

Diplomarbeit

Untersuchungen an CCDs mit Hinblick auf das ALPS-Experiment

vorgelegt von
Sönke Cramme

Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hamburg, den 14. Oktober 2009

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	6
1.2	Das ALPS-Experiment	7
2	Grundlagen der CCD-Technik	9
2.1	Aufbau und Anwendung einer CCD	9
2.2	Funktionsweise der CCD als Photonendetektor	11
2.3	Auslesevorgang und Digitalisierung	11
2.4	Konstruktionsunterschiede von CCDs	13
2.5	Grundgrößen von CCD-Kameras	14
2.5.1	Signalverhalten	14
2.5.2	Rauschen	18
2.5.3	Konversionsfaktor	20
3	Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME	23
3.1	Kameras	23
3.2	Datennahme und Auswertungsverfahren	24
3.3	Bestimmung der Grundgrößen	24
3.3.1	Biasspannung	24
3.3.2	Dunkelstrom	28
3.3.3	Rauschen	29
3.3.4	Konversionsfaktor	30
3.4	Vergleich der Ergebnisse mit den Datenblättern	43
3.4.1	Kameras	43
3.4.2	Interpretation für ALPS	44
4	Versuchsaufbau für simulierte ALPS-Messung	47
4.1	Lichtquelle und optische Komponenten	47
4.2	Strompulser	50
4.3	Photonenraten	51
4.4	Erste Messungen	52
4.5	Fazit zum simulierten ALPS-Versuchsaufbau	57
5	Zusammenfassung und Ausblick	59

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	61
Tabellenverzeichnis	63
Literaturverzeichnis	65

1 Einleitung

Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik ist die Quantenfeldtheorie für eine Beschreibung der Eigenschaften und Wechselwirkungen aller uns bekannten Elementarteilchen. Zu diesen gehören die elementaren Fermionen, sechs Quarks und sechs Leptonen mit ihren jeweiligen Antiteilchen und die Eichbosonen, zu denen die Gluonen, das Photon, W^\pm , Z^0 und das Graviton gehören. Die Bosonen sind die Austauscheteilchen der bekannten Wechselwirkungen, schwacher und starker Kraft, Elektromagnetismus und Gravitation. Das Standardmodell stellt heutzutage eine allgemeingültige Eichtheorie dar, die Konsistent zu den meisten physikalischen Beobachtungen ist.

Das Standardmodell entsteht als Feldtheorie durch die Zusammenführung von elektroschwacher Kraft (Vereinigung des Elektromagnetismus mit der schwachen Kraft) und der Quantenchromodynamik (QCD), der Feldtheorie zur Beschreibung der starken Kraft. Im Standardmodell enthaltene diskrete Symmetrien resp. Erhaltungsgrößen sind z.B. P (Parität, Raumspiegelung), C (Ladungsumkehr) und T (Zeitumkehr). Bei der schwachen Wechselwirkung wird nun eine Verletzung der vereinheitlichten CP-Symmetrie beobachtet, wohingegen die CP-Symmetrie in der QCD als ungebrochen beobachtet wird. Da die QCD aber einen natürlichen CP verletzenden Anteil in ihrer Wirkung enthält, bleibt die Frage nach der Ursache der Unterdrückung der CP-Verletzung. Dies ist als starkes CP-Problem bekannt. Ein möglicher Ansatz das Problem zu lösen besteht darin, neue Teilchen zu postulieren, die innerhalb des Standardmodells nicht beschrieben werden. Es können zusätzliche U(1)-Eichsymmetrie in das SM eingeführt werden, die konsistent zu den vorhandenen Erhaltungsgrößen und Symmetrien sind. Diese U(1)-Symmetrien beschreiben dann einen verborgenen Feldraum (engl. hidden-sector) von Teilchen, die nicht im Standardmodell enthalten sind. Speziell bei der U(1) Peccei-Quinn-Symmetrie werden leichte Teilchen vorhergesagt, die Axione genannt werden (siehe[1]).

Zur Zeit gibt es weltweit verschiedene Experimente, um Axione nachzuweisen (z.B. ALPS [2] [3], Axion Like Particle Search; CAST [4], Cern Axion Solar Telescope). Das Funktionsprinzip ist dabei überall recht ähnlich. Es wird versucht ein künstlich oder auch natürlich erzeugtes Axion indirekt über ein Photon als Endprodukt nachzuweisen. Einige Experimente untersuchen die Emission von Axionen aus der Sonne (CAST), andere wiederum suchen nach Axionen, die durch spontane Oszillation aus Photonen im Labor entstehen können (ALPS).

Im folgenden werden in 1.1 die Ziele der vorliegenden Arbeit dargestellt. Das hiermit verknüpfte ALPS-Experiment wird in 1.2 kurz beschrieben. In Kapitel 2 wird die Funktionsweise einer CCD (engl. charge couple device, ladungsgekoppelte Speichereinheit) erläutert und die Grundgrößen zur Charakterisierung von CCD eingeführt. Kapitel 3 befasst sich mit den untersuchten Eigenschaften der Kameras SBIG-ST7E und SBIG-402ME des Herstellers Santa Barbara Instrument Group, wobei der Vergleich und die

Interpretation der Daten mit den Herstellerangaben bezüglich der Größen Rauschen, Dunkelstrom, nach Umrechnung mit dem gemessenen Konversionsfaktor, durchgeführt werden. Danach werden in Kapitel 4 die Komponenten und der Versuchsaufbau für eine Simulation des ALPS-Experiments vorgestellt. Es wird hierbei auf die Eigenschaften der optischen Komponenten und des Pulsers eingegangen. Es werden die ersten Messungen dargestellt und ein Fazit zum Versuchsaufbau gezogen. In Kapitel 5 wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben und ein Ausblick vorgenommen.

1.1 Motivation

Beim ALPS-Experiment am DESY wird für die Detektion der eventuell zurückoszillierten Photonen eine CCD benutzt, die in der Kamera PIXIS 1024B verwendet wird. Im Zuge der Diplomarbeit soll das ALPS-Experiment simuliert werden und Langzeitmessungen mit mHz-Photonenraten an CCDs durchgeführt werden. Hierbei soll ein kleines Paket von Photonen am Anfang einer langen Integrationszeit auf der CCD deponiert werden und das Verhalten der Ladung eines Einzelpixels in der Zeit und des Ortes näher untersucht werden. Die durchgeführten Untersuchungen, die in dieser Arbeit dargestellt werden, bestehen im wesentlichen aus der Bestimmung der Rauschcharakteristik und der Messung des Dunkelstroms, sowie einer detaillierteren Untersuchung des Konversionsfaktors an den vorhandenen SBIG CCDs (siehe 3.4). Die Auswahl der Versuchskomponenten für einen simulierten ALPS-Aufbau orientieren sich an den Messbedingungen die beim ALPS-Experiment vorhanden sind. Zusammengefasst sind dies:

- **Kleine Photonennraten [mHz]**
- **geringes Ausleserauschen und Dunkelstrom**
- **Wellenlänge:** $\lambda = 532nm$
- **CCD-Integrationszeit:** $t = 10^3 - 10^4s$

Das Ziel des Versuchsaufbaus soll es sein, die Bedingungen wie beim ALPS-Experiment nach zustellen, um damit Untersuchungen an CCDs vorzunehmen. Im Speziellen liegt das Interesse bei diesen Untersuchungen in der Bestimmung des Konversionsfaktor eines Einzelpixels und des Ladungsverhaltens bei mHz Photonennraten zusammen mit langen Integrationszeiten. Im Laufe des Experimentierens wurde festgestellt, dass sich einige der gesteckten Ziele mit den ausgewählten Versuchskomponenten nicht erreichen lassen (siehe 4.5). Die wesentliche Analysearbeit ist die Bestimmung des Konversionsfaktor anhand zweier Methoden für die zwei verschiedene CCD-Modelle, deren Gegenüberstellung und die Interpretation für den ALPS-Detektor (3.4). Desweiteren werden die gesammelten Erfahrungen der gemeinsam betriebenen Komponenten Strompulser und LED dargestellt und die damit verbundene Bestrebung mit dem Versuchsaufbau zum einen eine möglichst sehr gute gleichmäßige Ausleuchtung der photoempfindlichen Fläche auf der CCD zu erreichen und zum anderen die Fokussierung auf wenige Pixel zu realisieren (siehe 5).

1.2 Das ALPS-Experiment

Am DESY wird ein so genanntes “Licht-durch-die-Wand” Experiment (ALPS) durchgeführt, welches künstlich erzeugte Axione nachweisen will [2]. Hierbei werden Photonen mit einer Wellenlänge von 532 nm in Richtung einer Wand emittiert, die sich in der Mitte eines starken Magnetfeldes und im Vakuum befindet. Es gibt nun eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass hierbei ein Photon mit dem Magnetfeld in Wechselwirkung tritt und dabei ein Axion erzeugt wird. Dieses kann dann ungehindert die Trennwand passieren. Wenn dieses Axion nun auf der Rückseite der Trennwand wieder mit dem Magnetfeld wechselwirkt, kann es in ein detektierbares Photon zurückkonvertieren. Dieses Photon kann dann mit photoempfindlichen Detektoren nachgewiesen werden, wobei die Nachweisschwelle im mHz-Bereich liegt.

1 *Einleitung*

2 Grundlagen der CCD-Technik

CCDs werden häufig in Teleskopen und Kameras verwendet und dominieren heutzutage die Aufnahmetechniken in der Astronomie, wo sie Photoplatten und andere photoelektrische Verfahren ersetzen. Je nach Anforderung und Anwendung haben CCD-Chips unterschiedliche Verhalten, bezüglich des Detektionsverhaltens und des Digitalisierungsprozesses. Bei fast allen wissenschaftlichen Anwendungen werden im besonderen hohe Quanteneffizienz (s. Seite 15), geringer Dunkelstrom (s. Seite 16) und kleines Ausleseraussehen (s. Seite 19) gefordert.

Die folgenden theoretischen Grundlagen zur CCD-Technik sind im Wesentlichen [5] und [6] entnommen. In [5, Kapitel 3 und 4] wird speziell auf die Konstruktion von CCDs und die Detektion von Signalen mit CCDs resp. das Detektorverhalten eingegangen. Eine kompakte Einführung in die Technik von CCD-Kameras bietet ebenfalls [7] vom CCD-Kamerahersteller Apogee. Der folgende Einblick in die Grundlagen der CCD Technik geht im Wesentlichen auf die für den vorliegenden Versuchsaufbau untersuchten Größen ein. Einige weitere Eigenschaften einer CCD, wie zum Beispiel die Quanteneffizienz werden nur am Rande behandelt.

In Kapitel 2.1 wird der Aufbau eines CCD-Chip erklärt. Kapitel 2.2 beschreibt den Vorgang der Detektion. In Kapitel 2.3 wird kurz der Digitalisierungsprozess erläutert. Das Kapitel 2.4 stellt die verschiedenen Konstruktionstypen vor. Abschließend werden in Kapitel 2.5 einige wesentliche Grundgrößen eingeführt und erklärt. Für eine detaillierte Gesamtdarstellung über CCDs sei auf die genannte Literatur verwiesen.

