

Charakterisierung einer astronomischen CCD-Kamera im Rahmen des CTA-Projekts

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von
Andreas Specovius
am 05.08.2014

Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP)
Gruppe CTA
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Erstgutachter: Prof. Dr. C. van Eldik
Zweitgutachter: Prof. Dr. G. Anton

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Charge-Coupled Device (CCD)	3
3 Verwendete Hard- und Software	5
3.1 Die CCD-Kamera	5
3.2 Das Objektiv	6
3.3 Ansteuerung	7
4 Vermessung physikalischer Eigenschaften der Kamera	8
4.1 Kühlverhalten	8
Temperaturansteuerung	8
Temperaturstabilität	8
Absolute Temperaturansteuerung	11
4.2 Temperaturabhängiger Dunkelstrom	11
Bias- und Dunkelbild	12
Dunkelstrom	14
Optimale CCD-Chip-Temperatur	14
4.3 Auswirkungen der Belichtungszeit	15
Dunkelstrom	15
Helligkeit	16
4.4 Auswirkungen der Blende	20
Grundlagen	20
Messung	21
4.5 Bildartefakte	22
Das Biasbild	22
Das Dunkelbild	26
5 Bilder vom Sternenhimmel über Erlangen	29
5.1 Grundlagen	29
Belichtungszeit und Blendeneinstellung	
astronomischer Aufnahmen	29
Datenanalyse mit Astrometry.net	30
Das äquatoriale Koordinatensystem	30
5.2 Anwendung	31

INHALTSVERZEICHNIS

Datennahme	31
Bilder	31
Auswertung	32
6 Zusammenfassung und Ausblick	37
Literaturverzeichnis	39
Anhang	42
A. Datenblätter Apogee Aspen G07 CCD-Kamera	42
B. Datenblatt Nikon AF Nikkor 85mm f/1.8D	43
C. Datenblatt Nikon AF Nikkor 50mm f/1.8D	43
D. Datenblatt LED-5-14000W/75°	44

1 Einleitung

Die genaue Herkunft kosmischer Strahlung ist noch immer Gegenstand aktueller Forschung. Typische Energien dieser Strahlung liegen im Bereich von TeV. Da die Detektionsfläche für solche Energien relativ groß sein muss, kann man kosmische Strahlung nicht mit Hilfe von Satelliten detektieren. Stattdessen verwendet man Teleskope am Boden. Hier ist allerdings kein direkter Nachweis der kosmischen Strahlung möglich, da diese mit der Erdatmosphäre reagiert. Das Resultat dieser Reaktion, das sog. Tscherenkov-Licht, kann allerdings untersucht werden. Da die Flugrichtung der Photonen des Tscherenkov-Lichts direkt mit der Flugrichtung der erzeugenden kosmischen Strahlung zusammenhängt, lässt sich durch die Beobachtung des Tscherenkov-Lichts eine Aussage über den Herkunftsor der Strahlung treffen. Zur Rekonstruktion der Flugbahn der Strahlung müssen stereoskopische Aufnahmen des Tscherenkov-Lichts gemacht werden. Dazu ist ein zweidimensionales Array an Messstationen notwendig, wie es aktuell zum Beispiel beim H.E.S.S. Teleskop in Namibia zum Einsatz kommt (siehe Abb. 1.1).

Diese Einrichtung dient der Gammaastronomie im Hochenergiebereich von ca. 200 GeV bis hin zu einigen 10 TeV und geht unter anderem der Frage nach Ursprungsorten hochenergetischer kosmischer Strahlung nach (Aharonian et al. 2006).

Eine zukünftige Einrichtung, die der Suche nach sehr hochenergetischen kosmischen Strahlungsquellen nachgehen wird, ist das Cherenkov-Telescope-Array (CTA). Das aktuell noch in der Planung befindliche Projekt wird Gammastrahlung 5 bis 10 mal sensitiver und in einem größeren Energiebereich detektieren können als heutige Tscherenkov-Teleskope dazu in der Lage sind. Es soll einen Energiebereich von bestenfalls unter 100 GeV bis hin zu 100 TeV abdecken (Actis et al. 2011).

CTA wird im Wesentlichen drei verschiedene Teleskoptypen beinhalten. Wenige Niederenergieteleskope mit einem Durchmesser von 24 m und einem Gesichtsfeld von 4–5°, Mittelenergieteleskope für den Energiebereich 100 GeV–10 TeV mit einem Durchmesser von 12 m und einem Gesichtsfeld von 6–8° und viele Hochenergiete-



Abb. 1.1: H.E.S.S. Teleskop-Array in Namibia (Medina 2012).

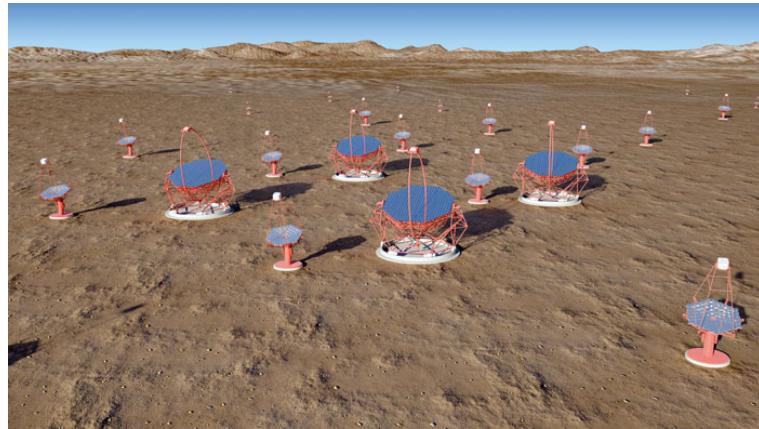


Abb. 1.2: Modell des Cherenkov-Telescope-Arrays (Nolan 2012).

skope für den Energiebereich >10 TeV mit einem Durchmesser von 6 m und einem Gesichtsfeld von 10° sollen verbaut werden. Das Ausmaß des CTA-Projekts schwankt je nach Modell aktuell zwischen 50 und 100 Teleskopen (Actis et al. 2011).

Um die Position einer Gammastrahlungsquelle genau bestimmen zu können, ist es wichtig, die exakte Blickrichtung, das sog. Pointing des Teleskops, zu kennen. Beim H.E.S.S. Teleskop wird das Pointing durch zwei, in die Teleskopschüssel integrierte, CCD-Kameras bestimmt. Die sogenannte Sky-CCD-Kamera befindet sich zwischen Mittelpunkt und Rand der Teleskopschüssel und dient zur Beobachtung des Himmels. Durch einen Vergleich der aufgenommenen Bilder mit Sternenkatalogen kann die Blickrichtung des Teleskops ermittelt werden. Die zweite CCD-Kamera, die sog. Lid-CCD, sitzt genau in der Mitte der Teleskopschüssel und blickt auf die Tscherenkov-Kamera¹. Mit Hilfe dieser zweiten Kamera kann man die durch gravitationsbedingte Verformung des Teleskops verursachte Abweichung von der eigentlichen Blickrichtung korrigieren (Lennarz 2012).

Für das CTA-Projekt wird angedacht, eine ähnliche Pointing-Technik anzuwenden. Dabei wird getestet, ob nur eine Kamera, die zugleich Himmel und Tscherenkov-Kamera beobachtet, ausreicht, um vergleichbares Pointing durchzuführen. Für H.E.S.S. wurde diese Technik bereits getestet (Lennarz 2012). Dazu ist es wichtig, die Eigenschaften der verwendeten CCD-Kamera genau zu kennen.

Im Laufe dieser Arbeit soll daher die astronomische CCD-Kamera Aspen vom Hersteller Apogee auf technische Eigenschaften und Einsetzbarkeit im Rahmen des Pointings für das CTA getestet werden.

¹Im Fokuspunkt der Spiegel des Teleskops befindlicher Photomultiplier mit Ausleseelektronik.

2 Charge-Coupled Device (CCD)

Zu Beginn soll die Funktionsweise einer CCD-Kamera erläutert werden.

Hauptbestandteile einer CCD-Kamera sind ein fokussierendes Linsensystem und ein Bildsensor, der sog. CCD-Chip. Der CCD-Chip besteht aus einem Array an Bildpunkten, deren Funktionsweise der einer Photodiode ähnelt. Jeder Bildpunkt entspricht dabei einem Pixel des resultierenden Bildes. Treffen Photonen bestimmter Energie auf einen Pixel des Bildsensors, erzeugen sie über den inneren photoelektrischen Effekt Elektron-Loch-Paare. Dabei werden Elektronen der Atome aus dem Valenzband ins Leitungsband gehoben. Diese Elektronen werden anschließend verschoben, da sie sonst nach kurzer Zeit zurück aufs Valenzband fallen und rekombinieren würden. Dazu besitzt jeder Pixel mehrere sog. Gates, in denen die gelösten Elektronen in Potentialen gefangen und bis zum Ende der Belichtungszeit (Integrationszeit) gehalten werden. Anschließend werden die Potentiale so verändert, dass die angehäuften Ladungen zueinander parallel in Ausleserichtung von Pixel zu Pixel zum Ausleseregister am Rand des CCD-Chips rutschen¹ (Ablaufschema siehe Abb. 2.1). Dort gelangen sie in das Ausleseregister. Bevor die nächsten Pixel ins Ausleseregister geschoben werden können, muss dieses erst geleert werden. Dazu werden die hier gespeicherten Ladungen nach gleichem Prinzip wie vorher Pixel für Pixel an den Ausleseverstärker weiter gebracht. Der Ausleseverstärker generiert für jeden Pixel je nach gespeicherter Ladung eine Spannung. Diese wird mittels eines Analog-zu-Digital Konverters in eine Zahl umgewandelt, die man Counts nennt. Welche Spannung bzw. wie viele Elektronen benötigt werden, um eine Zählrate von 1 Count zu erzeugen ist durch den sog. Gain festgelegt (Howell 2006, S. 9 ff.).

Der ganze Ablauf ist nicht ohne Verluste. So wird zum Beispiel nicht jedes ankommende Photon in ein Elektron umgesetzt. Der Anteil an umgesetzten Photonen nennt sich Quanteneffizienz (QE). Diese variiert je nach Bauart des CCD-Chips. Die höchste QE erreicht man mit sog. *back-side illuminated* CCD-Chips. Dabei trifft

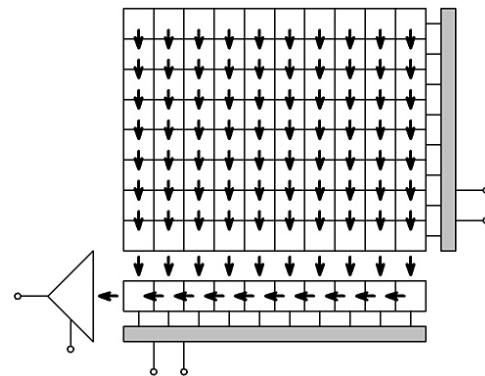


Abb. 2.1: Transport gespeicherter Ladung während des Auslesevorgangs von Bildpunkt zu Bildpunkt ins Ausleseregister und schließlich in den Ausleseverstärker (Obrazu 2011).

¹Transport der Ladungen von Bildpunkt zu Bildpunkt nur bei full-frame und frame-transfer CCDs. Im Gegensatz dazu bieten interline-transfer CCDs eigene Transportpixel am CCD-Chip.

fen ankommende Photonen von hinten² direkt auf den Halbleiter. Bei der gängigeren Bauweise *front-side illuminated* müssen die Photonen erst Elektroden und Isolationsschicht passieren, bevor sie auf den eigentlichen Halbleiter treffen. Dadurch kommt es zu Absorptionen und die Empfindlichkeit des CCD-Chips sinkt (Howell 2006, S. 16 f.). Man kann jedoch nicht direkt darauf schließen, dass *back-side illuminated* CCDs grundsätzlich besser sind. Bei ihnen können sich andere Nachteile ergeben, wie zum Beispiel ein größeres Rauschen.

Des Weiteren kann Ladung während des Auslesens beim Transport von Pixel zu Pixel verloren gehen. Die Effizienz des Transportvorgangs nennt sich charge-transfer efficiency (CTE) und liegt bei aktuellen CCD-Chips bei ca. 99.9999 % (Howell 2006, S. 10 f.).

Bei CCD-Kameras unterscheidet man zwischen verschiedenen Bildmodi.

Als **Biasbild** bezeichnet man in der CCD-Kameratechnik eine Aufnahme bei geschlossenem Shutter mit minimaler Integrationszeit (Belichtungszeit). Anhand dieses Bildes lassen sich Aussagen über den Offset der Pixeldaten (Bias-Level) und das Rauschen des Auslesemechanismus des CCD-Chips treffen (Howell 2006, S. 78). Der Bias-Level wird benötigt, damit beim Auslesen des Chips keine negativen Spannungswerte auftreten. Er wird in Form einer kleinen Spannung am Ende des Ausleseregisters hinzugefügt.

Als **Dunkelbild** bezeichnet man eine Aufnahme bei geschlossenem Shutter mit einer Integrationszeit, die der eigentlichen Belichtungsaufnahme entspricht. Dunkelbilder geben Auskunft über das thermische Rauschen bzw. den generierten Dunkelstrom. Sie werden verwendet, um die Belichtungsaufnahmen zu bereinigen (Howell 2006, S. 78 f.).

Als **Belichtung** bezeichnet man die Aufnahme eines Objektes bei geöffnetem Shutter mit einer Belichtungszeit von wenigen hundertstel Sekunden bis hin zu mehreren Minuten (Howell 2006, S. 79).

Nach dieser Einführung in die allgemeine Funktionsweise von CCD-Kameras wird im folgenden Kapitel explizit auf die verwendete Kamera eingegangen.

²Rückseite des CCD-Chips. Auf der Vorderseite befinden sich die Elektroden der Gates.

3 Verwendete Hard- und Software

3.1 Die CCD-Kamera

Die getestete CCD-Kamera *Aspen* ist vom Hersteller *Apogee Imaging Systems*. Als Bildsensor wird der CCD-Chip *KAF-8300* von Kodak verwendet. Er ist vom Typ *full-frame¹ mono² microlensed³* und hat eine Bittiefe von 16 bit. Seine Bauart ist *front-side illuminated* (QE für diesen Chip siehe Abb. 3.1). Die Auflösung beträgt 3326x2504 Pixel. Wie fast alle modernen CCD-Chips ist auch der *KAF-8300* mit einem Blooming-Schutz ausgestattet. Dieser soll verhindern, dass Elektronen bei Sättigung eines Pixels von diesem in benachbarte Pixel überlaufen. Jeder Pixel besitzt dazu Anti-Blooming-Gates, die Blooming bis zur tausendfachen Sättigung verhindern. Die Ausleserichtung, also die Richtung des Ladungstransports, ist beim *KAF-8300* in Richtung der Spalten zur unteren⁴ Chip-Kante (Truesense imaging, inc. 2012). Die minimale Belichtungszeit beträgt bei dieser Kamera 100 ms. Biasbilder werden also mit dieser Integrationszeit aufgenommen.

Der Chip kann laut Hersteller mittels einer elektronischen aktiven Kühlung auf Temperaturen bis zu 70 K unter Raum- bzw. Umgebungstemperatur gebracht werden. Dazu ist auf der Rückseite der Kamera ein quadratischer Kühlkörper mit Seitenlänge 11.5 cm angebracht. Die Abwärme wird mittels zweier dreistufig regelbarer Lüfter (Durchmesser 5.8 cm) abgeführt.

