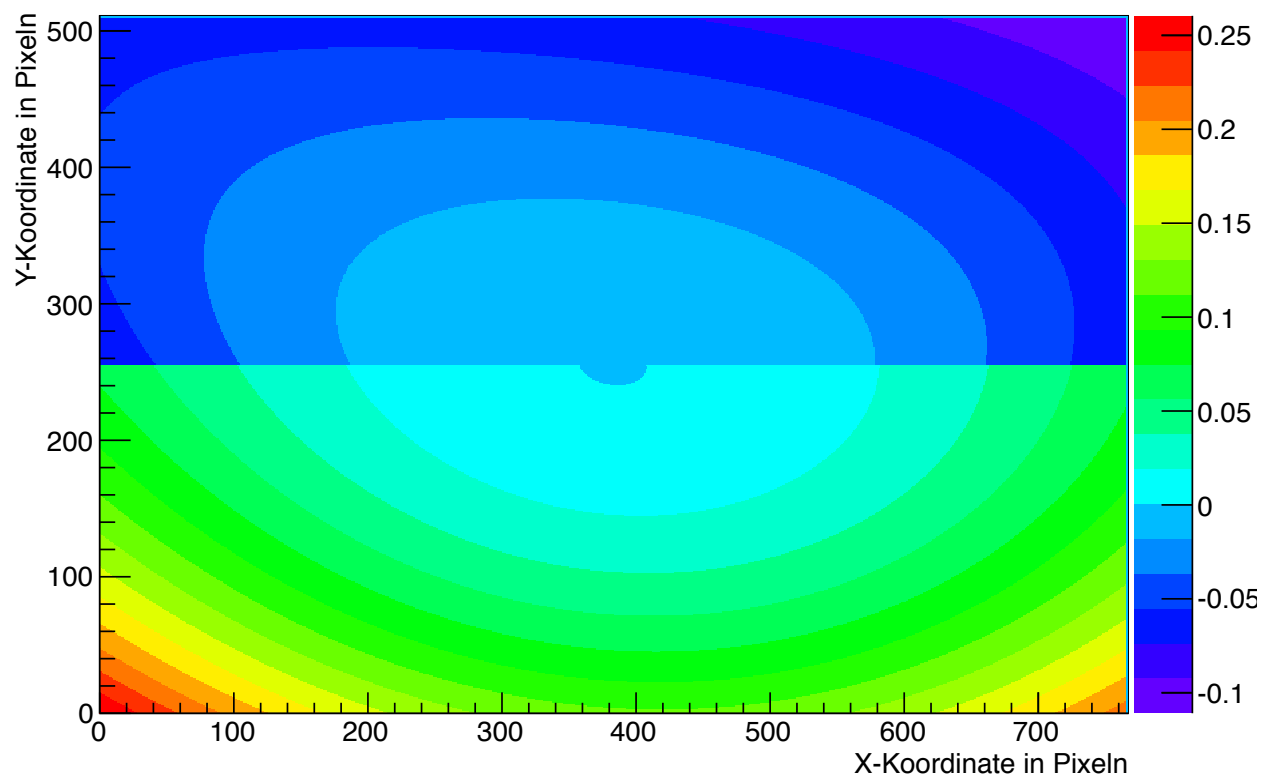
$$x' = \frac{u - c_x}{f_x}$$

$$y' = \frac{v - c_y}{f_y}$$

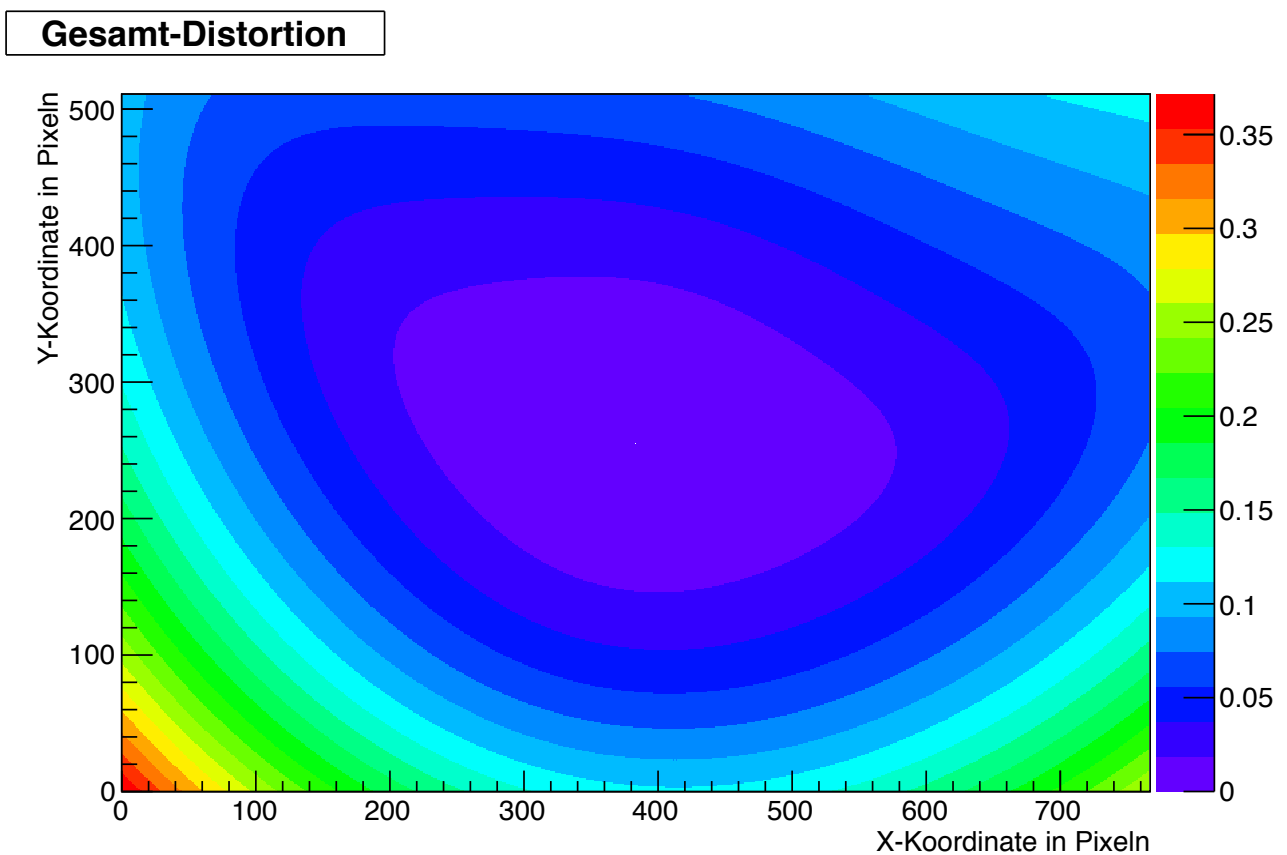
Die Koordinaten für diese Punkte lagen wie erwartet in der Größenordnung von  $10^{-2}$ . Die so berechneten  $(x', y')$  wurden in die im Abschnitt 4.1 eingeführten Formel (4.1) eingesetzt, um die durch Verzerrung entstehenden Koordinaten  $(x'', y'')$  zu erhalten. Die Differenz  $\Delta x = xx'$  bzw.  $\Delta y = yy'$  wurde anschließend wieder mit der Fokallängen  $f_x$  bzw.  $f_y$  multipliziert, um die Verschiebung in Pixeln zu erhalten. Diese wurde für jedes Pixel einzeln berechnet und in die Karte eingezeichnet. Die durch die Verzerrung zustande kommende Koordinaten-Verschiebung in x-Richtung ist in Abb. 4.15 zu sehen, die Verschiebung in y Richtung in Abb. 4.16. Die Verschiebung in y-Richtung ist bei positivem Abstand zum Zentrum negativ, bei negativem positiv. Die Punkte werden also immer zum Zentrum hin verschoben. Man erkennt hier primär eine radiale Verschiebung. Die Verschiebung in x-Richtung dagegen ist nicht so einfach zu erklären, hier spielt auch die tangentiale Verschiebung eine große Rolle. Um ein Maß für die Gesamtverzerrung zu haben, wurde der Betrag  $\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$  der absoluten Verschiebung gebildet und in Abb. 4.17 dargestellt. Dabei geht allerdings die Information über die Richtung der Verschiebung verloren,  $r$  ist immer positiv. Hier zeigt sich, dass die Verschiebung in etwa radialsymmetrisch ist und mit größerem Abstand zum Zentrum zunimmt, allerdings ist sie durch den tangentialen Anteil verformt. Die Gesamt-Verschiebung liegt selbst an den Stellen starker Verschiebung noch in der Größenordnung von  $10^{-1}$  Pixeln, die Verzerrung der CCD-Kamera wirkt sich also nicht sichtbar auf das Bild aus. Deshalb konnten auch keine Unterschiede zwischen verzerrungsfreier Darstellung und Originalbild beobachtet werden, weshalb auf eine Gegenüberstellung der beiden hier verzichtet wird.