2.1 Aufbau und Anwendung einer CCD

Ein CCD-Chip ist ein Bauelement aus einzelnen Metalloxid-Halbleiterkondensatoren (engl. MOS- metal oxid semiconductor). Ein MOS-Kondensator ist im Wesentlichen aus drei verschiedenen, aufeinander liegenden Schichten aufgebaut. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau eines MOS-Kondensators. Die unterste Schicht, das Substrat, besteht dabei aus einem p-dotierten Silizium. Darüber liegt eine Isolatorschicht aus einem Metalloxid, wobei hierbei in der Regel Siliziumdioxid verwendet wird. Die oberste Schicht ist polykristallines Silizium, welches als Elektrode zur Spannungsversorgung dient und wird als Gate bezeichnet. Jeder Kondensator auf einem CCD-Chip arbeitet selbständig und unabhängig von den restlichen und übernimmt die Aufgabe der Speicherung von erzeugten Elektronen.

Die Halbleiterkondensatoren, die einige $10\text{-}100\ \mu\text{m}^2$ groß sind, werden in Zeilen und Spalten matrixartig angeordnet und bilden so das Kernstück einer CCD, man spricht deshalb auch von einer Halbleitermatrix. Die Detektorfläche (engl. array) wird als photo-

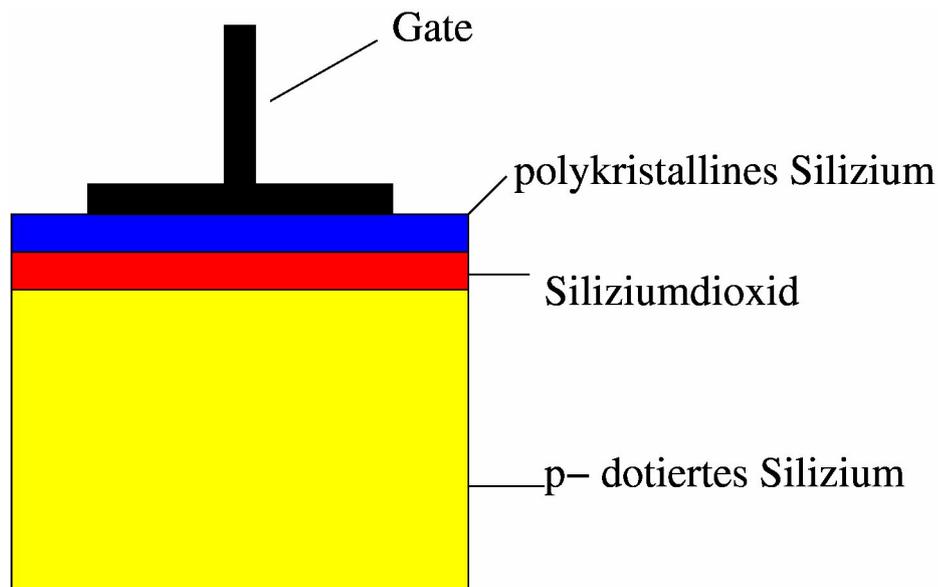


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines MOS-Kondensator. Es sind die drei unterschiedlichen Schichten und der Gateanschluss für die Spannungsversorgung zu sehen.

empfindliche oder sensitive Fläche bezeichnet. Ein Einzelelement resp. ein Kondensator wird Pixel genannt (vom englischen pi(x)cture element). Hinzu kommen noch diverse elektronische Bauelemente, wie Spannungsquellen und Verstärker. Abbildung 2.2 zeigt einen CCD-Chip. Die ersten Einheiten wurden im Jahr 1970 von Boyle und Smith [8] in den Bell Laboratorien entwickelt.

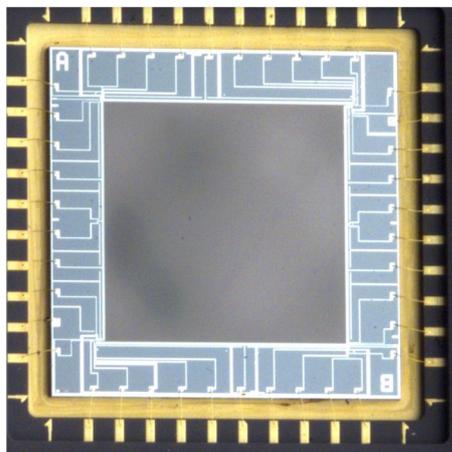


Abbildung 2.2: Ein CCD-Chip für astronomische und wissenschaftliche Anwendungen. Die dunkelgraue Fläche in der Mitte ist die photoempfindliche Fläche. Außerhalb dieser befinden sich Leitungen für die Steuer- und Ausleselektronik. Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:CCD.jpg>

Die Pixel einer CCD sind in vertikaler Richtung durch die Gatespannungen elektro-

statisch voneinander getrennt. Es wird somit ein Überlaufen in die Nachbarpixel verhindert. In horizontaler Richtung werden die Pixelzeilen durch Trennkanäle voneinander getrennt. Ein großer Vorteil von CCDs liegt in der Proportionalität zwischen den detektierten Photonen und den erzeugten Ladungen. Man spricht deshalb bei einer CCD von einem linearen Photodetektor.

2.2 Funktionsweise der CCD als Photonendetektor

Durch Anlegen einer positiven Spannung am Gate eines Kondensators wird ein elektrisches Feld erzeugt, welches in das Substrat hineinwirkt und dort eine Verarmungszone entstehen läßt. Die freien Ladungsträger im Substrat wandern auf Grund der Potentialdifferenz zwischen Grenzschicht und Substrat zur Grenzschicht hin und rekombinieren dort mit den Fehlstellen des p-dotierten Substrats. Es entsteht eine Zone ohne freie Ladungsträger, in der sich keine freien Elektronen mehr befinden und die positiven Fehlstellen mit Elektronen besetzt sind. Innerhalb der Verarmungszone können nun Elektronen angesammelt und gespeichert werden. Für einfallende Photonen ist das polykristalline Silizium und das Siliziumdioxid durchlässig. Im Inneren des p-dotierten Siliziums können die Photonen, bei Energien die größer sind als die Energie der Bandlücke des Halbleiter (bei Silizium ca. 1.11 eV [9]), die kovalente Bindung der Ladungsträger aufbrechen, wodurch ein Elektron-Loch-Paar entsteht. Das freie Elektron wandert nun der positiven Gatespannung entgegen in die Verarmungszone des Substrats und wird dort in der Potentialmulde des E-Feldes gefangen gehalten. Die Fehlstelle wandert von der Grenzschicht weg. Je nach Wahl des Substrats, der Substratdicke und der Dotierung kann eine CCD für unterschiedliche Wellenlängenbereiche sensitiv gemacht werden. Abbildung 2.3 zeigt das schematische Prinzip der Detektion eines Photon und der Erzeugung von Elektronen durch den inneren photoelektrischen Effekt.

Die Funktionsweise eines Elementes einer CCD ist mit der einer Photodiode vergleichbar. Bei einer Diode produzieren Photonen Elektronen-Loch-Paare im Halbleiter. Die Elektronen erzeugen dann einen elektrischen Strom, der ein Maß für die Intensität des eingefallenen Lichts ist. Nun funktioniert jedes Pixel wie eine eigenständige Photodiode, in der die generierten Ladungen dann allerdings nicht abfließen, sondern in einer Potentialmulde eingeschlossen bleiben. Da es sich hierbei um einige zehntausend Elektronen handelt, muss das Spannungssignal noch verstärkt werden. Die so erzeugten Spannungen werden dann digital ausgelesen.

2.3 Auslesevorgang und Digitalisierung

Diese Halbleitermatrix funktioniert wie ein analoges Schieberegister. Durch Anlegen einer gestaffelten, periodischen Gatespannung an den Pixeln kann man die gespeicherten Ladungsträger von Pixel zu Pixel weiterschieben. Dabei werden die Spannungen an den Pixeln periodisch so verändert, dass die Elektronen, die in einer Potentialmulde eines Pixels festsitzen, in ein benachbartes Pixel hinüberfließen können. Im Nachbarpixel, das

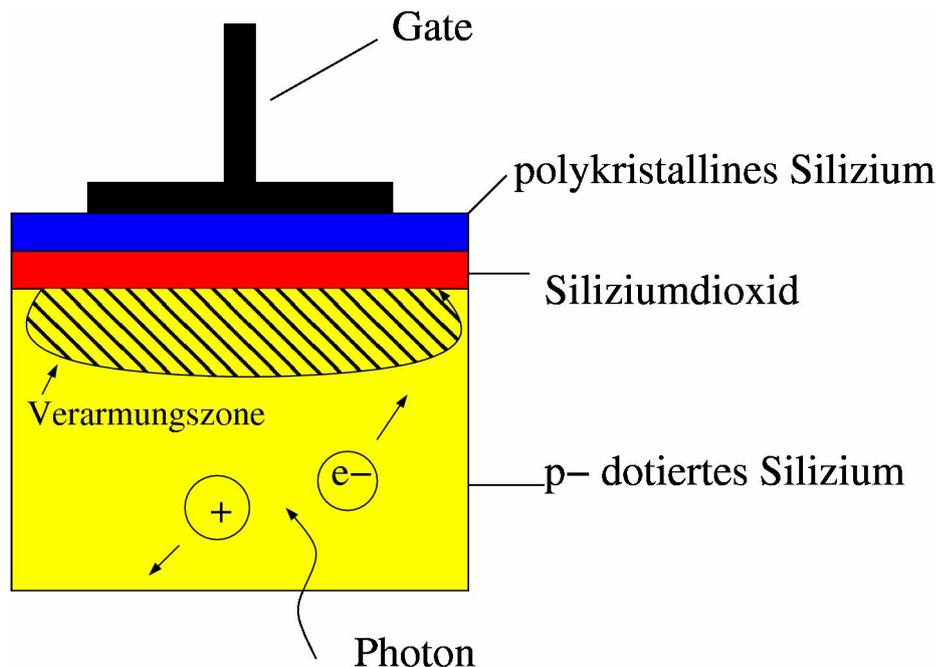


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip der Photodetektion. Die kovalente Bindung von Elektron und Atom wird aufgebrochen. Das Elektron wandert der Verarmungszone entgegen und die Fehlstelle wandert von ihr weg.

die Elektronen aufnimmt, wurden die Elektronen ebenfalls während des gleichen Taktes zum nächsten Nachbarn weitergeschoben. Mit diesem Eimerkettenprinzip werden die Elektronen von Pixel zu Pixel weitergereicht. Am Ende einer Zeile gibt es ein serielles Register, welches die Elektronen aufnimmt und über einen Verstärker an einen ADC-Wandler (engl. analog digital converter, Analog-Digital-Wandler) weiterleitet und digitalisiert. Es wird ein digitales Bild gespeichert auf dem jedes Pixel einen Zahlenwert erhält. Der dynamische Bereich des ADC-Wandlers ist für die Auflösung der sehr kleinen Spannungsunterschiede in den Pixeln verantwortlich. Die Auflösung des ADC wird in Bit angegeben, und liegt bei den heutigen Modellen, die für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden, im Bereich von 12 bit (4096) bis 16 Bit (65536). Die Gesamtzahl der Elektronen eines Potentialtopfes (s. Seite 16) eines CCD-Pixels werden durch den dynamischen Bereich des ADC dargestellt. Bei einer CCD mit einem 12 Bit ADC-Wandler und einer Potentialtopftiefe von 50000 Elektronen, werden 12-13 Elektronen zu einem Bit zusammengefasst, bei einem 14 Bit Wandler sind dies nur noch etwa 3 Elektronen. Die Elektronik ist also ein begrenzender Faktor, der für die Auflösung eines Signals auf einem Pixel eine wichtige Rolle spielt. Das Signal einer CCD liegt nach Verstärkung und Digitalisierung in digitalen Einheiten (ADU, engl. Analog Digital Unit) vor. Es kann dann entweder auf einem Monitor als Graustufenbild dargestellt werden, wobei einem Bildpixel genau ein CCD- Pixel zugeordnet wird, oder es liegt in tabellarischer Form in einer Datei vor, wobei die Spalten- und Zeilenzahl der Tabelle, der Anzahl der Spalten und Zeilen der CCD entspricht.