Zur Energieversorgung wird ein 50 W Anschluss mit 12 V DC benötigt. Im Lieferumfang der Kamera ist ein Netzteil mit diesen Ausgabespezifikationen auf 100-240 V AC (50-60 Hz) enthalten.

Angesteuert werden kann die Kamera mittels USB 2.0 und Ethernet. Die mittlere Ausleesezeit über USB 2.0 liegt bei 8856.95 ± 9.64 ms.

Datenblätter der Kamera befinden sich im Anhang A und auf der Website des Herstellers www.ccd.com.

Der in der Kamera verbaute Shutter (Typ MG58), der für seine lange Lebensdauer gepriesen wird, versagte gleich am Anfang dieser Arbeit seinen Dienst. Zu Beginn

¹Full-Frame Sensoren haben eine besonders gute Sensorflächennutzung, besitzen jedoch im Vergleich zu interline-transfer CCDs keine separaten Ladungstransportpixel zum Ausleseregister (AndorTechnology 2012).

²Schwarz-weiß

³Jeder Pixel besitzt eine eigene kleine Linse, die einfallendes Licht auf die Photodiode fokussiert.

⁴Chipseite, die bei horizontaler Aufstellung der Kamera mit Anschlusskabeln Richtung Boden näher dem Boden ist.

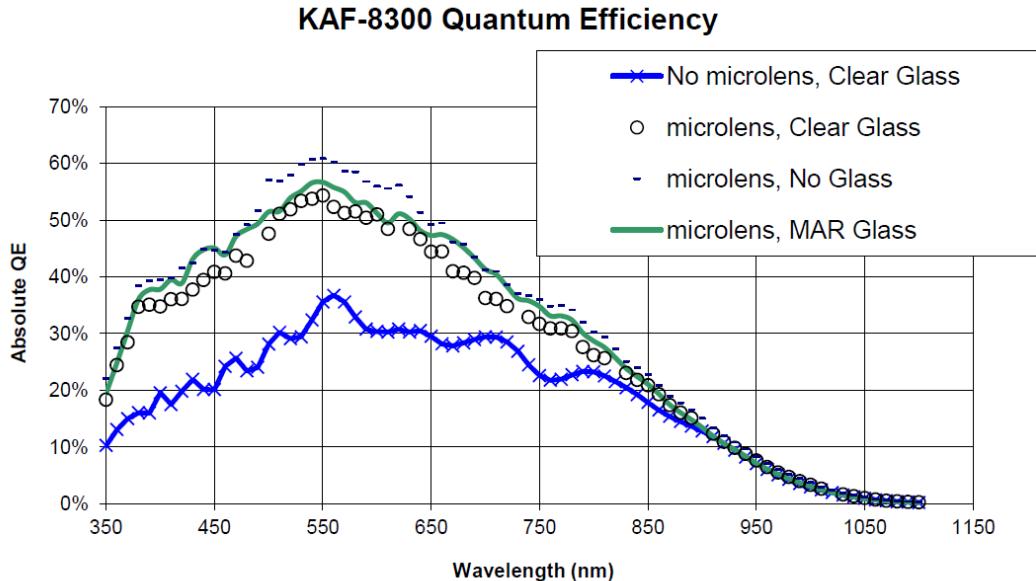


Abb. 3.1: Quanteneffizienz des KAF-8300 mono CCD-Chips (Truesense imaging, inc. 2012).

einer Belichtungsaufnahme öffnete er zuverlässig, verhielt sich beim Schließen jedoch äußerst unzuverlässig. Meist verblieb er nach einem hörbaren Klicken, was auf einen Schließversuch der Shuttermechanik hindeutet, im komplett geöffneten Zustand.

3.2 Das Objektiv

Für das in Kap. 4 beschriebene Vorgehen wird das Objektiv *AF Nikkor 85mm f/1.8D* vom Hersteller Nikon verwendet. Es besitzt eine Brennweite von 85 mm und einen Bildwinkel von $28^{\circ}30'$. Die Entfernungseinstellung kann zwischen 0.85 m und ∞ kontinuierlich und die Blendenöffnung zwischen f/16 und f/1.8 in sieben Stufen variiert werden. Das Datenblatt des Objektivs befindet sich im Anhang B.

Für die Aufnahmen des Sternenhimmels in Kap. 5 wird das Objektiv *AF Nikkor 50mm f/1.8D* vom Hersteller Nikon verwendet. Es besitzt eine Brennweite von 50 mm und einen, im Vergleich zum ersten Objektiv, etwas größeren Bildwinkel von $31^{\circ}30'$. Die Entfernungseinstellung kann zwischen 0.45 m und ∞ kontinuierlich und die Blendenöffnung zwischen f/22 und f/1.8 in acht Stufen variiert werden. Das Datenblatt des Objektivs befindet sich im Anhang C.

Die Entfernungseinstellung beider Objektive kann nicht auf Grundlage der aufgedruckten Skala getätigt werden. Der Adapter, mit dem das Objektiv auf das Kame-

ragehäuse geschraubt wird, bereitet einen zusätzlichen Abstand zwischen Linse und Bildsensor, der die Einschränkung verursacht.

3.3 Ansteuerung

Die Kamera konnte unter Linux mit dem mitgelieferten *Apogee Framework* (Version 3.0.3079-Ubuntu 12.04-x64) betrieben werden. Mit Hilfe des Frameworks konnten eigene C-Programme entwickelt werden, welche die Kamera komplett autonom ansteuerten. Damit konnten ganze Messreihen vom PC selbstständig aufgenommen werden.

Belichtungsaufnahmen sowie Dunkel- und Biasbilder wurden wahlweise als Binär- oder FITS-Datei gespeichert. Für letzteres wurde das Paket *cfitsio* (Version 3360) verwendet.

Die Auswertung aufgenommener Daten erfolgte mit den Analyse Frameworks *ROOT* (Version 5.34/18) bzw. *Astro ROOT* (Version 5.34/18).

Zur Auswertung von Himmelsaufnahmen wurde das Analyse Framework *Astrometry.net* (Version 0.46) herangezogen. Die Funktionsweise dieser Software wird in Kapitel 5.1 erläutert.

In Kapitel 4.3 wird eine weiße LED vom Typ LED-5-14000W/75° benutzt, um die Fehlfunktion des Shutters zu kompensieren. Den genauen Verwendungszweck der LED kann man Kapitel 4.3 entnehmen. Die LED wurde über das USB-Board *Velleman P8055-1* mit dem PC angesteuert. Das für das Board benötigte Softwarepaket war *libk8055* (Version 0.4.1).

Die Kamera wurde in dieser Arbeit nur über das USB-Interface angesteuert.

4 Vermessung physikalischer Eigenschaften der Kamera

Zunächst soll die Kamera anhand ihrer physikalischen Eigenschaften analysiert werden.

4.1 Kühlverhalten

Zu Beginn wird die CCD-Chip-Kühlung der Kamera getestet. Dieses ist besonders interessant, weil das Datenblatt zur Kamera dazu keine Angaben macht. Dabei wird auf die Ansteuerbarkeit eines Temperatursollwertes und dessen Konstanz über einen längeren Zeitraum eingegangen. Betrachtet wird nur die Kühlung von beliebiger Temperatur auf eine niedrigere, da ein Erhitzen des CCD-Chips in der Realität keine Anwendung findet. Im Idealfall sollte die gewünschte Temperatur rasch erreicht werden und anschließend konstant gehalten werden.

Um zugehörige Daten zu nehmen, bedarf es keines besonderen Versuchsaufbaus. Die Kamera wurde bei Raumtemperatur gelagert und über den PC gesteuert. Es wurden in separaten Messungen verschiedene CCD-Chip-Temperaturen angesteuert und der Verlauf der CCD-Chip-Temperatur protokolliert.

Temperaturansteuerung

Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft einen Kühlvorgang mit einer CCD-Chip-Anfangstemperatur von etwas unter 0°C und einem Sollwert von -20°C . Zu sehen ist das Ansprechen der aktiven Kühlung zu Beginn, die relativ konstante Kühlung im Anschluss und das Einpendeln der Temperatur um ihren Sollwert am Ende des Kühlvorgangs. Das Einpendeln der Temperatur ist zurückzuführen auf den elektronischen Regelkreis zur aktiven Kühlung des CCD-Chips und beansprucht ca. 8 Minuten. Die in allen Messungen erreichte maximale Kühlleistung des CCD-Chips betrug $-46.188 \pm 0.052 \text{ mK/s}$. Durchschnittlich kühlte sich der CCD-Chip im sinnvollen Arbeitsbereich mit $-31.902 \pm 0.133 \text{ mK/s}$ ab.

Temperaturstabilität

Anschließend wurde die Stabilität des CCD-Chip-Temperaturwertes bei einer Solltemperatur von -20°C über einen Zeitraum von fünf Tagen getestet. Abbildung 4.2

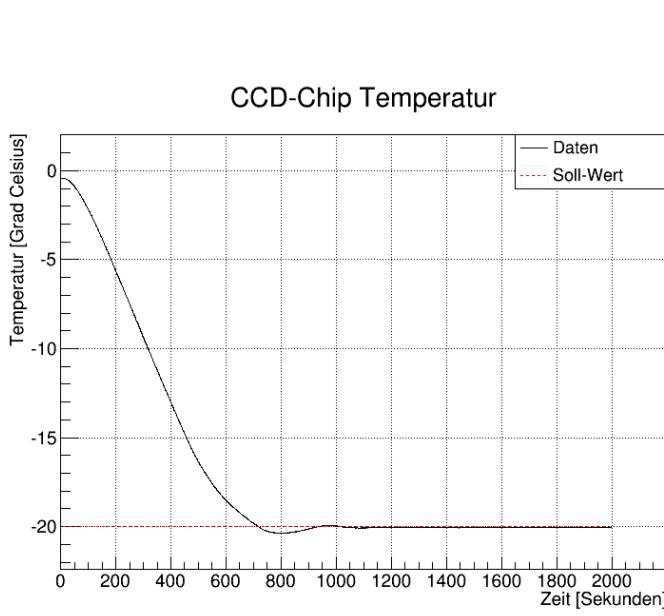


Abb. 4.1: Kühlvorgang von ca. 0°C auf -20°C . Zu sehen ist der Kühlvorgang inklusive Einpendeln der Temperatur um ihren Sollwert. Die Daten legen die Vermutung nahe, dass es sich bei der Kühlelektronik um einen PID-Regler^a handelt.

^aProportional-Integral-Differential-Regler: Regelkreis zur autonomen Ansteuerung eines Sollwerts einer physikalischen Größe.

zeigt die aufgenommenen Daten über der Zeit und Abbildung 4.3 zeigt die dazugehörige, zeitunabhängige Temperaturverteilung. Der vorangegangene Kühlvorgang inklusive Einpendeln ist aus allen Betrachtungen ausgeschlossen.

Nachts wird die CCD-Chip-Temperatur mit einem Offset von -0.04 K zum Temperatursollwert um die Temperatur $-20.04\text{ K} \pm 0.04\text{ mK}$ gehalten. Die Standardabweichung der Temperaturverteilung beträgt 9 mK . Eine mögliche Erklärung für den Offset ist, dass die Regelungstechnik die Kühlung verstärkt, sobald sich der CCD-Chip durch Erhitzung durch die umliegende Elektronik oder durch Umgebungswärme auf die Solltemperatur erwärmt, sodass von vornherein nur CCD-Chip-Temperaturen knapp unter dem Sollwert erreicht werden. Die CCD-Chip-Temperatur pendelt dann zwischen einer Temperatur, bei der die Regelungstechnik die Kühlung so stark zurückfährt, dass der CCD-Chip sich wieder erwärmt und dem Temperatursollwert. Dies würde auch die Verteilung der Temperaturwerte um ihren Mittelwert erklären. Eine andere mögliche Erklärung wäre ein Offset des Temperatursensors, der eine zu kleine Temperatur ausgibt oder ein Offset der Regelungstechnik an sich, die immer eine zu kleine Temperatur ansteuert. Der genannte Temperaturoffset ist allerdings so klein, dass seine Auswirkungen verschwindend gering sind und er vernachlässigt werden kann.

Jeden Tag um die Mittagszeit treten Abweichungen des Mittelwerts der CCD-Chip-Temperatur hin zu um 0.055 K wärmere Temperaturen auf. Zu der Zeit, als die Langzeitmessung aufgenommen wurde, war sonniges Wetter. Da der Arbeitsplatz, an

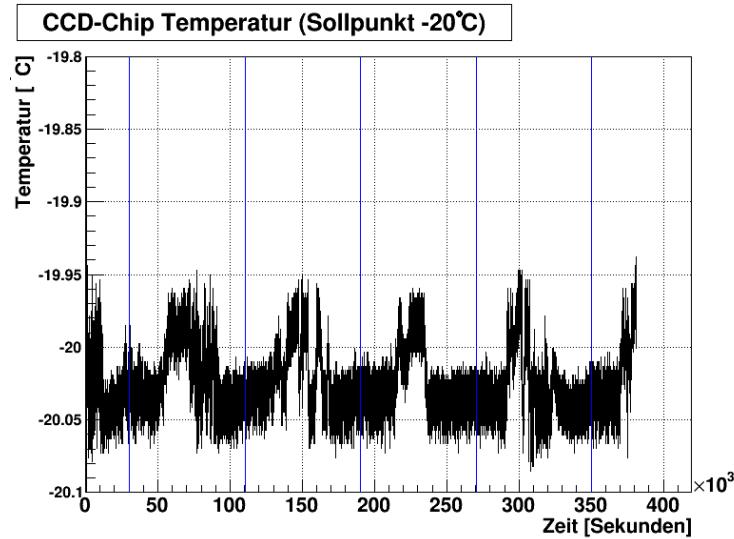


Abb. 4.2: Stabilität der CCD-Chip-Temperatur bei einem Sollwert von -20°C über einen Zeitraum von fünf Tagen (blau: jeweiliger Tageswechsel). Zu sehen ist eine Temperaturzunahme tagsüber ($+0.055\text{ K}$). Ursache sind Schwankungen der Umgebungstemperatur in Kombination mit mangelnder Kühlleistung.

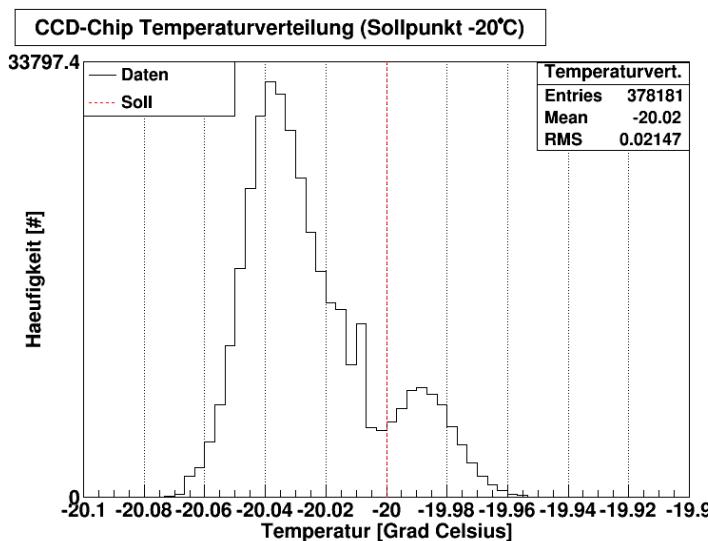


Abb. 4.3: Gemesse CCD-Chip-Temperaturverteilung bei einem Sollwert von -20°C über einen Zeitraum von fünf Tagen (linker Peak: nachts, rechter Peak: Abweichung tagsüber).

dem die Kamera während der Messung positioniert war, große Fenster hat, im zweiten Stock liegt und nach Nordosten ausgerichtet ist, schien vormittags und mittags die Sonne herein und erwärmt Kamera und Raumluft. Die Erhitzung des Kameragehäuses durch direkte Sonneneinstrahlung und Schwankungen der Umgebungstemperatur spiegeln sich in den aufgenommenen Langzeitdaten wieder. Dennoch sind die Abweichungen von der Grundtemperatur klein ($< 0.1\text{ K}$) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Messgenauigkeit der Kamera verschwindend gering.