**X-Distortion**

**Abbildung 4.15:** Verschiebung der Koordinate jedes Pixels in  $x$ -Richtung ist farbig dargestellt. Die Bedeutung der Farben in Pixeln ist in der Legende rechts zu sehen. Positive Werte meinen eine Verschiebung entlang der  $x$ -Achse, also nach rechts, negative Werte in die entgegengesetzte Richtung.

**Y-Distortion**

**Abbildung 4.16:** Verschiebung der Koordinate jedes Pixels in  $y$ -Richtung ist farbig dargestellt. Die Bedeutung der Farben in Pixeln ist in der Legende rechts zu sehen. Positive Werte meinen eine Verschiebung entlang der  $y$ -Achse, also nach oben, negative in die entgegengesetzte Richtung.



**Abbildung 4.17:** Betrag der Verschiebung  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  jedes Pixels ist farbig dargestellt. Die Bedeutung der Farben in Pixeln ist rechts zu sehen.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine Alta F1 CCD-Kamera von Apogee in Betrieb genommen und näher charakterisiert. Dazu wurden zuerst Bias Level und Dunkelstrom festgestellt, der lineare Zusammenhang zwischen Lichtmenge und Ladung überprüft und die Abhängigkeit des Rauschens von der Temperatur untersucht. Dann wurde mit Hilfe des Open Source Programmes OpenCV eine Möglichkeit entwickelt, mithilfe eines bekannten Schachbrettmusters die Kamera so zu kalibrieren, dass aufgenommene Bilder verzerrungsfrei dargestellt werden können. Das Programm kann dazu sowohl die Fokallänge der Kamera als auch die Koordinate des Bildmittelpunktes feststellen und außerdem die Verzerrungskoeffizienten berechnen, die für radiale und tangential Verzeichnung verantwortlich sind. Es wurde festgestellt, dass die Kalibrierung unabhängig von der verwendeten Blende ist; dazu wurden 7 Messreihen zur Kalibrierung durchgeführt. Aus den Mittelwerten der durch die Kalibrierung bestimmten Parametern wurden Karten erstellt, die die Verschiebung jeder Pixelkoordinate durch Verzeichnung farbig repräsentieren. Alle während dieser Arbeit entstandenen Programme, speziell die zur Kalibrierung notwendigen Programme **CCDCalibrationImages**, **OpenCVImagelist** sowie **OpenCVCalibration** stehen zur weiteren Bearbeitung bzw. Verwendung zur Verfügung und können in der Zukunft genutzt werden, um ein Kalibrierungsverfahren für jede im Hess-Experiment verwendete CCD-Kamera zu ermöglichen.