2.4 Konstruktionsunterschiede von CCDs

Es gibt bei der Herstellung eines CCD-Chips verschiedene Konstruktionsverfahren in Hinblick auf den Auslesevorgang und die Photonendetektion. Bezüglich der Detektion gibt es die Bauarten der Photonendetektion auf der Vorderseite, also der Seite mit den Elektroden (engl. *frontside-illuminated*) und die Variante der rückseitigen Belichtung (*backside-illuminated*). Für den Auslesevorgang existieren die wichtigen Konstruktionsarten des Zwischenzeilentransfers (engl. *interline transfer*), des Bildtransfers (engl. *frame-transfer*) und des Vollbildtransfers (engl. *full-frame transfer*).

Es sollen hier kurz die wichtigsten Unterschiede in den Konstruktionsweisen bezüglich der Detektion beschrieben werden.

- **vorderseitig belichtet (*frontside-illuminated*):**

Bei den *frontside-illuminated* CCDs dringen die Photonen von der Elektroden­seite her in den Kondensator ein. Diese passieren das polykristalline Silizium und die Oxidschicht, bevor sie in das Substrat gelangen. Vorteile bei dieser Konstruktion sind die geringen Kosten. Allerdings lassen sich durch *front-illuminated* CCDs nur Quanteneffizienzen (siehe Seite 15) von ca. 50% erreichen, da die Photonen entweder gar nicht weit genug in das Substrat hineinreichen, um Elektronen zu befreien, oder sie haben schon beim Durchgang durch die anderen beiden Komponenten zu viel Energie verloren, so dass die restliche Energie kleiner als die der Bandlücke des Halbleiters ist.

- **rückseitig belichtet (*backside-illuminated*):**

Backside-illuminated CCDs sind so konstruiert, dass die Photonen zuerst in das Substrat eindringen. Nur wenige verlassen es durch die Oxidschicht wieder. Der große Vorteil hierin liegt in der besseren Quantenausbeute, die bei rückseitig belichteten CCDs bis zu 95% betragen kann. Ein Nachteil dieser Bauart sind die hohen Herstellungskosten. Wird die Schicht zu dick, werden die Elektronen zu weit weg von der Grenzschicht frei, und gelangen gar nicht in die Verarmungszone. Wird die Schicht zu dünn, haben die Photonen keine Zeit Elektronen zu befreien, so dass die Quantenausbeute deutlich schlechter wird.

Die nachfolgende Aufzählung beschreibt die Unterschiede in den Konstruktionsweisen einer CCD bezüglich des Auslesevorgangs.

- **Zwischenzeilentransfer (*interline transfer*):**

Beim Zwischenzeilentransfer wird jeder Spalte einer CCD eine weitere parallel angeordnet, wobei diese durch eine Abdeckung nicht mitbelichtet wird. Sobald die CCD ausgelesen wird, wandern die gesammelten Elektronen in die benachbarte Spalte und von dort aus weiter zum Auslesverstärker. Jede Spalte besitzt eine parallele Speicherspalte, so dass sich die Gesamtfläche der CCD verdoppelt. Dies kann bei Anwendungen, in denen die Fläche möglichst klein gehalten werden soll nachteilig sein. Allerdings kann man bei dieser Konstruktionsweise die CCD nach einer

Belichtung nahezu gleichzeitig auslesen und neu belichten, da die photoempfindlichen Pixel sehr schnell geleert werden, und wieder neue Elektronen aufnehmen können. Somit hat man bei dieser Bauweise den Vorteil einer sehr schnellen Bildauslese.

- **Bildtransfer (frame transfer):**

Die Variante des Bildtransfers funktioniert ähnlich des Zwischenzeilentransfers. Während dort jede Spalte einzeln abgespeichert wird, wird beim Bildtransfer die gesamte Matrix in ein ebensogroßes Pixelareal geschoben und von dort ausgelesen. Nachteilig hierbei ist, dass es einige hundert μs dauert, bis das gesamte Bild verschoben wurde. Während dieser Zeit wird die CCD weiter belichtet und die Elektronenpakete, die gerade verschoben werden, erhalten zusätzliche Elektronen. Dies kann dazu führen, dass Bilder bei kurzen Belichtungszeiten verschmieren. In der Astronomie hat dieser Effekt aufgrund der langen Belichtungszeiten sehr wenig Einfluss auf die Bildqualität.

- **Gesamtbildtransfer (full frame transfer):**

Beim Gesamtbildtransfer werden alle Pixel nacheinander ausgelesen. Es gibt kein Speicherregister mehr und die lichtempfindliche Fläche muss mit einer Verschlusskappe vor Lichteinfall geschützt werden. Bei dieser Methode besteht die CCD komplett aus lichtempfindlichen Pixeln, so dass die Größe der sensitive Fläche maximal ist, bezogen auf die Gesamtgröße. Diese Variante wird in den meisten CCDs für astronomische Zwecke eingesetzt, da hier schnelle Bildauslese weniger Bedeutung hat.

2.5 Grundgrößen von CCD-Kameras

Die wesentlichen Nennrößen zur Beschreibung einer CCD lassen sich in die Bereiche Signalverhalten und Rauschverhalten einteilen. In folgenden Kapitel werden Signal (Kapitel 2.5.1) und Rauschen (Kapitel 2.5.2) einer CCD genauer beschrieben. Es wird hier eine Auswahl an wichtigen Signal- und Rauschquellen gegeben. Für eine genauere Beschreibung der einzelnen Rauschquellen sei auf Spezialliteratur verwiesen ([5],[6]). So findet in der vorliegenden Arbeit das Digitalisierungs- oder Verstärkerrauschen weniger Beachtung, wie zum Beispiel die Rauschkomponente des Dunkelstroms (s. Kapitel 2.5.1) oder das Ausleserauschen (s. Kapitel 2.5.2). Kapitel 2.5.3 behandelt den Konvertierungsfaktor einer CCD. Diese Größe gibt den Zusammenhang zwischen digitalen Einheiten (ADU) eines Signals und detektierten Elektronen wieder.

2.5.1 Signalverhalten

Eine grundlegende Eigenschaft beim Detektieren von Photonen resp. Licht ist das Photonenrauschen. Photonenrauschen tritt aufgrund der Quantennatur des Lichts auf und folgt der Poissonstatistik. Allgemein gilt für Poissonverteilungen, daßdie Varianz der

Verteilung gleich dem Mittelwert derselben ist. Bezogen auf CCD Signale, in denen poissonverteiltes Photonenrauschen im Signal vorhanden ist, gilt dann:

$$\sigma^2 = S.$$

σ^2 steht generell für die Varianz der Verteilung und S für den Mittelwert. Im speziellen beim Betrachten von CCD-Signalen, steht σ^2 für das Quadrat des Rauschens und S für den Mittelwert des detektierten Signals.

Zum Signalverhalten einer CCD zählen die wichtigen Größen spektrale Empfindlichkeit, Quanteneffizienz, Potentialtopfgröße und der dynamische Bereich. Aus diesen lassen sich dann andere wesentliche Größen berechnen.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der zwei CCDs, werden ausschließlich die digitalen Daten der CCD verwendet. Es benötigt daher keiner genauen Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit oder der Quanteneffizienz, da diese vor dem Prozess der Digitalisierung der Daten bedeutend sind. In den meisten Anwendungen, in denen man eine CCD als Detektor verwendet, sind diese beiden Größen von zentralerer Bedeutung, weswegen sie hier kurz erläutert werden.

- **Spektrale Empfindlichkeit:** Die spektrale Empfindlichkeit gibt an, in welchem Wellenlängenbereich die Pixel Photonen nachweisen können und ist abhängig vom Material des Substrats und der Stärke der Dotierung. Abbildung 2.4 gibt den Verlauf des Absorptionskoeffizienten von Silizium in Abhängigkeit der Wellenlänge bei verschiedenen Dotierungen an.
- **Quanteneffizienz (QE):** Die Quanteneffizienz ist ein Maß für die Umwandlungseffizienz von Photonen in Elektronen und ist abhängig von der Dicke des Substrats und der angelegten Gatespannung. Abbildung 2.5 zeigt als Beispiel die Quanteneffizienzkurven der PIXIS 1024 Kameras. Die Farben stellen verschiedene Modelle dar. Wobei die Unterschiede von der Konstruktionsweise herühren. Die bessere Quanteneffizienz bei rückseitiger Beleuchtung ist gut erkennbar (rote und grüne Kurve).

Neben diesen beiden Größen, die die Detektionsfähigkeit beschreiben, sind für das Signalverhalten noch die Offsetspannung, der Dunkelstrom, die Potentialtopfgröße, das maximal und minimal zu detektierende Signal und der dynamische Bereich von Bedeutung.

- **Biasspannung:** Beim Betrieb einer CCD wird a priori eine Spannung an den Pixeln angelegt, so dass diese einen von Null verschiedenen Wert annehmen, wobei jeder Pixel ungefähr den gleichen Wert besitzt. Kleine Pixel zu Pixel Schwankungen in der Biasspannung sind Bestandteil des Gesamtsystemrauschens (diese Schwankung ist das FPN s. Seite 19). Es wird eine Biasspannung angelegt, um zu verhindern, dass bei der späteren Auswertung Daten mit dem Pixelwert Null auftauchen. Die Stärke der Offsetspannung ist von Modell zu Modell und von Hersteller zu Hersteller verschieden.