Die Unschärfe der Temperaturdaten lässt sich zum Beispiel, wie bereits erwähnt, durch das Steuerverhalten der Regelungstechnik oder durch Messungenauigkeit des Temperatursensors erklären.

Absolute Temperaturansteuerung

Eine interessante Frage ist, ob die Kamera zur Umgebungstemperatur relativ kühl oder ob die Kühlung tatsächlich absolute Temperaturwerte ansteuert. Um dies zu klären, wurde eine der Langzeitmessung ähnliche Messung durchgeführt, bei der der CCD-Chip nicht gekühlt wurde. Es wurde also lediglich die Temperatur des ungekühlten CCD-Chips protokolliert. Das Wetter zu dieser Zeit war ähnlich dem der ursprünglichen Langzeitmessung. Daher sind beide Messungen annähernd vergleichbar.

Beim ungekühlten CCD-Chip wurde um die Mittagszeit eine Erhöhung der CCD-Chip-Temperatur um bis zu 3.1 K festgestellt. Vergleicht man diesen Wert mit der Temperaturerhöhung des gekühlten CCD-Chips bei ähnlichen Rahmenbedingungen von $< 0.1\text{ K}$ lässt sich daraus schließen, dass die Kühlung der Kamera keine zur Umgebungstemperatur relativen Temperaturen sondern absolute Temperaturwerte ansteuert.

4.2 Temperaturabhängiger Dunkelstrom

Dieses Kapitel widmet sich dem Dunkelstrom. Dieser kann, wenn er nicht berücksichtigt wird, Messergebnisse verfälschen. Bei einer CCD-Kamera führt Dunkelstrom zu Helligkeitswerten, die größer sind, als sie aufgrund der Helligkeit des fotografierten Motivs sein dürften. Außerdem trägt seine statistische Schwankung zum Bildrauschen bei. Dunkelstrom ist temperaturabhängig. Daher wird im folgenden Kapitel der Dunkelstrom des CCD-Chips bei verschiedenen CCD-Chip-Temperaturen vermessen und anschließend eine Empfehlung abgegeben, bei welcher Temperatur die Kamera zu betreiben ist, um bestmögliche Aufnahmen erhalten zu können.

In Schritten von 5 K wurden verschiedene CCD-Chip-Temperaturen von $+20\text{ }^\circ\text{C}$ bis $-30\text{ }^\circ\text{C}$ angesteuert und jeweils ein Biasbild und ein 60 s Dunkelbild gespeichert. Idealerweise sollte das Dunkelbild dem Biasbild entsprechen, da kein einziges Photon auf den CCD-Chip gelangen kann. Dunkelstrom führt jedoch zu höheren Zählraten im

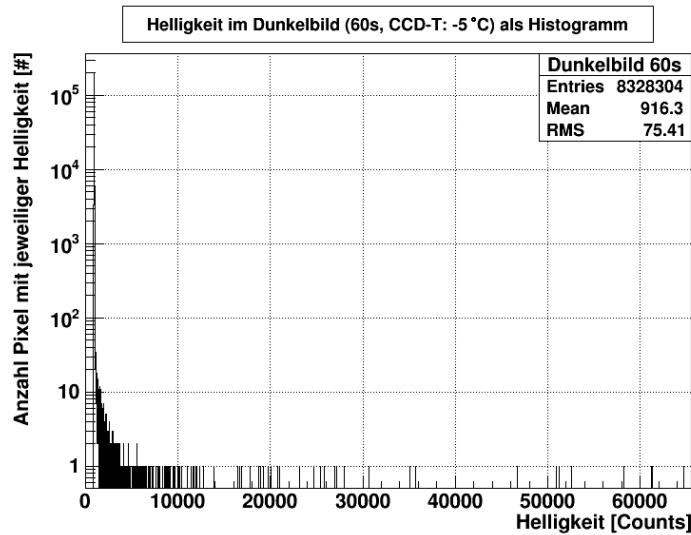


Abb. 4.4: Beispielhaftes Histogramm eines 60 s Dunkelbildes bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C . Zu sehen ist, wie oft unter allen 8 Millionen Pixeln welcher Helligkeitswert auftritt. Der für die Auswertung besonders interessante Median betrug für diese Messung 915.5 ± 0.009 Counts.

Dunkelbild. Den Dunkelstrom erhält man folglich aus der Differenz zwischen Dunkel- und Biasbild.

Die in jedem Bild enthaltenen Helligkeitswerte wurden in Histogrammen graphisch dargestellt (siehe dazu beispielhaft Abb. 4.4) und der dazugehörige Median der gemessenen Helligkeitswerte bestimmt. Da die Helligkeitsverteilung typischerweise diese spezielle Form besitzt, wurde bei der Auswertung der Median verwendet.

Bias- und Dunkelbild

Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des Helligkeitsmedians für Bias- und Dunkelbild in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Versatz vom Bias- zum Dunkelbild ist auf Dunkelstrom zurückzuführen.

Betrachtet man das Biasbild erwartet man keine Veränderung der mittleren Zählrate. Die Messung zeigt aber etwas Gegenteiliges. Die mittlere Helligkeit sinkt für kleinere werdende Temperaturen bis ca. 7.5°C und steigt dann wieder an. Der minimale Wert des Bias-Levels beträgt ca. 902 Counts. Der Median der Zählrate im Biasbild beträgt bei einer CCD-Chip-Temperatur von -35°C schätzungsweise 950 Counts. Die Angabe des Herstellers von 817 Counts, die für diese Temperatur gemacht wurde (siehe Anhang), kann somit nicht bestätigt werden.

Betrachtet man die Dunkelbildaufnahmen, erwartet man einen Verlauf, der ähn-

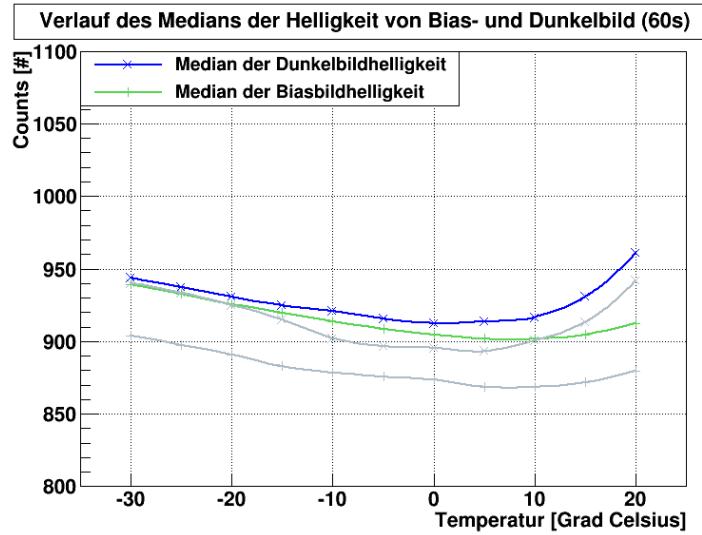


Abb. 4.5: Verlauf des Medians der Helligkeit von Bias- und Dunkelbild über der Temperatur. Fehler auf den jeweiligen Median liegen in der Region von $\mathcal{O}(0.01 \text{ Counts})$. Erkennbar ist ein Minimum der Zählrate im Bias- und Dunkelbild (farbig: aktuelle Messung; grau: frühere Messung).

lich dem des Biasbildes ist, jedoch mit einem gewissen Versatz aufgrund des Dunkelstroms. Für wärmere CCD-Chip-Temperaturen erwartet man einen größeren Dunkelstrom. Für das Dunkelbild erwartet man daher, dass der Versatz zum Biasbild für größer werdende CCD-Chip-Temperaturen zunimmt. Die Messung bestätigt diese Erwartung. Zur genaueren Analyse betrachtet man nur den Dunkelstrom (siehe folgendes Kapitel).

Bei einer früheren Messung von Bias- und Dunkelbild bei unterschiedlichen Temperaturen erhielt man ein etwas anderes Ergebnis. In Abbildung 4.5 ist dieses ebenfalls veranschaulicht. Der Unterschied zur aktuellen Messung liegt in der generell niedrigeren Zählrate der Biasbilder und in einem größeren Dunkelstrom. Darüber hinaus zeigt dieser ein unerwartetes Verhalten. Wie man dem Plot entnehmen kann, besitzt der Dunkelstrom ein Minimum bei -5°C CCD-Chip-Temperatur. Für größer und kleiner werdende Temperaturen nimmt er zu. Prinzipiell gleich ist jedoch die Tatsache, dass eine minimale Zählrate im Biasbild bei beiden Messungen bei $+10^\circ\text{C}$ erreicht wird. Da das Verhalten des Dunkelstroms jeder Erwartung widerspricht, nicht erklärt werden kann und nicht reproduziert werden konnte, wird von einer Fehlmessung aus gegangen. Daher wird diese frühere Messung lediglich erwähnt.

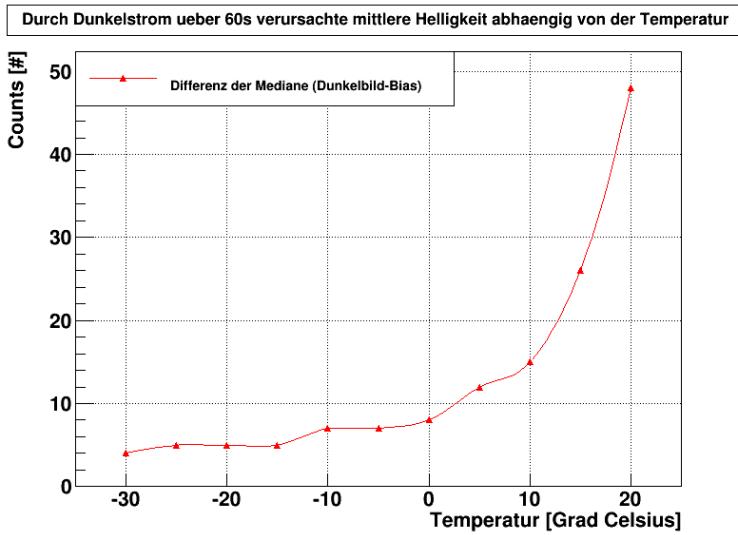


Abb. 4.6: Verlauf des Medians der über 60 s durch Dunkelstrom erzeugten Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Dunkelstrom sinkt für kleiner werdende Temperaturen stetig.

Dunkelstrom

Die Differenz von Dunkelbild und Biasbild führt zu dem in Abbildung 4.6 gezeigten Verlauf des Medians der durch Dunkelstrom über 60 s erzeugten Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Messung bestätigt eine Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms. Erwartungsgemäß sinkt die durch Dunkelstrom generierte Helligkeit mit der Temperatur.

Optimale CCD-Chip-Temperatur

Aus den gewonnenen Daten lässt sich nun eine Empfehlung abgeben, bei welcher CCD-Chip-Temperatur die Kamera am besten zu betreiben ist.

Die Argumentation, die zu nachfolgender Empfehlung geführt hat, stützt sich auf zwei Gesichtspunkte.

Erstens ist die pro Pixel speicherbare Ladungsmenge begrenzt. Die maximale Ladungsmenge pro Pixel entspricht einer Zählrate von 65535 Counts (16 Bit ADC). Eine größere Zählrate im Dunkelbild führt also zu einer geringeren messbaren Helligkeit des fotografierten Motivs und damit zu einem schlechteren Helligkeitskontrast. Die Zählrate im Dunkelbild sollte also minimal sein um bestmögliche Ergebnisse zu erhalten. Die mittlere Helligkeit im Dunkelbild ist der aktuellen Messung zufolge minimal bei einer CCD-Chip-Temperatur von $+5^{\circ}\text{C}$.

Zweitens trägt die statistische Schwankung des Dunkelstrom zum Bildrauschen bei. Dieser sollte daher ebenfalls minimal sein. Der Dunkelstrom besitzt im betrachteten Temperaturbereich bei einer CCD-Chip-Temperatur von -15°C die minimalste Ausprägung.

Da astronomische Kameras mit Belichtungszeiten von Sekunden bis hin zu mehreren Minuten arbeiten und eher dunkle Motive fotografieren, ist geringeres Bildrauschen wesentlich wichtiger als eine größere messbare Helligkeit des Motivs. Allerdings darf die Helligkeit der Sterne bei solch langen Belichtungszeiten nicht unterschätzt werden. Daher scheint die Wahl einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C sinnvoll zu sein. Die durch Dunkelstrom im gesamten Bild durchschnittlich generierte Zählrate ist hier gerade minimal erhöht (ca. $+2 \frac{\text{Counts}}{\text{s}}$) und die durchschnittliche Zählrate im Dunkelbild ist lediglich um ca. 3 Counts erhöht. Diese Aussage ist außerdem konsistent mit der in Kapitel 4.2 erwähnten früheren Messung von Bias- und Dunkelbild. Mit denselben Argumenten findet man dort ebenfalls eine für Anwendungen optimal geeignete CCD-Chip-Temperatur von -5°C .

Deshalb wurden alle folgenden Messungen bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C durchgeführt.

4.3 Auswirkungen der Belichtungszeit

Da man bei einer astronomischen Kamera Belichtungszeiten von mehreren Sekunden bis Minuten wählt, ist es wichtig zu wissen, wie Eigenschaften wie Dunkelstrom und gemessene Helligkeit mit der Belichtungszeit skalieren. Dieses Kapitel befasst sich mit der Untersuchung beider Eigenschaften.

Dazu wurden in zwei Messreihen für eine konstante CCD-Chip-Temperatur von -5°C mehrere Messungen mit Belichtungszeiten zwischen 0.5 s und 2 min und der engsten Blendeneinstellung $f/16$ aufgenommen. Pro Einzelmessung erhielt man ein Biasbild und ein Dunkelbild bzw. ein Dunkelbild und eine Belichtung mit jeweils identischer Belichtungszeit. Die Trennung der Messung in Dunkelstrom- und Helligkeitsmessung war aufgrund des fehlerhaften Shutters essentiell.

Dunkelstrom

Der Dunkelstrom in Abhängigkeit von der Belichtungszeit wird analog zu Kapitel 4.2 aus Bias- und Dunkelbild bestimmt. Während der gesamten Messung war der Shutter geschlossen.

Abbildung 4.7 zeigt den gemessenen Verlauf des Dunkelstroms in Abhängigkeit von der Belichtungszeit.