Aufgrund der begrenzten Zeit zur Anfertigung dieser Arbeit wurden verschiedene Optimierungen nicht durchgeführt, durch die die Kalibrierung noch bessere Ergebnisse liefern könnte. Zum einen wurde das Schachbrett per Hand gehalten, um seine Position vor der Kamera schnell verändern zu können. Durch eine mechanische Vorrichtung mit festen Positionen wäre dies präziser möglich, der zur Verfügung stehende Bildausschnitt wäre somit optimal ausnutzbar, außerdem würde das Verwackeln mancher Bilder verhindert werden. Ferner könnten durch eine Automatisierung des Verfahrens zur Aufnahme von Kalibrierungsbildern wesentlich mehr Bilder in einer Meßreihe aufgenommen werden, wodurch sich der statistische Fehler der Kalibrierung weiter reduzieren ließe. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bietet das Schachbrettmuster an sich. In dieser Bachelorarbeit wurde das Schachbrettmuster auf ein Blatt Papier gedruckt, welches auf eine stabile Holzplatte geklebt wurde, um Verformungen des Musters zu vermeiden. Trotzdem entstehen beim Aufkleben kleine Unebenheiten, die die Messung verfälschen. Drucken des Musters direkt auf Holz bzw. ein stabiles Metallblech würde dem Abhilfe schaffen. Je mehr Felder das verwendete Schachbrett aufweist, desto mehr Punkte stehen in jedem aufgenommenen Bild zur Verfügung und desto genauer wird die Kalibrierung. Auch die Kalibrierung mit komplett anderen Mustern, beispielsweise Anordnungen von schwarzen Punkten auf einer weißen Fläche, ist mit OpenCV möglich. Wie bereits erwähnt, wurden auch die Möglichkeiten zur Kühlung der CCD-Kamera nicht voll ausgeschöpft, die das elektronische Rauschen des Ausleseverstärkers sowie den Dunkelstrom reduzieren könnten. Schließlich könnte die Beleuchtung im Raum



optimiert werden, damit das Muster in jeder Position optimal ausgeleuchtet ist, um die Position der Imagepoints noch genauer bestimmen zu können.

Hoffentlich können die im Zuge dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse zur der verwendeten Kamera und zur Kalibrierung von Kameras mit OpenCV im Allgemeinen weiter verwendet werden, um die Daten des HESS-Experiments noch genauer interpretieren zu können.

Ich danke meinem Betreuer Prof. Christopher van Eldik für die gute Betreuung während dieser Bachelorarbeit.

# Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/telescopes/>
- [2] Private Mitteilung von Prof. Dr. Christopher van Eldik
- [3] F. Aharonian et al., *Observations of the Crab nebula with HESS. Astron. & Astrophys.* 457 (2006) 899-915
- [4] J. A. Hinton and W. Hofmann *Teraelectronvolt Astronomy. Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 2009, 47:523–65
- [5] Steve B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy, Second Edition. Cambridge University Press, 2006*
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>
- [7] [http://www.ccd.com/alta\\_f1.html](http://www.ccd.com/alta_f1.html)
- [8] <http://root.cern.ch/drupal/>
- [9] [http://opencv.itseez.com/trunk/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.h](http://opencv.itseez.com/trunk/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.h)
- [10] „Brown-Conrad-Model“ D.C. Brown, *Photometric Engineering* 32, 444 (1966)
- [11] Z. Zhang., *A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330-1334, 2000
- [12] J.Y.Bouguet., *MATLAB calibration tool. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\_doc/*
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/OpenCV>
- [14] <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>
- [15] [http://opencv.itseez.com/trunk/modules/imgproc/doc/feature\\_detection.html](http://opencv.itseez.com/trunk/modules/imgproc/doc/feature_detection.html)

# Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen,

01.10.2012