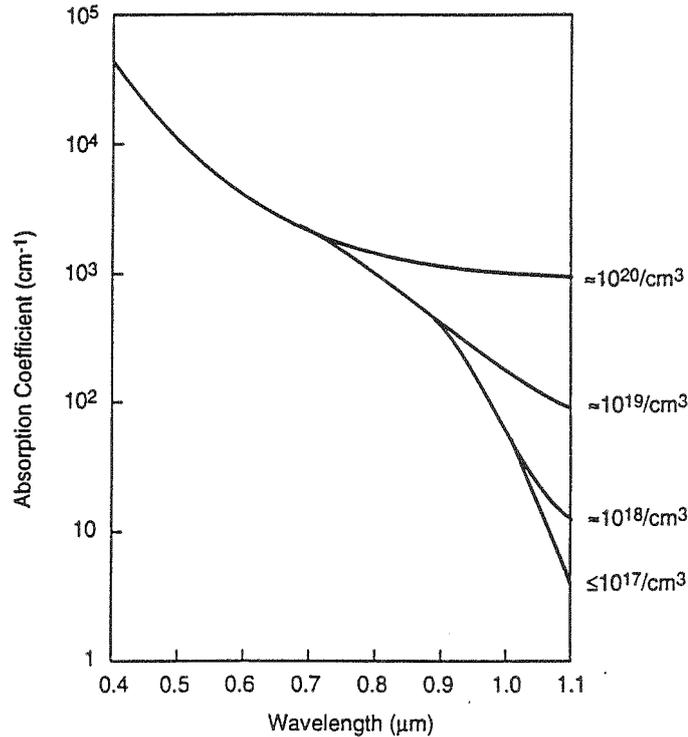


Abbildung 2.4: Absorptionskoeffizient von Silizium in Einheiten von cm^{-1} in Abhängigkeit von der Wellenlänge in Einheiten von μm bei vier verschiedenen Dotierungen. Quelle: [5] Seite 105

- **Dunkelstrom:** Da es sich bei den Pixeln einer CCD um einzelne, kleine Halbleiterkondensatoren handelt, können einige Valenzelektronen aufgrund ihrer thermischen Energie, wenn diese größer ist als die Energiebandlücke des Halbleiters, in das Leitungsband gelangen. Die so erzeugten Elektronen lassen sich nicht von den durch Photonen generierten unterscheiden. Durch thermische Elektronen wird also ein Signal erzeugt, dessen Stärke von der Temperatur und der Zeit der Ladungssammlung abhängt. Dieses Signal ist dem Signal der Offsetspannung und dem zu detektierenden überlagert. Dieser Prozess kann minimiert werden, in dem die CCD gekühlt betrieben wird. Typische Werte für CCD-Kameras in wissenschaftlichen Anwendungen reichen von Dunkelstrom $I_{DS} < 0,1 \frac{e^-}{\text{Pixel} \cdot \text{s}}$ bis hin zu mehreren Elektronen pro Pixel und Sekunde. Mit diesen Angaben kann man eine Abschätzung über den Dunkelstrom bei gegebener Integrationszeit machen.
- **Potentialtopfgröße:** Die maximale Anzahl von Elektronen, die innerhalb eines Pixels gespeichert werden können, wird als Potentialtopfgröße (engl. full well capacity) bezeichnet und in absoluten Elektronenzahlen angegeben. Typische Werte hierfür sind einige zehntausend bis hin zu mehreren hunderttausend Elektronen, je nach Größe der CCD-Detektorfläche und des Konstruktionstyps.

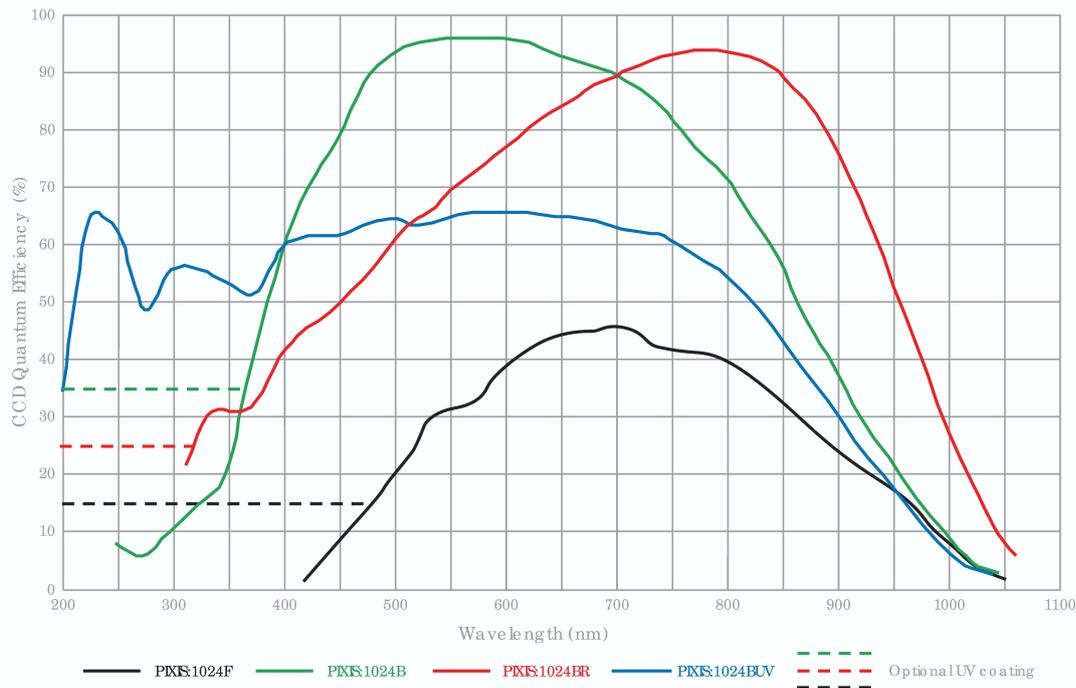


Abbildung 2.5: Dargestellt sind Quanteneffizienzkurven der PIXIS 1024 verschiedener Konstruktionstypen. Bei der roten und grünen Kurve, die die rückseitig zu belichtenden CCDs darstellen, ist die bessere Quantenausbeute zu erkennen. Die schwarze Kurve gibt die Quanteneffizienz einer vorderseitig zu belichtenden CCD an und die blaue Kurve ist eine rückseitig zu belichtende CCD, die speziell im UV Bereich des Spektrums empfindlich ist. Die zur grünen Kurve zugehörige CCD wird bei ALPS verwendet. Quelle: http://www.princetoninstruments.com/Uploads/Princeton/Documents/Datasheets/Princeton_Instruments_PIXIS_1024_Datasheet_rev_M1.pdf

- **minimales Signal:** Das kleinste noch detektierbare Signal einer CCD hängt von seinem Rauschuntergrund ab. Die größte Rauschkomponente des Untergrunds ist das Ausleserauschen. Dieses wird für die Beschreibung des minimal nachweisbaren Signals herangezogen. Man kann also keine signifikanten Signale mehr messen, die im Größenbereich des Ausleserauschens liegen.
- **maximales Signal:** Das größte nachweisbare Signal wird durch die Größe des Potentialtopfes begrenzt. Die Einzelpixel der CCD können nur eine begrenzte Menge an Elektronen speichern, abhängig von der angelegten Gatespannung, der Dotierung des Halbleiters und der Pixelgröße. Werden in einem Pixel einer CCD mehr Elektronen erzeugt, als der Potentialtopf aufnehmen kann, geht das Pixel in Sättigung über. Das heißt, das Signal bleibt konstant, bis auf das überlagerte Rauschen, und überschüssige Elektronen fließen in Richtung Ausleseverstärker. Es werden dabei die Pixel der gleichen Spalte mit den abfließenden Elektronen gefüllt, wobei diese

dann auch in Sättigung übergehen. Es kommt zu Vermischungen und Verschmierungen der Signale der Einzelpixel.

- **dynamischer Bereich:** Der dynamische Bereich einer CCD wird definiert durch den Quotienten aus Potentialtopfgröße und Ausleserauschen. Ausgedrückt in Elektronen gilt für den dynamischen Bereich

$$DB = \frac{N_{TOPF} - n_{Dunkelstrom}}{\sigma_{sys}},$$

wobei N_{TOPF} die Potentialtopfgröße in Einheiten von Elektronen ist, $n_{Dunkelstrom}$ die Anzahl der Elektronen des Dunkelstroms und σ_{sys} das Gesamtsystemrauschen in Elektronen wiedergibt. Der Quotient aus Potentialtopftiefe und Ausleserauschen wird oftmals auch logarithmisch, vor allem in dB ($\log 20$), angegeben. Der genannte Quotient ist außerdem ein Maß für die Anforderungen an den ADC-Wandler. Dieser muss in der Lage sein, den dynamischen Bereich komplett und sinnvoll abzudecken und nicht zu viel Signal durch ein Bit zu digitalisieren.

2.5.2 Rauschen

In den Bereich des Rauschens fallen alle Störsignale, die dem eigentlichen Messsignal überlagert sind. Zu diesen gehören im Wesentlichen das Ausleserauschen, das thermische Rauschen der Halbleiterelektronen und das Photonenrauschen des einfallenden Lichts. Hinzu kommen noch diverse Rauschquellen aufgrund des elektronischen Auslesevorgangs. So wird z.B. ein mehrmals gleich belichtetes Pixel immer ein etwas anderes Signallevel haben. Beim Betrieb einer CCD Kamera tritt im Signal immer ein Rauschanteil auf.

Das Rauschen bei einer CCD hat unterschiedliche Ursachen. Im folgenden werden die wichtigsten Rauschquellen beschrieben. Wichtig in diesem Zusammenhang sind Rauschsignale, die, je nach Signalquelle und -stärke, einen großen Anteil am Gesamtsignal ausmachen können. So besitzt der ADC-Wandler zum Beispiel eine Rauschkomponente aufgrund der endlichen, gestaffelten Spannungsmessintervalle. Diese Rauschkomponente ist im Vergleich zu den Signalen resp. dem Rauschanteil in den empfangenen Signalen klein und wird deshalb hier vernachlässigt.

Rauschen tritt zum einen in einer vom Signal abhängigen Form auf, wie z.B. das Photonenrauschen, das durch die Quantennatur des Lichts hervorgerufen wird. Zum anderen gibt es einige Rauschquellen, die signalunabhängig sind und durch den inneren Aufbau einer CCD hervorgerufen werden. Die Stärken des Rauschsignals können von CCD zu CCD je nach Konstruktion unterschiedlich sein, die Ursache ist jedoch bei allen gleich. Zu den immer gleichen intrinsischen Rauschquellen gehören unter anderem das Rauschen des Dunkelstroms, das Rauschen des Verstärkers, das Rasterrauschen sowie das Ausleserauschen.