Da sich durch eine längere Belichtungszeit dementsprechend mehr Dunkelstromelektronen am CCD-Chip sammeln, erwartet man eine lineare Abhängigkeit des Dunkelstroms von der Belichtungszeit. Betrachtet man den gemessenen Dunkelstrom, sieht man diese Erwartung bestätigt. Die diskreten Helligkeitswerte, die bei kleinen Belichtungszeiten zu Abweichungen vom linearen Verhalten führen, sind auf zu kleine Helligkeitsunterschiede zwischen Dunkel- und Biasbild zurückzuführen. Für die

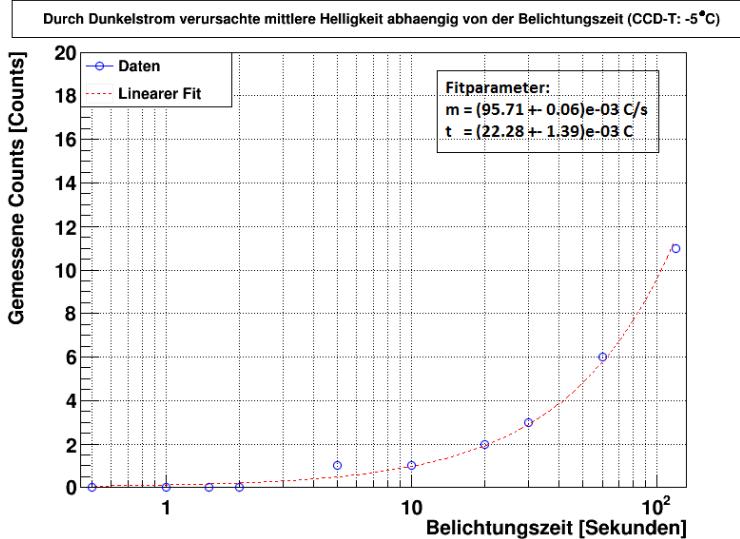


Abb. 4.7: Verlauf der durch Dunkelstrom generierten Zählrate in Abhängigkeit von der Belichtungszeit bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C . Jeder Datenpunkt repräsentiert den Median der dazugehörigen Helligkeitsverteilung. Der Fehler auf die Messdaten liegt in der Region von $\mathcal{O}(0.01 \text{ Counts})$. Erkennbar ist das lineare Verhalten des Dunkelstroms bzgl. der Belichtungszeit.

CCD-Chip-Temperatur -5°C ergibt sich im Bild eine mittlere, durch Dunkelstrom generierte Helligkeit von $(95.71 \pm 0.06) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Counts}}{\text{s}}$. Das ergibt einen durchschnittlichen pixelweisen Dunkelstrom von ca. $(239.28 \pm 0.15) \cdot 10^{-3} \text{ e/s}$. Der Hersteller gibt einen pixelweisen Dunkelstrom von $7 \cdot 10^{-3} \text{ e/s}$ an. Das entspricht ca. 3 % des gemessenen Wertes. Allerdings gilt diese Angabe für eine um 30 K kleinere CCD-Chip-Temperatur (-35°C).

Helligkeit

Wie bereits erwähnt, war der Shutter der Kamera zu dem Zeitpunkt der Messung fehlerhaft. Er schloss am Ende der Belichtungszeit nur teilweise bzw. gar nicht. Das erschwerte die Belichtung mit vorgegebener Belichtungszeit erheblich. Abhilfe wurde mit einem speziell angepassten Versuchsaufbau geschaffen, der in Abbildung 4.8 schematisch dargestellt ist. Die Kamera war im Aufbau auf ein weißes Blatt Din-A4 Papier ausgerichtet, das an einem 67 cm entfernten Schirm befestigt war. Dieses wurde ausschließlich während der planmäßigen Belichtungszeit mittels einer vom Computer über ein *Velleman P8055-1* USB-Board gesteuerten weißen LED des Typs LED-5-14000W/75° bestrahlt (Ansteuerung: $U = 2.54 \text{ V}$ mit $I = 1.2 \text{ mA}$, Datenblatt im Anhang). Die Abstrahlung der LED wurde mittels eines optischen Aufbaus bestehend aus zwei Linsen homogenisiert. Die angestrahlte Fläche war kreisrund, sodass die Ka-

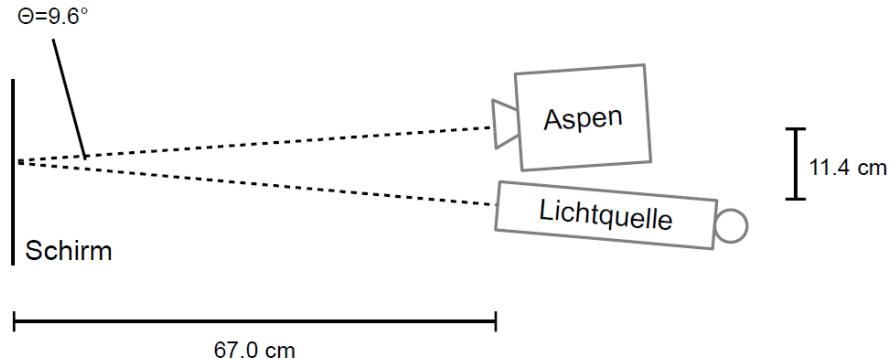


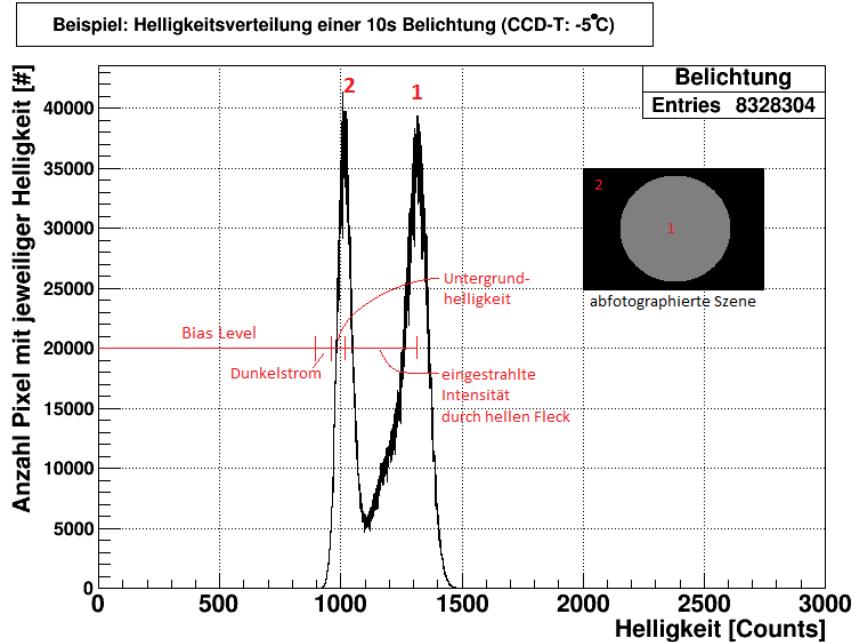
Abb. 4.8: Versuchsaufbau für die Helligkeitsmessung.

mera neben der erhellten Fläche auch den Untergrund aufnahm. Der gesamte Aufbau befand sich in einem fast vollständig abgedunkelten Raum. Dadurch konnte ein fehlgeschlagener Schließversuch des Shutters weitestgehend durch die Steuerung der LED kompensiert werden. Das manuelle Abdecken des Objektivs mit einem lichtundurchlässigen Material in der Zeit zwischen zwei Belichtungen und während der Aufnahme eines Dunkelbildes kam aufgrund der zeitlichen Ungenauigkeit des Verschluss- und Öffnungszeitpunktes nicht in Frage.

Um die Helligkeit des aufgenommenen hellen Kreises zu bestimmen, würde man normalerweise von der Belichtungsaufnahme das Dunkelbild subtrahieren. Damit wären jegliche von der Kamera selbst produzierten Zählraten aus der Aufnahme weitestgehend entfernt und man erhält ein Abbild der eingestrahlten Helligkeit. Da der Shutter aber durchwegs geöffnet blieb, entspricht das Dunkelbild eher einer Belichtungsaufnahme der dunklen, nicht erhellten Szene. Es enthält also neben Bias und Dunkelstrom zusätzlich die Resthelligkeit der Szene im Blickfeld der Kamera. Bestimmt man nun die gemessene Helligkeit, indem man von der Belichtung das Dunkelbild abzieht, erhält man in diesem Fall nicht die tatsächliche, sondern die um die Untergrundhelligkeit bereinigte Helligkeitsverteilung. Die Daten entsprechen also der Aufnahme eines erleuchteten Flecks in einem vollständig dunklen Umfeld. Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Belichtungszeit und gemessener Helligkeit ist dieser Umstand sogar förderlich.

Das aufgrund des fehlerhaften Shutters vor einer Messung eingestrahlte Licht hat keine Auswirkung auf den gesuchten Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und gemessener Helligkeit. Da dies zugleich Dunkelbild und Belichtung betraf und die Zeit zwischen zwei Messungen annähernd konstant blieb, wurde die zu dieser Zeit eingestrahlte Helligkeit durch Subtraktion des Dunkelbildes eliminiert.

Betrachtet man eine Belichtung der beschriebenen Szene im Histogramm, erkennt man zwei Peaks (siehe Abb. 4.9). Der linke Peak wurde durch Bias, Dunkelstrom



und Untergrundhelligkeit im Blickfeld der Kamera erzeugt. Er entspricht dem Dunkelbild. Der rechte Peak wurde durch Bias, Dunkelstrom, Untergrundhelligkeit und des vom hell erleuchteten Teil der Szene eingestrahlten Lichts erzeugt. Die Breite des Peaks ist auf eine zum Rand des Flecks hin abnehmende Helligkeit zurückzuführen (siehe Abb. 4.10). Für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Belichtungszeit und gemessener Helligkeit ist nur der Versatz vom ersten zum zweiten Peak von Belang. Diesen erhält man durch Subtraktion des Dunkelbildes von der Belichtung. Alle Helligkeitswerte wurden durch Gauß-Fits an die Peaks bestimmt.

Da durch eine längere Belichtungszeit dementsprechend mehr Photonen auf den CCD-Chip treffen können, erwartet man bei konstanter Helligkeit des Motivs eine lineare Abhängigkeit der gemessenen Helligkeit von der Belichtungszeit.

Abbildung 4.11 zeigt, wie die gemessene Helligkeit mit der Belichtungszeit skaliert. Man erkennt, dass der erwartete lineare Verlauf getroffen wird. Wie stark die Helligkeit mit der Belichtungszeit zunimmt, hängt von der Helligkeit der Aufnahme ab. Aus diesem Grund wird auf eine genaue Angabe dieser Information hier verzichtet.

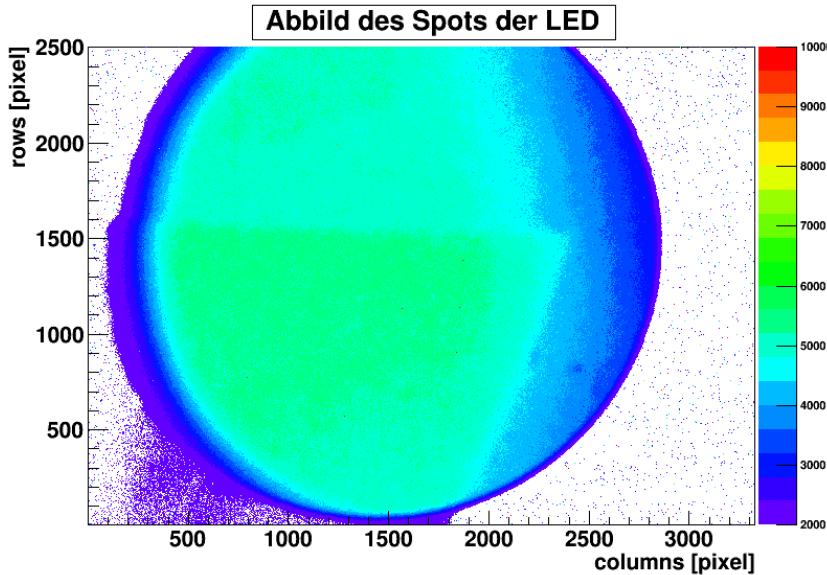


Abb. 4.10:
Abbild des fotografierten Spots. Erkennbar sind die gute Homogenität innerhalb des Spots und die Abnahme der Helligkeit in dessen Randregion.

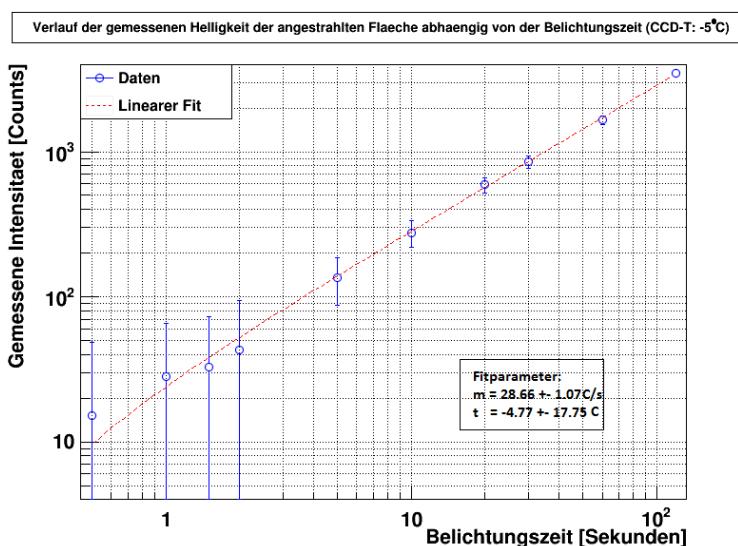


Abb. 4.11: Verlauf der gemessenen Helligkeit in Abhängigkeit von der Belichtungszeit bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C. Helligkeitswerte wurden durch Gauß-Fits an das jeweilige Histogramm bestimmt. Erkennbar ist das lineare Verhalten der gemessenen Helligkeit bzgl. der Belichtungszeit.

4.4 Auswirkungen der Blende

Ein weiterer Parameter, der zu unterschiedlichen gemessenen Helligkeiten desselben Objekts führt, ist die Blende des Objektivs der Kamera. Sie steuert, welche Lichtmenge des fotografierten Motivs auf den CCD-Chip gelangen kann. Die Auswirkung der Blendeneinstellung auf die gemessene Helligkeit wird im Folgenden untersucht. Darüber hinaus wird untersucht, wie man die Belichtungszeit bei Variation der Blendeneinstellung entsprechend skalieren kann, ohne dass sich die gemessenen Helligkeitswerte ändern.

Grundlagen

Das allgemeine Öffnungsverhältnis o einer Blende ist das Verhältnis aus wirksamer Öffnung D und Brennweite f .

$$o = \frac{D}{f} \quad (4.1)$$

Der Kehrwert des Öffnungsverhältnisses wird Blendenzahl k genannt.

$$o = \frac{1}{k} \quad (4.2)$$

Die Blendenzahl k ist somit eine reziproke Darstellung der wirksamen Öffnung D .

$$k = \frac{f}{D} \quad (4.3)$$

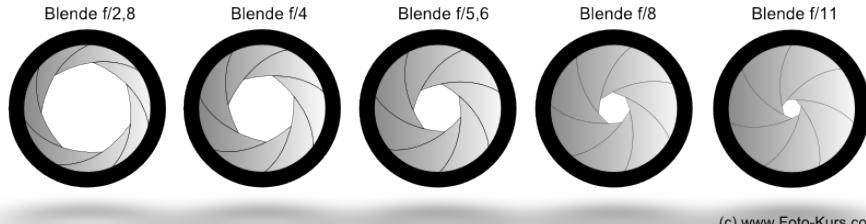
Die einfallende Lichtmenge ist proportional zur Blendeneöffnungsfläche. Da die Blende eine annähernd kreisförmige Fläche öffnet, erhält man mit $A_{\text{Kreis}} = \pi(\frac{D}{2})^2$ und Gleichung 4.3 den Zusammenhang 4.4, der gemessene Helligkeit I eines Motivs und Blendenzahl k direkt in Zusammenhang setzt.

$$I_{\text{gemessen}} \sim A_{\text{Blende}} = \frac{f^2}{4k^2} \pi \quad (4.4)$$

Eine größere Blendenzahl k steht also für eine kleinere Öffnungsfläche A und damit für eine geringere eingestrahlte Lichtmenge I (Hecht 2005, S. 290ff.) (siehe dazu Abb. 4.12).

Eine kleinere Blendenzahl k bei gegebener Referenzblende k_0 ermöglicht folglich eine Reduzierung der Belichtungszeit t_{neu} von gegebener Referenzzeit t_0 nach Gleichung 4.5 bei gleichbleibender gemessener Helligkeit.

$$t_{\text{neu}}(k) = t_0 \cdot \frac{A_0}{A(k)} = t_0 \cdot \left(\frac{k}{k_0}\right)^2 \quad (4.5)$$



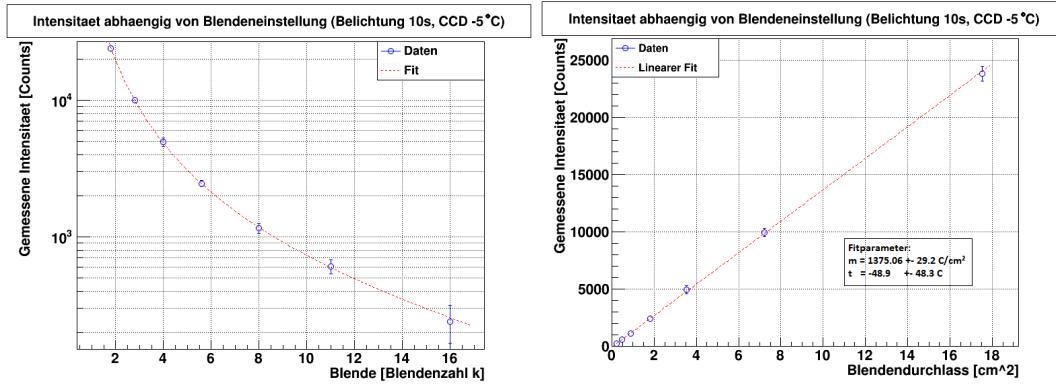
(c) www.Foto-Kurs.com

Abb. 4.12: Blendendurchlass und Blendenzahl (www.Foto Kurs.com 2014).

Messung

Der Aufbau zur Datennahme entsprach exakt dem, der bereits in Kapitel 4.3 ausführlich beschrieben wurde. Es wurde eine Belichtungszeit von 10s gewählt und der CCD-Chip auf -5°C gekühlt. Für jede Blendeneinstellung wurde ein Dunkelbild und eine Belichtung aufgenommen.

Die gemessene Helligkeit der angestrahlten Fläche bestimmt man analog zu Kapitel 4.3 aus Belichtung und Dunkelbild. Diese wurde anschließend mit der Blendeneinstellung in Zusammenhang gesetzt (siehe Abbildung 4.13).



Blendenzahl.

Blendendurchlass.

Abb. 4.13: Verlauf der gemessenen Helligkeit der angestrahlten Fläche in Abhängigkeit von Blendeneinstellung und -öffnung (Belichtungszeit 10s, CCD-Chip-Temperatur -5°C). Helligkeitswerte wurden durch Gauß-Fits an die jeweilige Helligkeitsverteilung bestimmt. Der Fit zeigt den in Gleichung 4.4 beschriebenen Zusammenhang von Blendenzahl und gemessener Helligkeit.

Die Messung bestätigt den in Gleichung 4.4 aufgestellten Zusammenhang zwischen Blendenzahl und gemessener Helligkeit (Abb. 4.13 links). Die beschriebene lineare

Abhängigkeit der gemessenen Helligkeit von der Öffnungsfläche der Blende ist damit im Prinzip schon bewiesen, lässt sich aber durch Reskalierung der x-Achse explizit veranschaulichen (Abb. 4.13 rechts).

4.5 Bildartefakte

Bei Aufnahmen von dunklen Motiven wie dem Nachthimmel muss man dem Rauschen des Bildes eine besondere Beachtung schenken. Die Bildqualität kann durch Rauschen massiv beeinträchtigt werden. Rauschen bedeutet hier eine zufällige Abweichung der Helligkeitswerte des aufgenommenen Bildes.

Bildrauschen ist ein statistischer Prozess und kann über viele Messungen weitestgehend eliminiert werden. Die Prozesse, die Bildrauschen erzeugen, sind jedoch systematischer Natur.

Um Rauschen in Belichtungsaufnahmen zu analysieren, genügt es Dunkelbilder zu betrachten. Der Betrag des Bildrauschens ist unabhängig vom gewählten Motiv und zeigt im Dunkelbild identisches Verhalten zu Belichtungsaufnahmen. Rauschen tritt auch in Biasbildern auf. Die Ursachen für Bildartefakte, systematische und statistische Chip-Effekte werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.

Das Biasbild

Das Biasbild enthält Bildartefakte sowie das Ausleserauschen (Readout-Noise). Dies wird im Folgenden näher betrachtet.

Im Biasbild ist nur der Bias-Level enthalten. Dieser ist normalerweise nur mit sehr kleinen Fehlern behaftet. Das Rauschen kommt folglich nicht durch den Bias-Level an sich. Die Umwandlung der Spannung im ADC in ein digitales Signal ist jedoch, wie jeder Messvorgang, fehlerbehaftet. Es wird mal mehr und mal weniger als das tatsächliche Signal gemessen. Da sich der Ursprung des Rauschens in der Ausleseelektronik befindet, nennt man diese Art des Rauschens Ausleserauschen.

Um Bildartefakte und Ausleserauschen zu analysieren, wurden 30 Biasbilder bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C aufgenommen. Den Median der Helligkeit jedes Biasbildes entnehme man Tabelle 4.1. Der Mittelwert der Helligkeit jedes einzelnen Pixels ist den Abbildungen 4.14 und 4.15 zu entnehmen.

Im Idealfall sollte das Biasbild an jeder Bildstelle die gleiche Zählrate zeigen bzw. die Abweichung von der mittleren Zählrate sehr klein sein.

Es zeigt sich, dass die mittlere Zählrate 905.75 ± 0.007 Counts beträgt. „Hot Pixel“ konnten im Biasbild nicht nachgewiesen werden. Dafür konnten zwei „Dead Pixel“ mit einer Zählrate von 0 Counts nachgewiesen werden. Diese befinden sich an der Position (r525,c733) und (r634,c2031). (Zeile,Spalte)

Man erkennt in einigen Spalten (siehe Marker in Abb. 4.14) eine relativ starke Abweichung von der durchschnittlichen Zählrate vom Rest des CCD-Chips, sog. „Hot

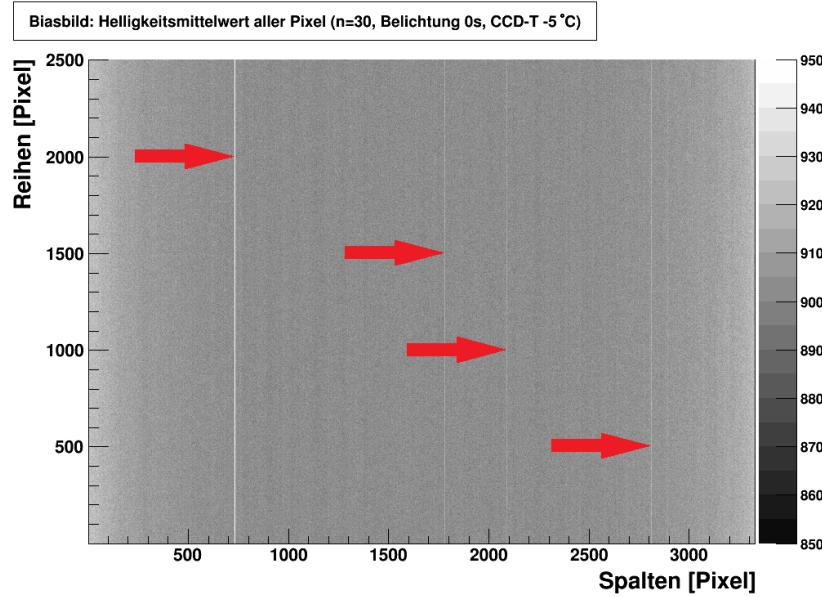


Abb. 4.14: Mittlerer gemessener Helligkeitswert für jeden Pixel über 30 Biasbilder. Marker weisen auf die vier Spalten mit der größten Abweichung von der durchschnittlichen Zählrate hin. Erkennbar ist auch die Zunahme der mittleren Zählrate am Rand des CCD-Chips.

$905.42 \pm 2.25 \cdot 10^{-6}$	$905.82 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.38 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$905.67 \pm 2.27 \cdot 10^{-6}$
$905.51 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$905.60 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.58 \pm 2.24 \cdot 10^{-6}$	$905.53 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.75 \pm 2.25 \cdot 10^{-6}$	$905.56 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.80 \pm 2.29 \cdot 10^{-6}$	$905.78 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.82 \pm 2.29 \cdot 10^{-6}$	$905.95 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.62 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$905.93 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.77 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$905.98 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.70 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$906.02 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.75 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$906.15 \pm 2.27 \cdot 10^{-6}$
$905.67 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$906.13 \pm 2.27 \cdot 10^{-6}$
$905.83 \pm 2.27 \cdot 10^{-6}$	$906.07 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.98 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$	$905.28 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$
$905.89 \pm 2.39 \cdot 10^{-6}$	$905.43 \pm 2.26 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.1: Median der Helligkeitsverteilung jedes Biasbildes in Counts.

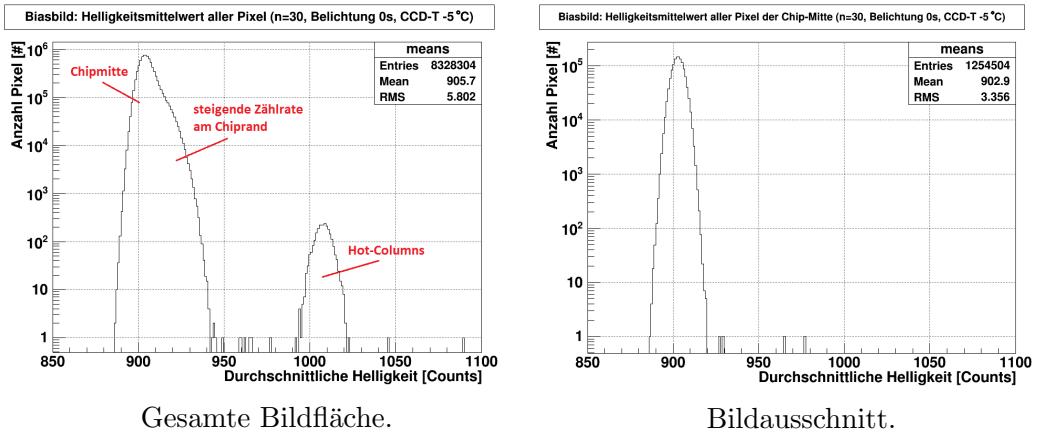


Abb. 4.15: Über 30 Biasbilder gemittelter Helligkeitswert jedes Pixels. Links über die gesamte Bildfläche und rechts ein Ausschnitt aus der Bildmitte (Spalte 1000 bis 1500).

Columns“. Zur weiteren Analyse werden die gemittelten Zählraten jedes Pixels reihenweise ihrer Spalte zugeordnet (siehe Abb. 4.16). So erhält man ein Abbild aller Zählraten, die pro Pixel des Ausleseregisters gelesen wurden.

Es zeigt sich, dass die mittlere Zählrate bei allen Pixeln der genannten Spalten tatsächlich über der Grundzährlrate liegt. Außerdem ist ersichtlich, dass es viele weitere Spalten mit überhöhter Zählrate gibt, die in Abb. 4.14 aufgrund zu geringer Auflösung nur sehr schwer erkennbar sind. Genaue Daten für die fünf Spalten mit der größten Abweichung vom Durchschnitt entnehme man Tabelle 4.2. Da die Abweichungen der Zählraten jeweils für eine gesamte Spalte auftreten und nicht nur bei einzelnen Pixeln der Spalte zu finden sind, wird von einem fehlerhaften Ladungstransport ins Ausleseregister ausgegangen. Wären Elemente des Ausleseregisters selbst defekt, würde das nicht nur einzelne Spalten, sondern auch alle Zeilen betreffen, da jede Zeile das Ausleseregister passieren muss.

Spaltennummer	Zählrate [Counts]
733	1007.4 ± 0.009 (111.2 %)
2031	923.7 ± 0.007 (102.0 %)
2811	916.6 ± 0.007 (101.2 %)
1780	915.1 ± 0.007 (101.0 %)
2090	911.7 ± 0.007 (100.7 %)
Durchschnitt aller Pixel	905.8 ± 0.007 (100.0 %)

Tab. 4.2: Von der Grundzährlrate abweichende Spalten aufgelistet nach der Zählrate.

Biasbild: Zählraten aller Reihen projiziert auf die Spalten.

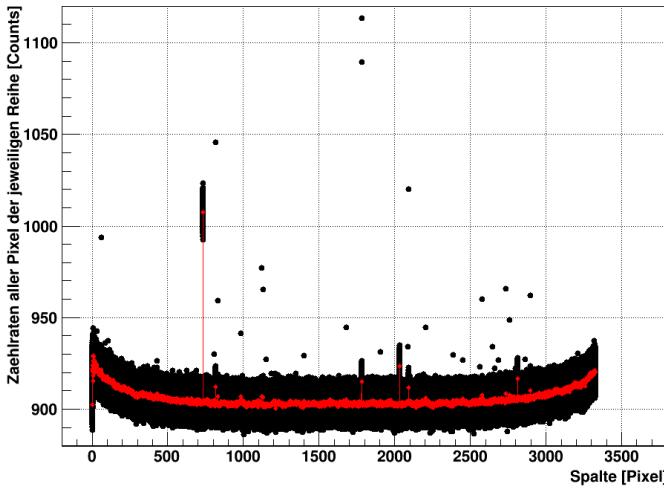


Abb. 4.16: Zuordnung aller Helligkeitswerte jeder Spalte zum jeweiligen Pixel des Ausleseregisters (schwarz: einzelne Pixel; rot: Mittelwert über alle Pixel pro Spalte). Gut erkennbar sind die Spalten, die eine erhöhte durchschnittliche Zählrate aufweisen.

Betrachtet man die am Rand des CCD-Chips liegenden Spalten, erkennt man eine Tendenz hin zu größeren Zählraten. Es zeigt sich hier eine maximale Überhöhung von bis zu 18 Counts über der Zählrate in der Region der Mitte des CCD-Chips. Eventuell ist dies auf den *Amplifier-Glow*-Effekt zurückzuführen. Der Ausleseverstärker wandelt Elektronen beim Auslesen des CCD-Chips in eine Spannung um, die dann weiterverarbeitet wird. Allerdings kann dies auch anders herum geschehen. Der Ausleseverstärker kann ebenso Licht emittieren. Bei langen Belichtungszeiten reicht das erzeugte Licht aus, um eine Erhöhung der Zählrate am CCD-Chip in der Region des Verstärkers zu verursachen. Allerdings tritt dieser Effekt typischerweise nur in einer Ecke des Chips auf. Daher ist fraglich, ob dieser Effekt wirklich für die, sich über die gesamte Länge beider Ränder des Chips erstreckende, Beobachtung verantwortlich ist (A. Cooper 2014).

Die am linken Rand um Spalte 1-50 auftretende Abnormalität vom sonst eindeutigen Verhalten kann nicht erklärt werden.