Das Rauschen wird meist in Einheiten des quadratischen Mittels (engl. root mean square, rms) angegeben. Die Stärke des Rauschens ergibt sich aus den Standardabweichungen des zufälligen Prozesses, welches das Rauschen verursacht. Im Falle einer CCD

der Prozess der Photonendetektion. Die Leistung des Rauschens setzt sich additiv zusammen, entsprechend addieren sich die rms-Werte quadratisch unter der Quadratwurzel zum Gesamtsystemrauschen. Es gilt:

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2},$$

wobei σ_{sys} für das Gesamtsystemrauschen und σ_i allgemein für eine Rauschquelle i steht. Bei Betrachtung eines Einzelpixels einer CCD bzw. bei Betrachtung der gesamten Detektorfläche wird das Systemrauschen σ_{sys} unterschiedlich zusammengesetzt. Im Fall der Einzelpixelanalyse tritt kein Rasterrauschen auf. Allgemein bedeutet Rasterrauschen, dass es Fluktuationen aufgrund von unterschiedlichen Pixeleigenschaften gibt. Es gibt zwei Arten von Rasterrauschen. Zum einen das ‐Statische Rasterrauschen‐ (FPN, engl. fixed pattern noise), welches aufgrund der Spannungsschwankungen zwischen den einzelnen Pixeln herührt und nahezu konstant bleibt. Zum anderen gibt es noch das Rauschen aufgrund der unterschiedlichen Photoempfindlichkeit der Pixel (PRNU, engl. photoreponse nonuniformity). Je größer der Unterschied in der Empfindlichkeit, desto größer ist das PRNU. Bei Betrachtung eines Einzelpixels einer CCD können für das Rauschen folgende Quellen unterschieden werden:

- **Ausleserauschen:** Das Ausleserauschen ist in jeder CCD-Einheit vorhanden. Es kommt durch die Fluktuationen der Biasspannung zustande und durch den Digitalisierungsprozess des ADC. Das Ausleserauschen ist ein Maß für das Gesamtrauschen, welches durch die Elektronik vom Prozess der Elektronenspeicherung bis hin zum Auslesen verursacht wird.
- **Photonenrauschen:** Das Photonenrauschen besitzt zwei Komponenten. Zum einen das Rauschen aufgrund des Dunkelstroms im Halbleiter und zum anderen das Rauschen der Elektronen, die durch Photonen freigesetzt werden. Beide Rauschquellen sind ununterscheidbar.

Das Photonenrauschen kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\sigma_{ph}^2 = \sigma_{PE}^2 + \sigma_{DS}^2,$$

wobei σ_{ph} das Gesamtphotonenrauschen angibt. σ_{PE} und σ_{DS} sind das Rauschen der Photoelektronen und das Dunkelstromrauschen.

Das Dunkelstromrauschen läßt sich folgendermaßen darstellen:

$$\sigma_{DS} = \sqrt{I_{DS} \cdot t}$$

σ_{DS} steht für die Rauschkomponente des Dunkelstroms in Elektronen, I_{DS} ist der Dunkelstrom mit der Dimension $\frac{e^-}{s}$, t steht für die Zeit in Sekunden, in der Elektronen gesammelt werden.

Im Verlauf der Messungen an den CCDs werden die intrinsischen Rauschquellen (Ausleserauschen, Dunkelstromrauschen) des CCD-Chips untersucht. Die Rauschquellen außerhalb des CCD-Chips (Verstärkerrauschen, Digitalisierungsrauschen des ADC) werden nicht mitbetrachtet. Unter der Voraussetzung der Einzelpixelbetrachtung kann das Gesamtsystemrauschen vereinfacht folgendermaßen beschreiben:

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{PE}^2 + \sigma_{DS}^2 + \sigma_{AR}^2},$$

wobei σ_{sys} das Systemrauschen darstellt. Die anderen Rauschquellen sind das Photoelektronenrauschen (PE), das Dunkelstromrauschen (DS) und das Ausleserauschen (AR). Das Photonenrauschen tritt nur bei Belichtung der CCD auf. Erfolgt eine Datennahme ohne Belichtung, entfällt die Rauschkomponenten der Photoelektronen im Gesamtrauschen. Und es gilt:

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{DS}^2 + \sigma_{AR}^2}.$$

2.5.3 Konversionsfaktor

Grundsätzlich werden beim Auslesen einer CCD Ladungspakete aus Elektronen im Register verschoben. Es werden vom Analog-Digital-Wandler Spannungen mit den Dimensionen $\frac{\mu V}{Pixel}$ gemessen. Dieser wandelt das Spannungssignal in digitale Einheiten um $(\frac{ADU}{Pixel})$.

Der Konversionsfaktor g einer CCD (auch Verstärkungsfaktor genannt, engl. gain) gibt den Zusammenhang zwischen den digitalen Einheiten (ADUs) und den gesammelten Elektronen wieder. Er hat die Dimension $\frac{ADU}{e^-}$.

Es gilt:

$$S_{ADU} = g \cdot n_e,$$

wobei n_e die Gesamtzahl der Elektronen in einem Ladungspaket ist, g ist der Konvertierungsfaktor in Einheiten von $\frac{ADU}{e^-}$ und S_{ADU} ist das in digitalen Einheiten gemessene Signal.

Die Anzahl der hieraus resultierenden Gesamtelektronen n_e gibt keine Auskunft über die Menge der eingefallenen Photonen, sondern nur über die Anzahl der generierten Elektronen. Für eine absolute Angabe der Photonen muss noch die Quanteneffizienz und die spektrale Empfindlichkeit berücksichtigt werden. Diese beiden Größen sind für die Effizienz der Erzeugung von Elektronen verantwortlich und müssen zur Bestimmung der Gesamtphotonen hinzugezogen werden.

Es gilt:

$$S_{ADU} = g \cdot n_e$$

und

$$\sigma_{ADU} = g \cdot \sigma_e,$$

wobei n_e die Gesamtzahl der Elektronen ist, g den Konversionsfaktor angibt und S_{ADU} das gemessene (bekannte, digitalisierte) Signal in Einheiten von ADU ist. σ_e und σ_{ADU} stehen für das Rauschen in Elektronen resp. in ADU.

Aufgrund der Poissonstatistik der Photonen kann man folgende Beziehung angeben:

$$\sigma_e^2 = n_e$$

Zusammen mit den oben angegebenen Gleichungen, die den Zusammenhang zwischen den Signalen und dem Rauschen darstellen, kann man nun folgenden Zusammenhang herleiten:

$$\begin{aligned} S_{ADU} &= g \cdot n_e \\ \sigma_{ADU}^2 &= g^2 \cdot n_e \\ \Rightarrow \frac{S_{ADU}}{g} &= \frac{\sigma_{ADU}^2}{g^2} \\ \Rightarrow g &= \frac{\sigma_{ADU}^2}{S_{ADU}} \end{aligned}$$

Somit kann man den Konversionsfaktor allein aus den bekannten digitalen Größen (σ_{ADU} und S_{ADU}) herleiten. Man muss dazu die Varianz σ^2 gegen das Signal S auftragen. Der Quotient aus beiden ergibt den Verstärkungsfaktor.

Die Berechnung des Konversionsfaktors anhand des Signals und der Varianz bezieht sich auf die freigesetzten Elektronen. Die Varianz des Ausleserausens σ_{AR}^2 und das Biassignal S_{Bias} sind von den verwendeten Größen σ_{ADU} und S abzuziehen, um ausschließlich die statistischen Effekte des belichteten Bildes zu erhalten.

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen der beiden Kameras SBIG-ST7E und SBIG-402ME dargestellt. Das Kapitel 3.1 führt die Kameracharakteristika ein. In Kapitel 3.2 werden die zur Datennahme verwendeten Programme aufgeführt. In Kapitel 3.3 werden die Ergebnisse der Messungen von Dunkelstrom, Biasspannung, Ausleserauschen und Konversionsfaktor aufgeführt. In Kapitel 3.4 werden die gemessenen Werte mit den Angaben des Herstellers verglichen und interpretiert und die gesammelten Erkenntnisse bei der Bestimmung des Konversionsfaktor für den ALPS-Detektor zusammengefasst.

3.1 Kameras

Bei den CCD-Kameras, an denen Untersuchungen vorgenommen wurden, handelt es sich um zwei Modelle des Herstellers SBIG (Santa Barbara Instrument Group, www.sbig.com/). Zum einen um die SBIG-ST7E (Bedienungsanleitung siehe www.sbig.com/pdffiles/st789man.pdf) und zum anderen um die SBIG-402ME (Bedienungsanleitung siehe www.sbig.com/pdffiles/st402man.pdf).

In Tabelle 3.1 sind die Charakteristika der SBIG-Kameras, wie der Hersteller sie angibt, aufgeführt. Die Daten stammen aus der Betriebsanleitungen und werden im Folgenden überprüft und interpretiert. Beide CCD-Chips sind von der Konstruktionsweise vorderseitig-belichtet und lesen die Ladungen durch einen Gesamtbildtransfer aus.

	SBIG-7E	SBIG-402ME
CCD-Größe	6,9 x 4,6 mm	6,9 x 4,6 mm
Pixelgröße	9 x 9 μm	9 x 9 μm
Pixelanzahl	765 x 510	765 x 510
Dunkelstrom	$< 0,2 \frac{e^-}{\text{Pixel}\cdot\text{s}} (-10^\circ\text{C})$	$1 \frac{e^-}{\text{Pixel}\cdot\text{s}} (0^\circ\text{C})$
Ausleserauschen	$15 e^- \text{rms}$	$17 e^- \text{rms}$
Gainfaktor	$2,3 \frac{e^-}{\text{ADU}}$	$1,5 \frac{e^-}{\text{ADU}}$

Tabelle 3.1: Kenngrößen der SBIG Kameras.

3.2 Datennahme und Auswertungsverfahren

Die Steuerung und Datennahme der Kameras erfolgt mit Hilfe des Programmes CCDOPS von SBIG. Auf der Herstellerseite ist die aktuelle Version verfügbar. (www.sbig.com/sbwhtmls/softpage.htm). Mit Hilfe von CCDOPS können alle Kameras von SBIG gesteuert werden. Eine Anleitung findet sich entweder in der programmeigenen Hilfe oder ebenfalls auf der Webseite des Herstellers (www.sbig.com/sbwhtmls/softpage.htm). Das Programm wird hier zur Aufnahme von Bildern verwendet und nicht zu statistischen Untersuchungen herangezogen. Das Programm bietet die Möglichkeit, die Kühlleistung der Peltier-Elemente in den CCDs zu regulieren. Die Aufnahmen werden im Dateiformat FITS (Flexible Image Transport System) gespeichert. Die Entwicklung von CCDOPS für Linux-Systeme wird von Herstellerseite nicht unterstützt und private Entwicklungen wurden seit dem Linux Kernel 2.4 nicht weiter fortgeführt, so dass für die Datennahme CCDOPS unter Windows verwendet wird.

Zur Auswertung und Analyse der Daten wird IDL (Interactive Data Language) verwendet. Im Wesentlichen kommen die Statistikwerkzeuge von IDL zum Einsatz, um die Daten bezüglich Rauschen und Signal zu analysieren. Für eine detaillierte Beschreibung über IDL wird hier auf die Herstellerseite verwiesen (www.itervis.com/). Im Rahmen der Datenauswertung wurde vom DESY eine IDL-Lizenz zur Verfügung gestellt.

3.3 Bestimmung der Grundgrößen

Die Messungen an den Kameras wurden bei maximaler Kühlung durchgeführt. Die Kühlleistung der Kameras lag bei beiden Kameras bei 95 %. Bei dieser Kühlleistung arbeitet das Peltier-Element konstant, wohingegen bei 100% Kühlleistung Temperaturfluktuationen auftreten. Die Temperatur bei den Dunkelmessungen lag bei der SBIG-ST7E bei -10°C und bei der SBIG-402ME bei -5°C . Die Angaben des Herstellers bei der SBIG-402ME bezüglich des Dunkelstroms werden bei einer Temperatur von 0°C angegeben. Es wurde für die Messung eine geringere Temperatur gewählt, um den minimalen Dunkelstrom zu messen. Für die Dunkelaufnahmen wurden die Kamerablenden zusätzlich verdeckt.

3.3.1 Biasspannung

Für die Bestimmung der Biasspannung werden 100 Dunkelaufnahmen mit der kürzesten Integrationszeit gemacht. Die Blende der Kamera ist verschlossen und es wird schnellstmöglich nach Beginn der Aufnahme ausgelesen. Die kleinst möglichen Aufnahmezeiten sind bei der SBIG-ST7E 0,12 s und bei der SBIG402-ME 0,04 s. Die so gewonnenen Bilder werden Biasaufnahmen genannt und geben Aufschluss über den vorhandenen Spannungswert (Bias) an den Pixeln. In dieser kurzen Zeit gibt es nahe zu keinen Dunkelstrom, da keine Elektronen thermisch freigesetzt werden. Das ausgelesene Signal wird allein vom vorhandenen Spannungswert erzeugt und der Pixelmittelwert einer Biasauf-

nahme ist ein Maß für diesen:

$$\bar{p}_i = \frac{\sum_k p_k}{N}$$

Hierbei steht \bar{p}_i für den Pixelmittelwert des Bildes i , der sich aus der Summe aller Pixelwerte p_k von einem Bild mit k Pixeln bei einer Gesamtzahl von N Pixeln ergibt. Für die SBIG-ST7E ergibt sich ein mittlerer Biaswert von $109,36 \pm 0,45$ ADU und für die SBIG-402 liegt dieser bei $1037,00 \pm 1,22$ ADU. Die 100 Werte \bar{p}_i werden in Abbildung 3.1 für die SBIG-ST7E und in Abbildung 3.2 für die SBIG-402ME als Häufigkeitsverteilung $H(\bar{p}_i)$ dargestellt.

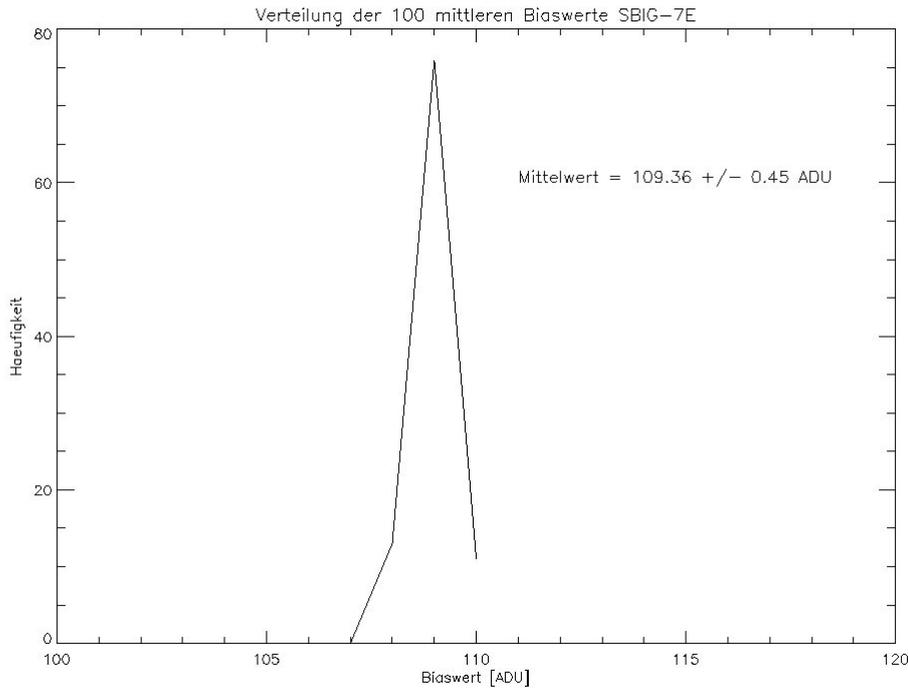


Abbildung 3.1: Häufigkeitsverteilung der Biasspannung der SBIG-ST7E. Die Biaswerte \bar{p}_i [ADU] sind auf der x-Achse aufgetragen. Die Werte $H(\bar{p}_i)$ der y-Achse geben die Häufigkeit des Wertes p_i an.

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

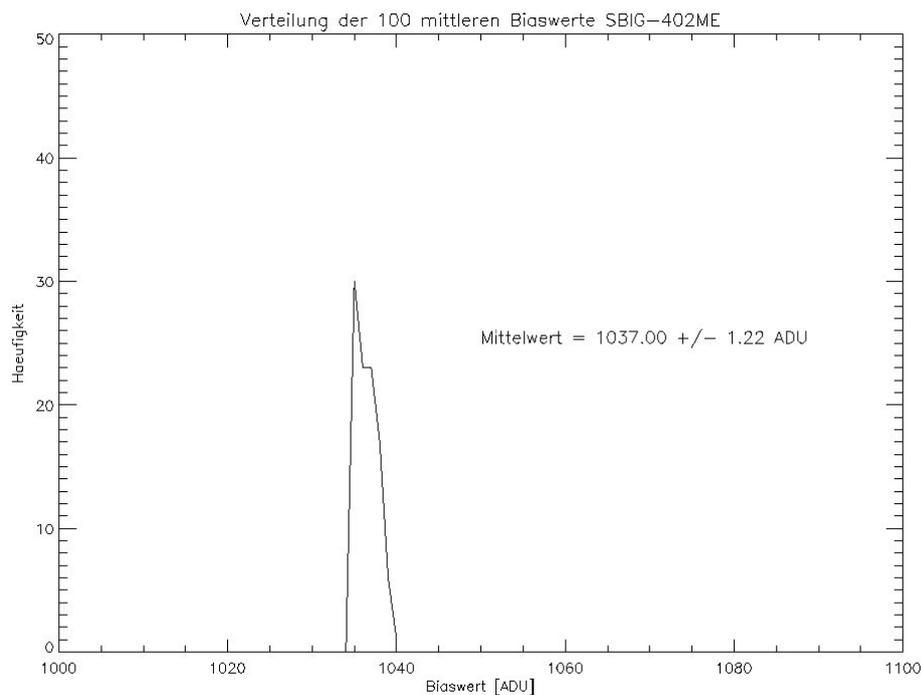


Abbildung 3.2: Häufigkeitsverteilung der Biasspannung der SBIG-402ME. Die Biaswerte \bar{p}_i [ADU] sind auf der x-Achse aufgetragen. Die Werte $H(\bar{p}_i)$ der y-Achse geben die Häufigkeit des Wertes p_i an.

In den Abbildungen 3.3 und 3.4 sind Profile der Biasspannungen entlang der Achsen der CCD dargestellt. Für jede Kamera wurde dabei der mittlere Biaswert

$$B_x = \left(\frac{\sum_y p_y}{510} \right)_x$$

der Spalte x und der mittlere Biaswert

$$B_y = \left(\frac{\sum_x p_x}{765} \right)_y$$

der Zeile y bestimmt und gegen die Zeilen- (510 Pixel) bzw. Spaltenkoordinaten (765 Pixel) aufgetragen.

Es ist ersichtlich, dass bei beiden Kameras in x-Richtung ein Gradient vorhanden ist, d.h. die Pixelwerte bei kleinen und großen x-Koordinaten unterschiedlich sind. Bei der SBIG-ST7E liegt der Unterschied bei den Pixelwerten etwa bei 20 ADUs und bei der SBIG-402ME bei etwa 150 bis 200 ADUs. Bezogen auf die Biasspannungen sind die maximalen Differenzen in etwa gleicher Größenordnung von 10%. Dieser Effekt kann durch die Spannungsversorgung bzw. den Verstärker ausgelöst werden, da Pixel die dem Verstärker lokal näher sind, auch mit mehr Spannung versorgt werden können. Die errechneten Mittelwerte für die Biasspannungen stehen somit nicht global für die CCD, sondern nur für die Fläche in der Mitte.

3.3 Bestimmung der Grundgrößen

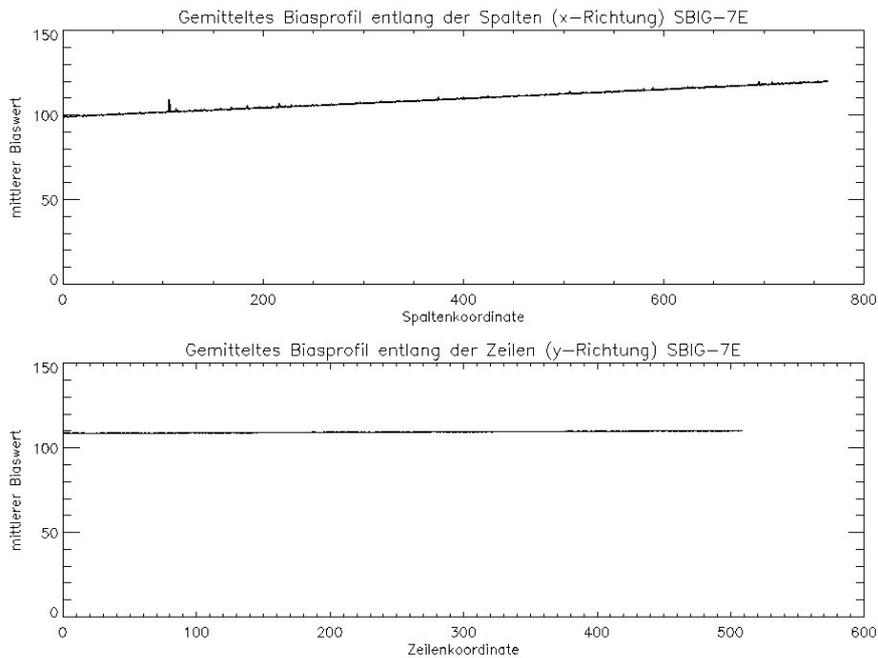


Abbildung 3.3: Profile SBIG-ST7E. obere Abbildung: Profil entlang der x-Achse, untere Abbildung: Profil entlang der y-Achse.

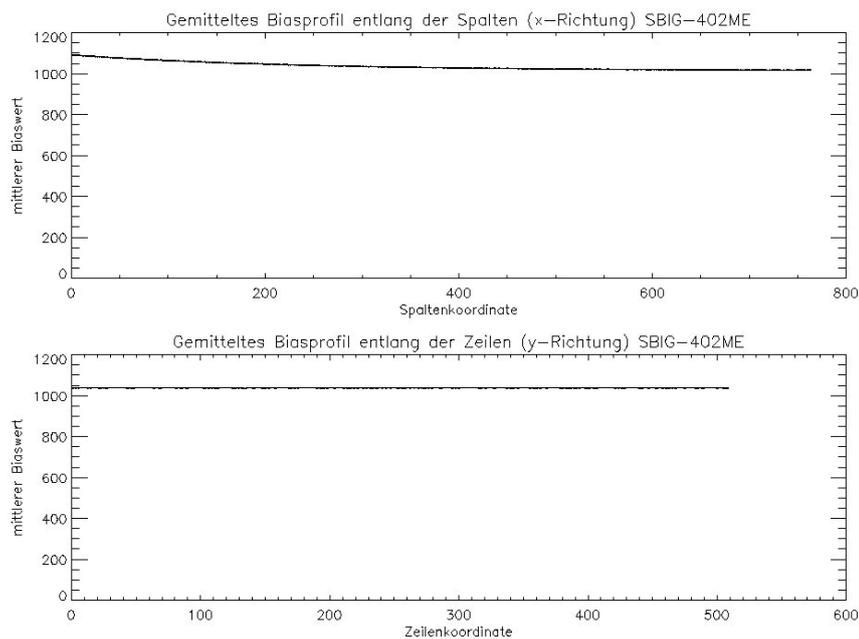


Abbildung 3.4: Profile der SBIG-402ME. obere Abbildung: Profil entlang der x-Achse der CCD, untere Abbildung: Profil entlang der y-Achse.