Konzentriert man sich auf die Chip-Mitte und schließt Hot-Columns und die zum Rand des CCD-Chips zunehmende Zählrate aus, so kann man direkt eine Aussage über das Ausleserauschen treffen. Dazu wird nicht mehr über die Helligkeit jedes Pixels gemittelt, sondern jedes Biasbild einzeln betrachtet. Es wird die Breite der Helligkeitsverteilung jedes einzelnen Biasbildes berechnet und anschließend der Mittelwert gebildet. Die gemittelte Breite der bereinigten Verteilungen beträgt 19.79 ± 0.05 Counts. Daraus ergibt sich ein Fehler auf den Bias-Level von 0.66 Counts, erzeugt durch Ausleserauschen.

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass das Biasbild im Vergleich zu Kapitel 4.2 eine um 2.8 Counts größere mittlere Zählrate aufweist.

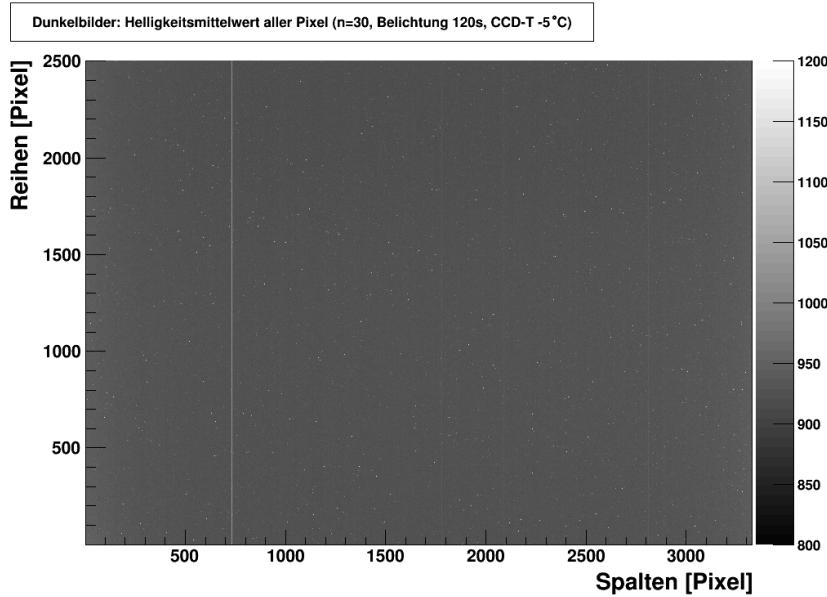


Abb. 4.17: Mittlerer gemessener Helligkeitswert für jeden Pixel über 30 Dunkelbilder. Neben den bereits genannten Hot-Columns sind einige, über den gesamten CCD-Chip verteilte, Hot-Pixel erkennbar.

Das Dunkelbild

Betrachtet man das Bildrauschen im Dunkelbild mit Kenntnis über das Ausleserauschen und die vorhandenen Bildartefakte, kann man auf die Bedeutung des Dunkelstromrauschens zurückschließen.

Die Abhängigkeit des Dunkelstroms von der Temperatur ist bekannt. Der Auslösevorgang von Dunkelstromelektronen ist jedoch ein statistischer Prozess.

Um das Bildrauschen im Dunkelbild zu analysieren, wurden 30 Dunkelbilder mit einer Belichtungszeit von 120s bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5°C aufgenommen. Den Median der Helligkeit jedes Dunkelbildes entnehme man Tabelle 4.3. Der Mittelwert der Helligkeit jedes einzelnen Pixels ist den Abbildungen 4.17 und 4.18 zu entnehmen.

Man erkennt im Dunkelbild die im vorigen Abschnitt beschriebenen Spalten erhöhter Zählrate. Außerdem zeigen sich einzelne „Hot-Pixel“ mit überdurchschnittlicher Zählrate verteilt über den gesamten CCD-Chip.

Die gemittelte Zählrate über alle 30 Dunkelbilder beträgt 928.48 ± 0.11 Counts.

Eine frühere Messung zeigte im Gegensatz zur obigen eine im oberen Bereich des Dunkelbildes weniger stark erhöhte Zählrate als im unteren Bereich. Wie bereits in Kapitel 4.2 gezeigt, ist der Dunkelstrom temperaturabhängig. Wahrscheinliche Ursachen

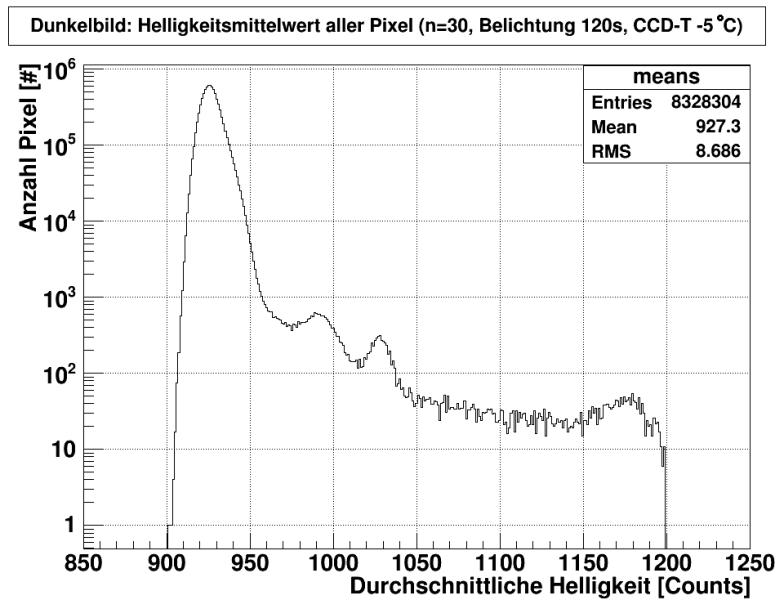


Abb. 4.18: Mittlerer gemessener Helligkeitswert jedes Pixels über 30 Dunkelbilder.

$931.59 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$	$927.61 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$931.45 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$	$927.71 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$931.36 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$927.56 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$
$931.26 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$927.75 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$
$931.29 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$	$927.93 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$931.05 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$927.76 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$930.84 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$927.57 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$931.02 \pm 1.29 \cdot 10^{-5}$	$927.83 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$929.99 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$928.21 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$929.80 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$928.92 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$930.02 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$929.03 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$
$930.01 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$928.44 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$
$929.91 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$921.21 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$
$929.64 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$	$916.29 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$
$928.95 \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$	$922.32 \pm 1.26 \cdot 10^{-5}$

Tab. 4.3: Median der Helligkeitsverteilung jedes Dunkelbilds in Counts.

che für diese Beobachtung ist daher ein Temperaturunterschied zwischen Unter- und Oberseite des CCD-Chips. Wahrscheinlich liegt ein Bauteil im unteren Bereich der Rückseite des CCD-Chips, das unter Umständen relativ warm werden kann. Dieses würde dann den CCD-Chip von unten her erwärmen und die Beobachtung erklären. Um zu zeigen, dass diese Annahme korrekt sein kann, muss überprüft werden, ob tatsächlich ein solches Bauteil existiert. Betrachtet man jedoch nur den Dunkelstrom und berücksichtigt seine Ungleichverteilung aufgrund des Temperaturunterschiedes, erhält man einen über den gesamten CCD-Chip relativ gleichverteilten Dunkelstrom. Die oben beschriebene Messung kann die Beobachtung eines Dunkelstromgradienten nicht bestätigen. Eventuell tritt dieses Phänomen erst bei längerer Betriebsdauer auf, wenn die Kameraelektronik warm gelaufen ist.

Eine Aussage über die Schwankung des Dunkelstroms erhält man durch die Betrachtung der Breite, der durch Dunkelstrom generierten Helligkeitsverteilung, für jedes der 30 Dunkelbilder. Um diese zu erhalten, wurde der Helligkeitswert jedes Pixels des Biasbildes vom zugehörigen Pixel des Dunkelbildes abgezogen. Der Mittelwert der berechneten Breiten aller 30 Helligkeitsverteilungen beträgt 130.2 ± 0.1 Counts für eine Belichtungszeit von 120 s. Normiert man die Dunkelstromzählraten auf eine Sekunde erhält man eine mittlere Breite der Helligkeitsverteilungen von 1.07 ± 0.03 Counts. Damit ergibt sich ein Fehler auf die Zählrate eines Pixels von 0.036 Counts/s , erzeugt durch die statistische Schwankung des Dunkelstroms. Verglichen mit der in Abschnitt 4.3 bestimmten mittleren Dunkelstromzählrate pro Sekunde beträgt die Schwankung des Dunkelstroms 37.6 %.

Vergleicht man die statistische Schwankung des Dunkelstroms mit dem Ausleserauschen stellt man fest, dass das Rauschen der Ausleseelektronik bis zu einer Belichtungszeit von 18.3 s dominiert.

Durch die Korrektur der Aufnahmen auf die jeweiligen Effekte sollten normalerweise gute Bilder erstellt werden können. Im folgenden Kapitel werden Aufnahmen des Sternenhimmels vorgestellt, die aber aufgrund des defekten Shutters leider keiner Korrektur unterzogen werden konnten.

5 Bilder vom Sternenhimmel über Erlangen

In diesem Kapitel werden Bilder des Sternenhimmels über Erlangen aufgenommen. Es wird das Pointing der Aufnahmen bestimmt und in diesem Zuge die Effizienz der Analysesoftware Astrometry.net getestet. Außerdem werden Informationen über die scheinbare Helligkeit der durch Astrometry.net erkannten Sterne angegeben und diese in Beziehung zur Blendenöffnung des Objektivs gesetzt.

5.1 Grundlagen

Belichtungszeit und Blendeneinstellung astronomischer Aufnahmen

Wie in Kapitel 4.4 gezeigt, verhält sich die gemessene Helligkeit I bei konstanter Belichtungszeit direkt proportional zum Quadrat der Fokallänge f und indirekt proportional zum Quadrat der Blendenzahl k . Außerdem, wie in Kapitel 4.3 gezeigt, verhält sich die gemessene Helligkeit bei konstanter Blendeneinstellung direkt proportional zur Belichtungszeit t . Beide Abhängigkeiten führen zu dem in Gleichung 5.1 dargestellten Zusammenhang der genannten Größen.

$$I_{\text{gemessen}} \sim \frac{f^2}{k^2} \cdot t \quad (5.1)$$

Tätigt man eine Belichtung eines Ausschnitts des Himmels ohne eine Teleskopnachführung zu nutzen, erhält man bei langen Belichtungszeiten aufgrund der Erdrotation keine punktförmigen Abbilder der Sterne, sondern ihren scheinbaren Laufweg am Himmel in Form gekrümmter Linien. Außerdem kommt man relativ schnell in den Bereich der Bildsättigung. Diese beiden Punkte sollte man bei der Wahl der Belichtungszeit unbedingt beachten.

Für sehr enge Blendeneinstellungen kann es sein, dass das Licht der Sterne bei zu geringen Belichtungszeiten zu unauswertbar kleinen Zählraten am CCD-Chip führt. Außerdem kommt es bei sehr engen Blendeneinstellungen zu Beugungseffekten, die das Bild verwischen lassen. Vergrößert man jedoch die Blendenöffnung, verringert sich der Tiefenschärfebereich, was eine gewisse Unschärfe mit sich zieht. Daher muss irgendwo zwischen der kleinsten und der größten Blendenöffnung ein Optimum gefunden werden. Dies ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Datenanalyse mit Astrometry.net

Die aufgenommenen Bilder wurden mithilfe des Softwarepaketes *Astrometry.net* analysiert. Mit dessen Hilfe können Blickrichtung, Bildfeldgröße und Rotation des Bildes bestimmt werden.

Astrometry.net versucht dazu im ersten Schritt alle im Bild enthaltenen Sterne zu isolieren. Dabei arbeitet die Software so stabil, dass einige nicht bzw. fälschlich erkannte Sterne das Ergebnis nicht beeinflussen. Anschließend werden mehrere Anordnungen von vier oder fünf Sternen mit bereits bekannten Sternenkonstellationen verglichen. Damit wird eine Hypothese über die astrometrische Kalibration aufgestellt. Die aufgestellte Hypothese wird erst als wahr anerkannt, wenn sie einen Bayesschen Entscheidungstest gegen eine Nullhypothese besteht. Die Erfolgsquote liegt *Astrometry.net* zufolge bei > 99.9 %.

Während der Analyse eines Bildes erstellt die Software eine Reihe von Dateien, sodass alle im Zuge der Auswertung generierten Daten später zugänglich sind. Unter anderem wird ein Bild erstellt, in dem extrahierte und tatsächliche Sterne direkt auf der Belichtungsaufnahme markiert sind (Lang et al. 2010).

Das äquatoriale Koordinatensystem

Das äquatoriale Koordinatensystem ermöglicht die exakte Angabe der Position eines Objekts auf der gedachten Himmelskugel. Die Erde sitzt dabei im Zentrum des Koordinatensystems und Bezugsebene ist die Ebene des Himmelsäquators.

Man unterscheidet das rotierende und das ortsfeste äquatoriale Koordinatensystem. Im rotierenden System dient der Frühlingspunkt¹ als Bezugspunkt am Himmelsäquator. Dieser dreht sich mit dem Sternenhimmel täglich einmal um die Erde, daher spricht man vom rotierenden System. Im ortsfesten System dient der Schnittpunkt zwischen Himmelsäquator und Meridian des Beobachtungsorts als Bezugspunkt. Auf das ortsfeste System wird hier jedoch nicht näher eingegangen.

Die Position eines Objektes am Himmel wird mit zwei Polarkoordinaten angegeben, der **Rektaszension** und der **Deklination**. Die Rektaszension ist ein Maß für die Rotation der Erde um ihre eigene Achse. Ihr Bezugspunkt ist der Frühlingspunkt. In 24 Stunden dreht sich die Erde einmal um 360° . Eine Stunde in Rektaszension steht also für 15° Erd- bzw. Himmelsrotation. Die Deklination gibt den Winkelabstand von der äquatorialen Ebene an. Diese bleibt für ein Himmelsobjekt während der Erdrotation per Definition zeitlich konstant. Für die Nordhalbkugel hat die Deklination ein positives Vorzeichen (Otto Struve 1967).

¹Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik (Frühlingsanfang der Nordhalbkugel) (Guthmann 2000).

5.2 Anwendung

Datennahme

Die Himmelsaufnahmen wurden am 3. Juli 2014 nachts zwischen 23:30 und 23:45 Uhr in Erlangen auf dem Dach des ECAP-Gebäudes ($49^{\circ}34'49.1''$ N, $11^{\circ}01'39.6''$ E) getätigt. Der Himmel war in dieser Nacht sternenklar bei einer sommerlichen Temperatur von ca. $+10^{\circ}$ C. Man ging von einer guten Transparenz des Himmels aus.

Der Mond befand sich im zunehmenden Stadium, war zu ca. 30 % sichtbar und etwa 401612 km von der Erde entfernt. Er lag für alle Aufnahmen im Rücken der Kamera.

Die Lichtverschmutzung am Ort der Messung liegt dem *Light Pollution Science and Technology Institute* zufolge bei ca 19-20 V mag/arcsec² (Cinzano et al. 2000).

Für die Messung wurde ein anderes Objektiv verwendet als bisher. Das verwendete Objektiv (AF Nikkor, 50 mm, f/1.8D) hat eine Brennweite von 50 mm und einen Bildwinkel von $31^{\circ}30'$. Die Blende kann zwischen f/1.8 als größte Öffnung und f/22 als kleinste Öffnung eingestellt werden.

Die Kamera wurde per Hand fokussiert. Dabei wurden mehrere Bilder mit einigen Sekunden Belichtungszeit genommen und vor Ort entschieden, bei welcher Entfernungseinstellung die Sterne am schärfsten abgebildet werden. Es zeigte sich eine Entfernungseinstellung von 1 m als die beste Wahl. Wahrscheinliche Ursache hierfür liegt im Adapter, mit dem das Objektiv auf das Kameragehäuse geschraubt wird (vgl. Kapitel 3.2).

Die Wahl der Belichtungszeit lief auf ähnliche Weise ab. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Sterne am Bild noch kreisförmig erschienen. Als Belichtungszeit wurden 5 s gewählt. Als CCD-Chip-Temperatur wurde -5° C eingestellt.

In der folgenden Messung wurden für jede Blendeneinstellung bei genannter Belichtungszeit und genannter CCD-Chip-Temperatur drei Belichtungen gespeichert. Dabei sollte herausgefunden werden, welche Helligkeit ein Stern mindestens besitzen muss, damit er bei einer bestimmten Blendeneinstellung identifiziert werden kann.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund des fehlerhaften, stets geöffneten Shutters keine Dunkelbilder genommen werden konnten. Dadurch lassen sich das Bildrauschen und die im vorigen Kapitel angesprochenen Artefakte nicht eliminieren. Die Belichtungen werden also so ausgewertet, wie sie die Kamera erzeugt hat.

Bilder

Um die Blickrichtung der Kamera zu bestimmen, wurden die in *FITS*-Dateien gespeicherten Belichtungen mit *Astrometry.net* ausgewertet. In Abbildung 5.1 ist eine beispielhafte Belichtungsaufnahme zu sehen. In der Aufnahme sind alle extrahierten Lichtquellen und die tatsächlich vorhandenen Sterne markiert. Außerdem ist der

Marker eingezeichnet, anhand dessen Astrometry.net den Himmelsausschnitt identifizieren konnte. Das Pointing der Aufnahme ist RA 20:01:03.169, DEC +16:43:55.509.

Auswertung

Analyse von Artefakten Da keine Subtraktion des Dunkelbildes vorgenommen werden konnte, erkennt man auf jeder Belichtung erwartungsgemäß die in Kapitel 4.5 beschriebenen Bildartefakte.

Spalten am CCD-Chip, in denen sich besonders helle Sterne befinden, weisen eine Überbelichtung auf. Blooming als Ursache ist hier eher unwahrscheinlich, da der für Blooming typische Abfall der Helligkeit mit zunehmender Entfernung vom überbelichteten Pixel nicht beobachtet wird. Außerdem besitzt jeder Pixel des CCD-Chips einen Anti-Blooming Schutz. Wahrscheinlicher ist der sog. Smear-Effekt. Die Ursache für den Smear-Effekt liegt im Auslesen des CCD-Chips. Dabei erzeugt Licht, das während dem Auslesevorgang auf den CCD-Chip fällt, zusätzliche Ladungen. Da die Pixel während des Auslesens verschoben werden entstehen einzelne Linien. Dies ist ein bekannter Nachteil der Full-Frame CCD-Chips und wird durch das Verbauen eines mechanischen Shutters, der den Lichteinfall während des Auslesens stoppt, beseitigt. Der Shutter der Kamera war defekt und blieb stets geöffnet. Dadurch konnte das einfallende Licht der Sterne (besonders der hellen Sterne) während des Auslesevorgangs eine erhöhte Zählrate für Spalten, die die Sterne beinhalteten, erzeugen. Fraglich ist jedoch, warum der Effekt über die gesamte Länge des CCD-Chips auftritt, und nicht erst ab der Stelle, an der sich der helle Stern befindet (AndorTechnology 2012). Möglicherweise ist der Smear-Effekt nur ein Teil der vollständigen Erklärung der durchgezogenen Linien. Denkbar wäre, dass helle Sterne während des Auslesevorgangs auf ihrem Weg entlang ihrer Spalte Elektronen in den Potentialtopfen zurück lassen, die erst beim nächsten Auslesen des Chips gesammelt werden. Das würde zu einem Erklärungsansatz führen, der die durchgängigen Linien vollständig beschreibt. Um sicherzustellen, dass der Ansatz die Beobachtung korrekt beschreibt, müssen diesbezüglich weitere Untersuchungen angestellt werden, die aber über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

Bestimmung des Pointings durch Astrometry.net Astrometry.net konnte jeder Belichtungsaufnahme ein eindeutiges Pointing zuordnen. Ein Abgleich der Resultate mit Stellarium zeigte, dass das Pointing korrekt gefunden wurde. Um Belichtungen mit großer Blendenöffnung zu verarbeiten, benötigt Astrometry.net wesentlich weniger Zeit, als für die Verarbeitung von Belichtungen mit kleiner Blendenöffnung.

Die Zahl der auf dem Bild isolierten Sterne hat ihr Maximum bei einer Blendenzahl von f/11 mit durchschnittlich 942 Sternen. Bei der kleinsten Blendenöffnung isolierte Astrometry.net im Schnitt 465 Sterne und bei der größten Blendenöffnung im Schnitt 402 Sterne. Der Rückgang der Zahl gefundener Sterne für kleinere Blendenöffnungen

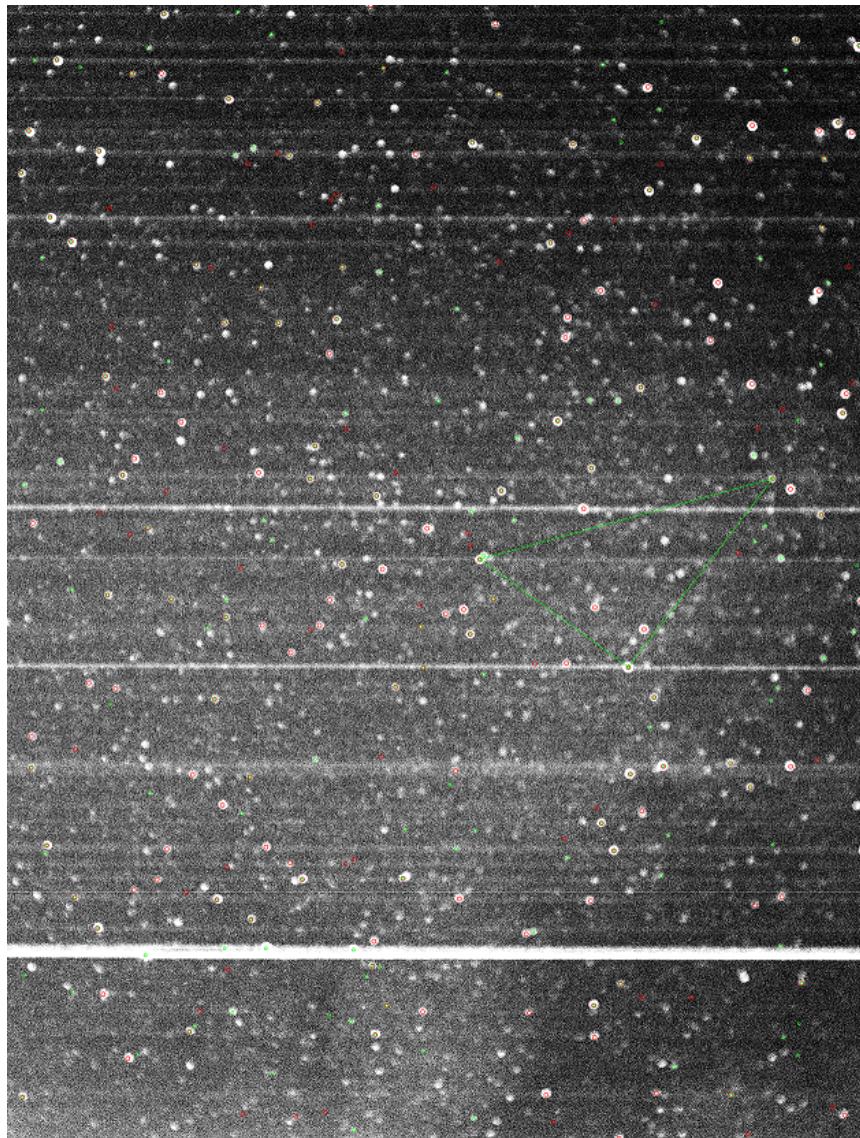


Abb. 5.1: Aufnahme des Sternenhimmels mit Belichtungszeit 5 s und Blende $f/4$ (gedreht, Rot: extrahierte Lichtquellen, Grün: echte Sterne, Marker: zum Identifizieren benutzte Konstellation).

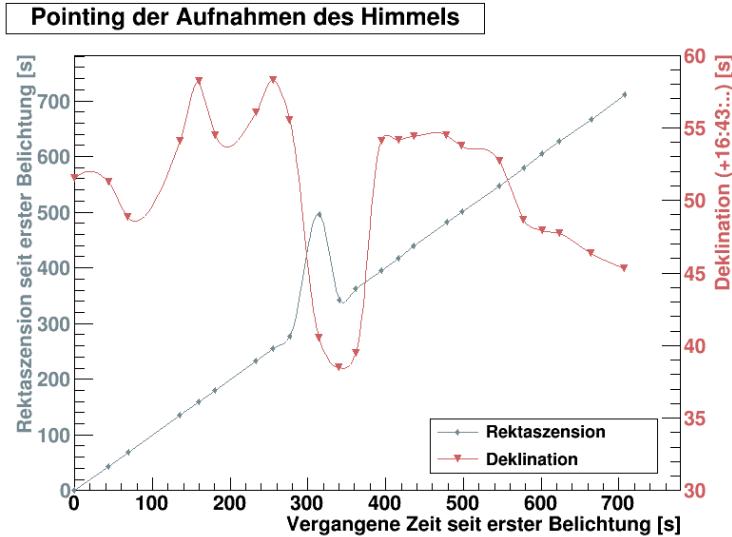


Abb. 5.2: Mittels Astrometry.net bestimmtes Pointing (Rektaszension und Deklination) für alle Belichtungen. Erkennbar ist die mit der Zeit wachsende Rektaszension und die Variation der Deklination. Letztere ist wahrscheinlich auf Verwacklung beim Einstellen der Blende zurückzuführen.

korreliert mit geringerer gemessener Helligkeit durch die engere Blendenöffnung. Dadurch können einige Sterne im Bild nicht mehr vom Untergrund unterschieden werden. Der Rückgang der Zahl gefundener Sterne für größere Blendenöffnungen kann wie folgt erklärt werden. Durch eine größere Blendenöffnung erhöht sich die von den Sternen eingestrahlte Lichtmenge. Dadurch kann man echte Sterne im Bild noch besser von Artefakten und dem Untergrund unterscheiden. Das korreliert mit einer kürzeren Verarbeitungszeit durch Astrometry.net.

Pointing wird von Astrometry.net über Rektaszension und Deklination angegeben. Die Zunahme der Rektaszension seit der ersten Belichtung und die Variation der Deklination sind in Abb. 5.2 gezeigt. Die Rektaszension verändert sich erwartungsgemäß um das Zeitintervall, das zwischen zwei Belichtungen liegt. Ein Wert der Rektaszension (Blende $f/5.6$) ist unerklärlicherweise inkonsistent. Die Deklination, die eigentlich konstant sein sollte, schwankt stark. Auffallend ist, dass sich die jeweiligen Deklinationswinkel aller drei pro Blendeneinstellung aufgenommenen Bilder ähneln. Da das Einstellen der Blenden manuell am Kameraobjektiv erfolgte, kann es sein, dass die Kamera dabei jedes Mal um ein winziges Stück verrückt wurde. Dies scheint daher die Hauptursache für die Schwankungen zu sein.

Auswertung sichtbarer Sterne Der hellste sichtbare Stern war Altair. Er befindet sich im Sternbild Aquila (Adler) und besitzt eine scheinbare Helligkeit² von 0.76 mag. Er wurde jedoch von Astrometry.net aufgrund des ihn umgebenden Bildartefakts nie als Stern isoliert und daher auch nicht zur Bildanalyse verwendet.

²Die in diesem Abschnitt angegebenen Magnituden wurden der SIMBAD Astronomical Database entnommen (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

Blende	Dunkelster Stern	Scheinbare Helligkeit [mag]
f/1.8	20Vul	5.92
f/2.8	20Vul	5.92
f/4	20Vul	5.92
f/5.6	15Sge	5.8
f/8	15Sge	5.8
f/11	15Sge	5.8
f/16	15Sge	5.8
f/22	11Sge	5.5

Tab. 5.1: Dunkelste von Astrometry.net im Bild erkannte Sterne.

Der dunkelste von Astrometry.net noch aufgeführte Stern war 20Vul im Sternbild Vulpecula (Fuchs). Er hat eine scheinbare Helligkeit von 5.92 mag. Astrometry.net konnte ihn auf Bildern, die mit einer Blendeneinstellung von maximal f/4 aufgenommen wurden, in der Vorverarbeitung noch als Stern isolieren.

Der dunkelste Stern, den Astrometry.net in der Bildverarbeitung selbst noch für die engste Blendeneinstellung als Stern isolieren konnte, war 11Sge im Sternbild Sagitta (Pfeil). Seine scheinbare Helligkeit beträgt 5.50 mag.

In Tabelle 5.1 ist die Helligkeit des dunkelsten Sterns aufgeführt, den Astrometry.net pro Blende bereits im Vorfeld korrekt als Stern isolieren konnte. Fraglich ist, ob noch dunklere Sterne hätten erkannt werden können, wenn die Belichtungen mit Dunkelbildern korrigiert worden wären.

Die von Astrometry.net angegebenen Sterne wurden mit denen, die Sternenkatalogen zufolge sichtbar sein müssten, verglichen. Dem Tycho-Sternenkatalog zufolge hat der hellste Stern in der Region eine scheinbare Helligkeit von 2.57 mag, obwohl definitiv Altair im Himmelsausschnitt sichtbar ist. Unklar ist, ob der Tycho-Katalog keine helleren Sterne enthält. Da die genannten Magnitudenwerte bisher aus der SIMBAD Astronomical Database entnommen wurden, kann es sein, dass sich angegebene Helligkeiten von Katalog zu Katalog unterscheiden. Die Sternenkataloge stimmen jedoch darin überein, dass die Zahl der sichtbaren Sterne für kleinere Helligkeiten annähernd exponentiell zunimmt. Betrachtet man die von Astrometry.net angegebenen Sterne in Abhängigkeit von deren Helligkeit, bemerkt man eine Zunahme der Zahl an Sternen bis zu einer Helligkeit von ca. 5 mag. Ab dieser Helligkeit geht die Zahl an angegebenen Sternen deutlich zurück.

Bleibt die Frage, ob Astrometry.net lediglich im Helligkeitsbereich bis ca. 6 mag operiert, dunklere Sterne nicht mehr eindeutig vom Untergrund unterschieden werden können oder ob pro Bild nur die hellsten 40 Sterne indiziert und angegeben werden. In diesem Fall wäre die Helligkeit des dunkelsten von Astrometry.net angegeben Sterns abhängig vom fotografierten Himmelsausschnitt.

Bestimmung der effektiven Fokallänge Wie bereits erwähnt, konnte die Entfernungseinstellung nicht anhand der auf das Objektiv gedruckten Skala getätigt werden, da der Adapter einen zusätzlichen Abstand zwischen Bildsensor und Linse verursacht. Daher ist es interessant, die effektive Fokallänge dieser Anordnung zu berechnen.