3.3.2 Dunkelstrom

Für die Messung des Dunkelstroms an den Kameras wurden jeweils $i = 20$ Dunkelaufnahmen bei 6 unterschiedlichen Integrationszeiten von $T = 10, 20, 30, 40, 50$ und 60 Minuten aufgenommen. Es wird danach von jeder gewonnenen Aufnahme ein Biasbild subtrahiert. Der Wert des Dunkelstroms $I_{DS} |_T$ [ADU] bei fester Zeit T wird durch folgende Mittelwertbildung berechnet:

$$I_{DS} |_T = \frac{\sum_i \left(\frac{\sum_k p_k}{N} \right)_i}{i} |_T$$

Hierbei steht p_k für den Wert des k -ten Pixels, N für die Gesamtzahl 390150 der Pixel auf der CCD, i steht für die Aufnahme und die 20 resultiert aus der Gesamtzahl von 20 Aufnahmen pro Zeit T . Es werden die so gewonnenen Signalwerte I_{DS} bei den Zeiten T in Abbildung 3.5 für die SBIG-ST7E und in Abbildung 3.6 für die SBIG-402ME aufgetragen. Durch Bestimmung der Steigung einer Geraden durch diese Datenpunkte, wird der Dunkelstrom berechnet. Die berechneten Werte des Dunkelstroms sind $0,0992 \pm 0,0004 \frac{ADU}{s \cdot Pixel}$ für die SBIG-ST7E und $0,0273 \pm 0,0018 \frac{ADU}{s \cdot Pixel}$ für die SBIG-402ME.

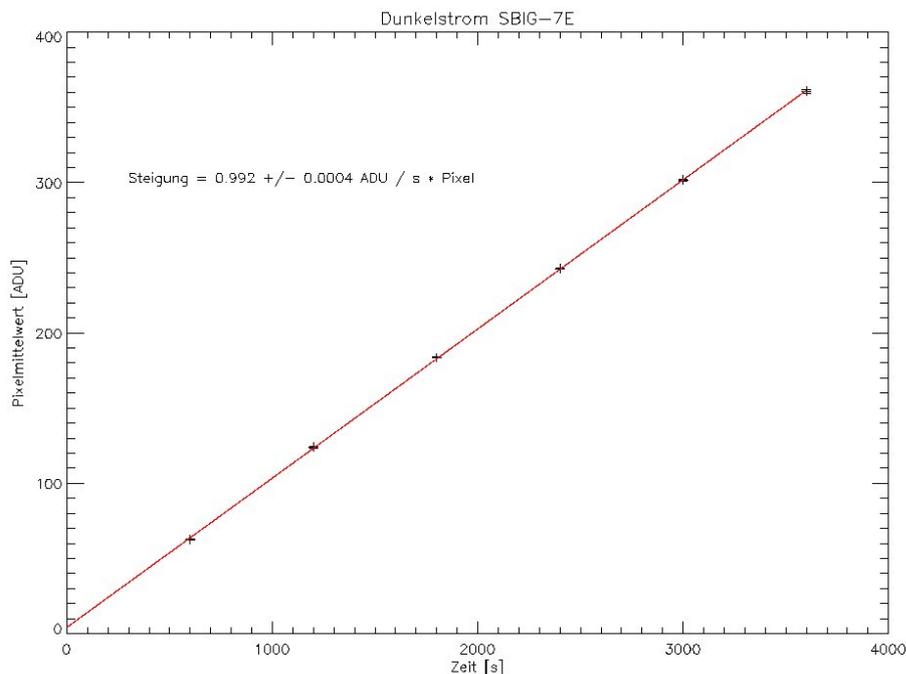


Abbildung 3.5: Dunkelstrom der SBIG-ST7E. Aufgetragen sind die 6 Werte für $I_{DS} |_T$. Die rote Gerade ist die Ausgleichsgerade durch die Datenpunkte. Die Steigung der Geraden gibt den Dunkelstrom $\left[\frac{ADU}{s \cdot Pixel} \right]$.

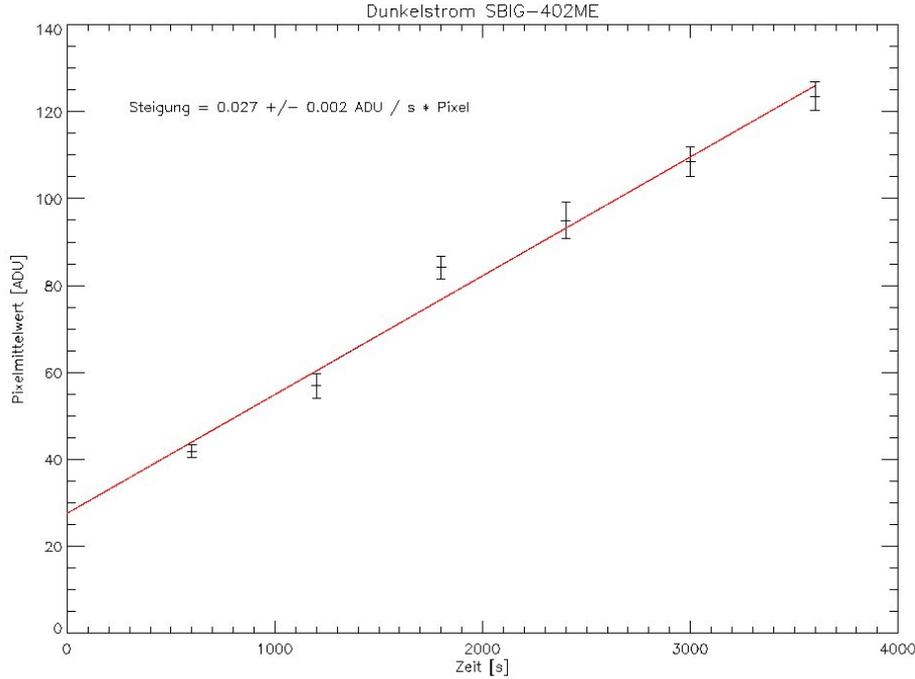


Abbildung 3.6: Dunkelstrom der SBIG-402ME. Aufgetragen sind die 6 Werte für $I_{DS}|_T$. Die rote Gerade ist die Ausgleichsgerade durch die Datenpunkte. Die Steigung der Geraden gibt den Dunkelstrom $[\frac{ADU}{s \cdot Pixel}]$ an.

3.3.3 Rauschen

Das Ausleserauschen der CCDs wird durch die Bildung eines Differenzbildes aus zwei Biasaufnahmen berechnet. Hierfür werden je Kamera 2 Biasbilder voneinander subtrahiert. Das so erstellte Bild hat als Mittelwert idealerweise den Wert Null, da für jedes Pixel die Biasspannungen verschwinden. Die Fluktuation in den Signalwerten der Pixel ist das Ausleserauschen σ_{AR} . Dieses berechnet sich über die Standardabweichungen

$$\sigma_{DB} = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - \bar{p})^2}{(n-1)}}$$

des Differenzbildes zu $\sigma_{AR} = \frac{\sigma_{DB}}{\sqrt{2}}$ mit den Pixelwerten p_i des i -ten Pixels und dem Pixelmittelwert \bar{p} . Bei der SBIG-7E bestimmt sich der Wert des Ausleserausens σ_{AR} zu $4,71 \pm 0,01$ ADU und bei der SBIG-402ME zu $11,74 \pm 0,01$ ADU.

Mit Hilfe des Dunkelstromrauschens und des Ausleserausens ist es möglich das Gesamtsystemrauschen bei Dunkelaufnahmen, also ohne Photoneneinfall zu bestimmen. Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen das Gesamtsystemrauschen

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{AR}^2 + I_{DS} \cdot t}$$

der Kameras. Bei der SBIG-7E dominiert das Rauschen des Dunkelstroms, wohingegen der Beitrag bei der SBIG-402ME über die gesamte Integrationszeit klein bleibt. Da der

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

Wert des Dunkelstroms eine Differenz von $0,072 \frac{ADU}{Pixel \cdot s}$ aufweist ist bei der SBIG-ST7E ein größeres Gesamtrauschen zu erwarten.

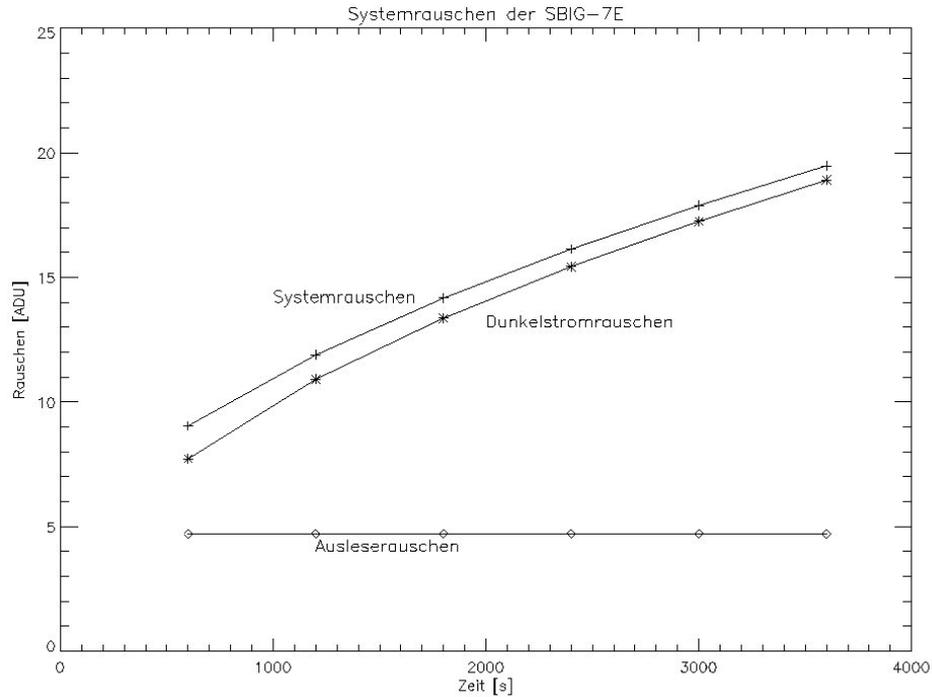


Abbildung 3.7: Gesamtrauschen der SBIG-7E. Es wurden die gemessenen Werte des Dunkelstroms (unterste Kurve) und des Ausleserauschen (konstante Gerade) zum Gesamtrauschen zusammengefasst (Rechnung siehe Text). Die oberste Kurve gibt das Gesamtrauschen wieder