Über die Größe eines Pixels des CCD-Chips und den pro Pixel abgedeckten Winkelanteil des Himmels, den sog. *pixel scale*, kann die tatsächliche Fokallänge der Konfiguration berechnet werden.

Der *pixel scale* wird von Astrometry.net berechnet und beträgt 21.299 ± 0.027 arcsec. Das entspricht einem *Field of View* von 19.7×14.8 Grad. Die Größe eines Pixels beträgt $5.4 \mu\text{m}$ (Truesense imaging, inc. 2012, S. 8).

Die effektive Fokallänge berechnet sich nach Gleichung 5.2 zu 52.295 ± 0.066 mm (Bell 2010), mit Pixelgröße $a = 5.4 \mu\text{m}$, *pixel scale* $s = 21.299 \pm 0.027$ arcsec und Normierungskonstanten $\frac{360^\circ}{2\pi} \frac{3600\text{arcsec}}{1^\circ} \cdot \frac{1\text{mm}}{1000\mu\text{m}} \approx 206.265 \frac{\text{arcsec mm}}{\mu\text{m}}$.

$$f = 206.265 \frac{\text{arcsec mm}}{\mu\text{m}} \cdot \frac{a}{s} = 52.295 \pm 0.066 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Um genauere Informationen über die optischen Eigenschaften des Systems aus Kamera und Objektiv zu erhalten, müssten beide geometrisch kalibriert werden. Eine Kalibrierung wurde aber bis dato noch nicht durchgeführt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Laufe dieser Arbeit sollte die astronomische CCD-Kamera Aspen auf technische Eigenschaften und Einsetzbarkeit im Rahmen des Pointings für das CTA getestet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden kurz zusammengetragen.

Die Kühlung des CCD-Chips funktioniert bis zur technischen Untergrenze von 70 K unter der Umgebungstemperatur (in dieser Arbeit betrug diese ca. -35 °C) einwandfrei. Es konnte gezeigt werden, dass die CCD-Chip-Temperatur selbst bei sich ändernden Umgebungsbedingungen äußerst stabil gehalten wird. Damit ist ein Dauerbetrieb über einen längeren Zeitraum möglich. Gemessene Werte kann man Tabelle 6.1 entnehmen.

Bei der Betrachtung von Biasbild, Dunkelbild und Dunkelstrom zeigte sich eine eindeutige Temperaturabhängigkeit. Der Dunkelstrom nimmt erwartungsgemäß für kleiner werdende Temperaturen ab. Die mittlere Zählrate von Bias- und Dunkelbild hat dagegen ein Minimum bei Temperaturen um 0 °C. Aus den gewonnenen Erkenntnissen konnte ermittelt werden, dass optimale Belichtungen bei einer CCD-Chip-Temperatur von -5 °C aufgenommen werden können.

Für die CCD-Chip-Temperatur von -5 °C konnte ein zur Belichtungszeit linearer Dunkelstrom nachgewiesen werden. Ein ebenfalls linearer Zusammenhang ergab sich zwischen gemessener Helligkeit und Belichtungszeit.

Des Weiteren konnte die Linearität zwischen gemessener Helligkeit und Blendenöffnungsfläche gezeigt werden. Die gemessene Helligkeit skaliert demnach indirekt proportional zum Quadrat der Blendenzahl k^2 .

Die Betrachtung des Bildrauschen lieferte das Ergebnis, dass zwei der Pixel des CCD-Chips fehlerhaft sind (Dead Pixel). Sie lieferten während den Messungen eine Zählrate von 0 Counts. Im Dunkelbild finden sich auch einige Hot-Pixel. Zusätzlich konnten einige fehlerhafte Ladungstransportkanäle in das Ausleseregisters festgestellt werden. Diese besitzen einen Offset, der die Zählrate ganzer Spalten anhebt. Außerdem konnte eine zum Rand des CCD-Chips hin zunehmende Zählrate nachgewiesen werden, die wahrscheinlich auf den Amplifier-Glow-Effekt zurückzuführen ist. Die durch Dunkelstrom erzeugte Helligkeit ist über den gesamten CCD-Chip statistisch gleich verteilt. Da sich alle genannten Beobachtungen im Dunkelbild und damit auch in der Belichtung finden, lassen sich diese durch Subtraktion eines Dunkelbildes von der Belichtung eliminieren. Die wichtigsten gemessenen Daten zu Bias- und Dunkelbild kann man Tabelle 6.2 entnehmen.

Die Berechnung der effektiven Fokallänge ergab einen, durch den Objektivadapter verursachten, Offset von +2.3 mm, aufgrund dessen die Entfernungseinstellung des

Objektivs nicht anhand der aufgedruckten Skala getätigt werden konnte.

Aufnahmen eines Ausschnitts des Himmels zeigten weitere Bildartefakte, deren Ursprung wahrscheinlich auf den Smear-Effekt zurückzuführen sind.

Es wurde festgestellt, dass die Bestimmung des Pointings mittels Astrometry äußerst robust funktioniert. Für eine Belichtungszeit von 5 s konnte jedem aufgenommenen Bild zu jeder Blendeneinstellung ein eindeutiges Pointing zugeordnet werden. Die Verarbeitung der Aufnahmen durch Astrometry ging für große Blendenöffnungen wesentlich schneller als für kleine. Für Pointing-Zwecke erweisen sich daher eher größere Blendenöffnungen als sinnvoll.

Der dunkelste Stern, der von Astrometry für den gewählten Himmelsausschnitt indiziert wurde, hatte eine scheinbare Helligkeit von 5.92 mag. Angemerkt sei, dass aufgrund des fehlerhaften Shutters keine Dunkelbildkorrektur vorgenommen werden konnte. Es ist wahrscheinlich, dass dunklere Sterne hätten erkannt werden können, wenn die Belichtungen mit Dunkelbildern korrigiert worden wären.

Abschließend kann jedoch bestätigt werden, dass die astronomische CCD-Kamera Aspen trotz defektem Shutter durchaus in der Lage ist, zur Bestimmung des Pointings geeignete Bilder des Sternenhimmels aufzunehmen. Mit intaktem Shutter werden höchstwahrscheinlich noch bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Ermittelte Daten auf einen Blick

Eigenschaften des Kühlvorgangs	Wert
Maximales Kühlvermögen $\frac{\Delta T}{s}$	$-46.188 \pm 0.052 \text{ mK/s.}$
Durchschnittliches Kühlvermögen $\frac{\Delta T}{s}$	$-31.902 \pm 0.133 \text{ mK/s}$
Zeitanspruch Einpendelvorgang Δt	500 s
Breite der Temperaturverteilung σ_T	8.7 mK
Offset zum Sollwert	-0.04 K

Tab. 6.1: Wichtige Eigenschaften des Kühlvorgangs

Rahmendaten zur CCD-Chip-Temperatur -5 °C	Wert
Bias-Level	$908.5 \pm 0.003 \text{ Counts}$
Mittlere Helligkeit durch Dunkelstrom	$(95.70 \pm 0.06) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Counts}}{\text{s}}$

Tab. 6.2: Rahmendaten zur CCD-Chip-Temperatur -5 °C.

Literaturverzeichnis

- A. Cooper. 2014, Amplifier Glow, Web, <http://darkerview.com/CCDProblems/ampglow.php>; aufgerufen am 24.07.2014
- Actis, M., Agnetta, G., Aharonian, F., et al. 2011, Experimental Astronomy, 32, 193
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., et al. 2006, A&A, 457, 899
- AndorTechnology. 2012, CCD Sensor Architectures, Web, <http://www.andor.com/learning-academy/ccd-sensor-architectures-architectures-commonly-used-for-high-performance-cameras>; aufgerufen am 21.07.2014
- Bell, C. 2010, Astrometry 101 - Pixel Scale, Web, <http://cbellh47.blogspot.de/2010/01/astrometry-101-pixel-scale.html>; aufgerufen am 14.07.2014
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. 2000, The night sky in the World, Web, www.lightpollution.it/dmsp/; aufgerufen am 07.07.2014
- Guthmann, A. 2000, Einführung in die Himmelsmechanik und Ephemeridenrechnung. 2. Auflage (Spektrum Akademischer Verlag)
- Hecht, E. 2005, Optik (Oldenbourg Verlag München Wien)
- Howell, S. B. 2006, Handbook of CCD Astronomy Second Edition (Cambridge University Press)
- Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., & Roweis, S. 2010, AJ, 139, 1782
- Lennarz, D. 2012, Dissertation, A Study of Transient Very-High-Energy Gamma-Ray Emission from Gamma-Ray Bursts and Supernovae with H.E.S.S., MPI für Kernphysik, Heidelberg, Germany
- Medina, C. 2012, H.E.S.S. Teleskop Array, Web, http://www.ecap.nat.uni-erlangen.de/hess/news/hess-II-first-light_de.shtml; aufgerufen am 12.06.2014.
- Nolan, S. 2012, CTA Montage Daytime, Web, <https://portal.cta-observatory.org/public/PublishingImages/Forms/Thumbnails.aspx>; aufgerufen am 12.06.2014.

LITERATURVERZEICHNIS

Obrazu, S. 2011, Full Frame CCD, Web, <http://www.swiatobrazu.pl/zdjecie/artykuly/229209/fotografia-od-a-do-z-ccd-full-frame.jpg>; aufgerufen am 24.07.2014

Otto Struve, Beverly T. Lynds, H. P. 1967, Astronomie: Einführung in ihre Grundlagen (de Gruyter)

Truesense imaging, inc. 2012, KAF-8300 IMAGE SENSOR: DEVICE PERFORMANCE SPECIFICATION

www.Foto Kurs.com. 2014, Blende 1:2 (f/2), Web, <http://www.foto-kurs.com/kamera-blende.php>; aufgerufen am 24.06.14.

Anhang

A. Datenblätter Apogee Aspen G07 CCD-Kamera



151 N. Sunrise Ave, Suite 902
Roseville CA 95661 USA
Tel 916-218-7450
Fax 916-218-7451
www.ccd.com

Camera Test Report

Camera Serial Number	131421	Test Date	9/24/2013
Part Number	G07F-MG58DB-CG8300-4H0929	Tested by	L. Nguyen
Camera Series	Aspen	Interface	U/E
Sensor	Kodak KAF-8300	Sensor Grade	S
Sensor Serial Number	9470	CCD Type	Mono microlensed
Sensor Size	3326 x 2504	Bits	16
		Cooling	2 Stage

TEST DATA

Gain	0.4 (electrons per count)
Standard Deviation	18.24 (counts)
RMS Noise	7.2 (electrons)
Maximum Digitized Well Capacity	25K (electrons)
Bias level	817 (counts)
120 Second Dark	819 (counts; includes bias level)
Dark Current	0.007 (electrons per pixel per second)
Test Temperature	-35 (°C); Delta 60 (°C)

Firmware Version	302	Configuration	G07	ConfigRev
MAC Address	00095102015D	Drawing Rev	PR3	
DLL Version	5.4.538.3003	Back Focal Distance (Physical)		(inches)
Shutter Type	MG58	Back Focal Distance (Optical)		(inches)
Finish: Back	Standard	Window	D	
Finish: Front	Standard	Window Material	BBAR	

Notes

Digital Offset: AD0 = 293, AD1 = 312



B. Datenblatt Nikon AF Nikkor 85mm f/1.8D

Technische Daten

Brennweite: 85mm

GröBte Blende: 1:1,8

Optik: 6 Elemente in 6 Gruppen

Bildwinkel: 28°30'

Entfernungsskala: In Meter und Fuß von 0,85 m (3 ft.) bis unendlich (∞)

Entfernungsdaten: Werden an Kameras übertragen

Blendskala: Blende 1,8 bis 16 auf der Standardskala und auf der Skala für direkte Blendenablesung

Verriegelung für kleinste Blende: Vorgesehene

Blendetyp: Vollautomatisch

Belichtungsmessung: Offenblendenmessung bei Kameras mit AI-Blendenkupplung oder CPU-interface-System; Arbeitsblendenmessung bei anderen Kameras

Objektivfassung: Nikon-Bajonettanschluß

Frontgewinde: 62 mm (P=0,75 mm)

Abmessungen: ca. 71,5 mm Durchm. x 58,5 mm Länge bis Flansch; Gesamtlänge ca. 69 mm

Gewicht: ca 380 g

Änderungen von technischen Daten und Design durch den Hersteller ohne Ankündigung und ohne Verpflichtungen irgendeiner Art vorbehalten.

C. Datenblatt Nikon AF Nikkor 50mm f/1.8D

Technische Daten

Objektivtyp: AF Nikkor mit D-Charakteristik, eingebauter CPU und Nikon-Bajonett

Brennweite: 50 mm

Maximale Blendenöffnung: f/1,8

Optischer Aufbau: 6 Linsen in 5 Gruppen

Bildwinkel: 46° [31°30' bei Nikon-Digitalkameras (Nikon DX-Format); 38° bei IX240-Kameras]

Entfernungsdaten: Werden an Kameras übertragen

Schärfeneinstellung: Autofokus; manuell über separaten Fokussierring

Entfernungsskala: Unterteilt in Meter und Fuß und zwar von 0,45m bis Unendlich (∞)

Kürzeste Aufnahmedistanz: 0,45 m von der Sensorebene gemessen

Blendskala: f/1.8 — f/22, sowohl auf der Standardskala als auch der Skala für Blendendirekteinspiegelung

Blendenart: Vollautomatisch

Belichtungsmessung: Offenblendenmessung bei Kameras mit AI-Blendenkupplung oder CPU-Interface-System; Arbeitsblendenmessung bei allen anderen Kameras

Befestigungsgröße: 52 mm (P = 0,75mm)

Abmessungen: ca. 63,5 mm Durchm. x 39 mm (Länge bis Flansch)

Gewicht: ca. 155 g

D. Datenblatt LED-5-14000W/75°

LED-5-14000W/75°

Best.-Nr. 18 00 05

LED-5-14000W/75°

FARBE (EMITTING COLOR)	weiß
LICHTSTÄRKE (LUMINOUS INTENSITY)	14000mcd
LICHTSTROM (LUMINOUS INTENSITY)	18lm
ABSTRAHLWINKEL (VIEWING ANGLE)	75°
FARBTEMPERATUR (COLOR TEMP.)	9000-10000°K
FARBORT (CIE-TRIANGLE COORDINATES)	X:0.28-0.29 Y:0.27-0.28
GRÖÙE / ABMESSUNG (SIZE)	5mm
SPANNUNG (FORWARD VOLTAGE)	typ. 3.5V (max. 4.0V)
STROM TYP. (REC. FORWARD CURRENT)	100mA
MATERIAL	InGaN / Sapphire
LEBENDAUER (LIFETIME)	50.000
LINSTENTYP (LENSTYPE)	wasser-klar (water clear)
STROMVERBRAUCH (POWER DISSIPATION)	0.4375W
BETRIEBSTEMPERATUR (OPERATING TEMP.)	-25°C-85°C
LAGERTEMPERATUR (STORE TEMP.)	-25°C-100°C
LÖTEBEDINGUNGEN (LEADCONDITIONS)	max. 5 Sec. @ 260°C
PEAK FORWARD CURRENT (LENSTYPE)	200mA, 0.1ms, 1kHz
ELEK.ST. ENTLADUNG (ELECTROST. DISCHARGE)	2000V

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christopher van Eldik, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Außerdem danke ich der gesamten Gruppe CTA des ECAPs und der Gruppe H.E.S.S. des ECAPs für das gute Arbeitsklima und die freundliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Ebenfalls danke ich Frau Felicia Krauss für ihre Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Erlangen, den 05.08.2014

Andreas Specovius