3.3.4 Konversionsfaktor

Zur Bestimmung des Konversionsfaktors einer CCD werden belichtete Aufnahmen gemacht. Die Signalstärke auf dem gesamten Chip ist bei den belichteten Aufnahmen überall nahezu gleich, weshalb man von flachen Bildern spricht (engl. flat-fields). Die zur Berechnung des Konversionsfaktors herangezogenen Größen Signal S_{ADU} und Varianz σ_{ADU}^2 werden in diesen Bildern innerhalb eines Pixelbereichs bestimmt. Das Signal S_{ADU} ergibt sich aus der Bildung des Mittelwertes

$$S_{ADU,i} = \frac{\sum_k p_{k,i}}{N}$$

der p_k -Pixelwerte des Bildes i , wobei N die Gesamtzahl der Pixel des betrachteten Bereichs ist. Die Varianz σ_{ADU}^2 bestimmt sich aus der Standardabweichung

$$\sigma_{ADU} = \sqrt{\frac{\sum_k p_{k,i} - S_{ADU,i})^2}{N - 1}}$$

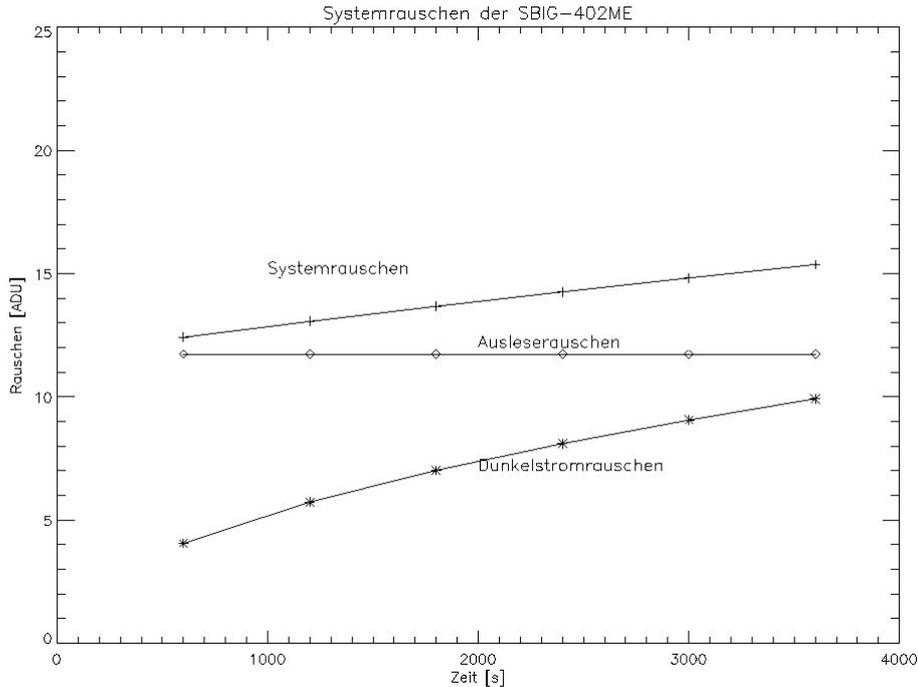


Abbildung 3.8: Gesamtrauschen der SBIG-402ME. Es wurden die gemessenen Werte des Dunkelstroms (unterste Kurve) und des Ausleserauschen (konstante Gerade) zum Gesamtrauschen zusammengefasst (Rechnung siehe Text). Die oberste Kurve gibt das Gesamtrauschen wieder

der Verteilung der p_k -Pixelwerte des Bildes i . Vom Signal wird die Biasspannung und von der Varianz das Quadrat des Ausleserauschen subtrahiert. Der auf diese Weise bestimmte Konversionsfaktor ist als Mittelwert stellvertretend für die gesamte CCD-Fläche.

Die Detektion von Photonen beim ALPS-Experiment soll durch einen Einzelpixel erfolgen, bzw. der Detektionsbereich hat eine Größe von 5×5 Pixeln. Es ist daher von Interesse den Konversionsfaktor der verwendeten Pixel zu kennen, um Einzelphotoneignisse rekonstruieren zu können. Im Folgenden soll versucht werden den Konversionsfaktor einer CCD auf zwei unterschiedliche Weisen zu bestimmen. Bei Methode A werden dabei Bereiche und Flächen der CCD untersucht und mit oben genanntem Verfahren wird ein mittlerer Wert für den Konversionsfaktor berechnet. Bei Methode B wird ein Einzelpixel betrachtet, wobei sich die Größen Varianz und Signal für das zu untersuchende Pixel aus einem Ensemble von Werten des Pixels ergibt, das aus einer Reihe von Aufnahmen entstammt und nicht wie bei Methode A aus einem Ensemble von Pixelwerten innerhalb einer Aufnahme. Zur Überprüfung der Methode B können die errechneten Werte aus Methode B mit denen aus Methode A verglichen werden. Bei Methode A werden der Pixelmittelwert und die Varianzen für den Bereich $x=400-500$ und $y=200-300$ in Pixelkoordinaten bestimmt, da hierfür bei der SBIG-7E ein flacher Bereich in den flat-field Aufnahmen identifiziert wurde. Für einen Vergleich der Metho-

den für jede Kamera wurde bei der SBIG-402ME ebenfalls der Bereich $x=400-500$ und $y=200-300$ gewählt.

Es wurden an den Kameras keine Objektive oder andere auf die CCD abbildende Komponenten verwendet, so dass die Aufnahme der flat-fields durch Abdecken der CCD mit weißem Papier erfolgte. Es wurde solange belichtet, bis die Pixel auf den CCDs zu etwa 50 % gefüllt sind. Zum einen sollten es nicht mehr sein, da man dann schnell in den Bereich der Sättigung gelangt, zum anderen sollten es nicht zu wenig sein, damit der relative Fehler

$$\frac{\Delta S_{ADU}}{S_{ADU}} = \frac{\sqrt{S_{ADU}}}{S_{ADU}} = \frac{1}{\sqrt{S_{ADU}}}$$

des Signals klein ist. Bei der SBIG-ST7E wurde so lange belichtet, bis in etwa 27000 ADU detektiert wurden und bei der SBIG-402 etwa 29000 ADUs.

- **Methode A:** Es wurden für jede Kamera 100 flat-fields aufgenommen. Bei den 100 Aufnahmen werden die Signale und Varianzen des Feldes $x=400-500$ und $y=200-300$ gemessen und die Werte in Abbildung 3.9 für die SBIG-ST7E und in Abbildung 3.10 für die SBIG-402ME dargestellt. Der Konversionsfaktor g ergibt sich als Mittelwert

$$g = \bar{g}_i = \frac{\overline{\sigma_{ADU,i}^2}}{S_{ADU,i}} = \frac{\sum_i \frac{\sigma_{ADU,i}^2}{S_{ADU,i}}}{I}$$

aus den Quotienten der Varianz $\sigma_{ADU,i}^2$ und des Signals $S_{ADU,i}$ der $I=100$ Aufnahmen für alle Werte der insgesamt $k = 765 \cdot 510$ Pixel.

Der so errechnete Wert für den Konversionsfaktor beträgt bei der SBIG-7E $2,42 \pm 0,16 \frac{e^-}{ADU}$ und bei der SBIG-402ME $1,38 \pm 0,02 \frac{e^-}{ADU}$.

Bei einer weiteren Untersuchung des Konversionsfaktors mit Methode A werden die Feldgrößen variiert. Hierbei wurde der flache Bereich $x=400-500$ und $y=200-300$ auf der CCD ausgewählt und um den Mittelpunkt dieses Feldes werden verschieden große Gebiete auf ihren Gain untersucht. Das kleinste Gebiet ist ein 3×3 Pixelbereich um den Mittelpunkt. Das größte Feld ist der 100×100 Pixel große flache Bereich. Es werden die Mittelwerte des Signals und die Varianzen des entsprechenden Feldes der 100 Aufnahmen gemessen. In Abbildung 3.11 sind die Varianzen der Testfelder gegen die jeweiligen Signale für die SBIG-ST7E aufgetragen und in Abbildung 3.12 für die SBIG-402ME. Es ist ersichtlich, dass die Wahl der Feldgröße einen signifikanten Einfluss auf den errechneten Wert des Konversionsfaktors hat. Je größer des Testfeld gewählt wird, desto weniger streuen die Datenpunkte aus Signal und Varianz. Bei der Betrachtung eines kleinen Feldes werden weniger Datenpunkte zur Bestimmung des Signals verwendet, so dass dadurch der relative Fehler

$$\frac{\Delta S_{ADU}}{S_{ADU}} = \frac{\sqrt{S_{ADU}}}{S_{ADU}} = \frac{1}{\sqrt{S_{ADU}}}$$

der Signalwerte S_{ADU} groß ist.

3.3 Bestimmung der Grundgrößen

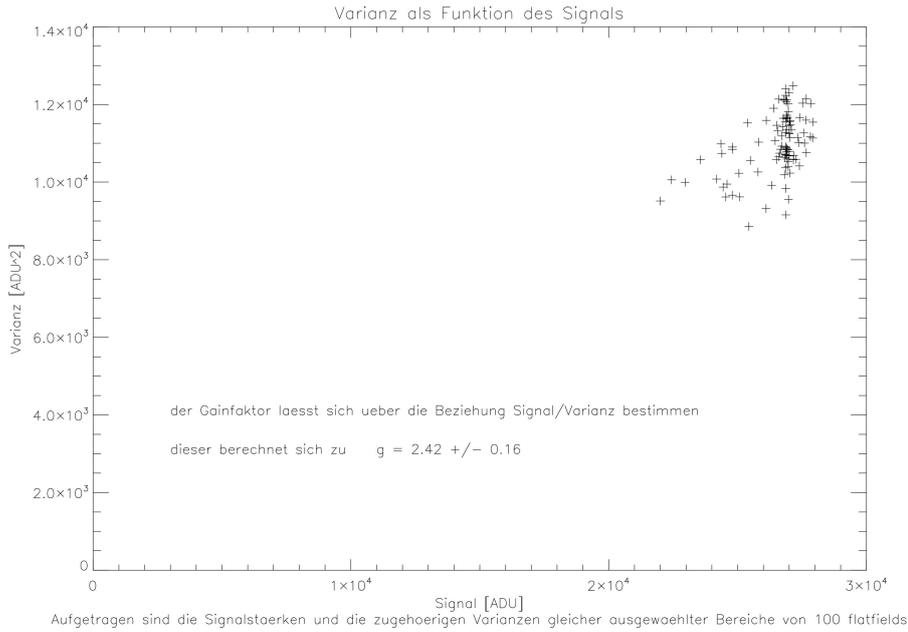


Abbildung 3.9: Signale und Varianzen SBIG-ST7E. Die Werte beziehen sich auf den ausgewählten Bereich (Pixelkoordinaten $x=400-500$, $y=200-300$).

Das Feld zur Berechnung des Konversionsfaktors sollte dementsprechend mindestens 50×50 Pixel enthalten. Bei Vergrößerung des Bereichs strebt der berechnete

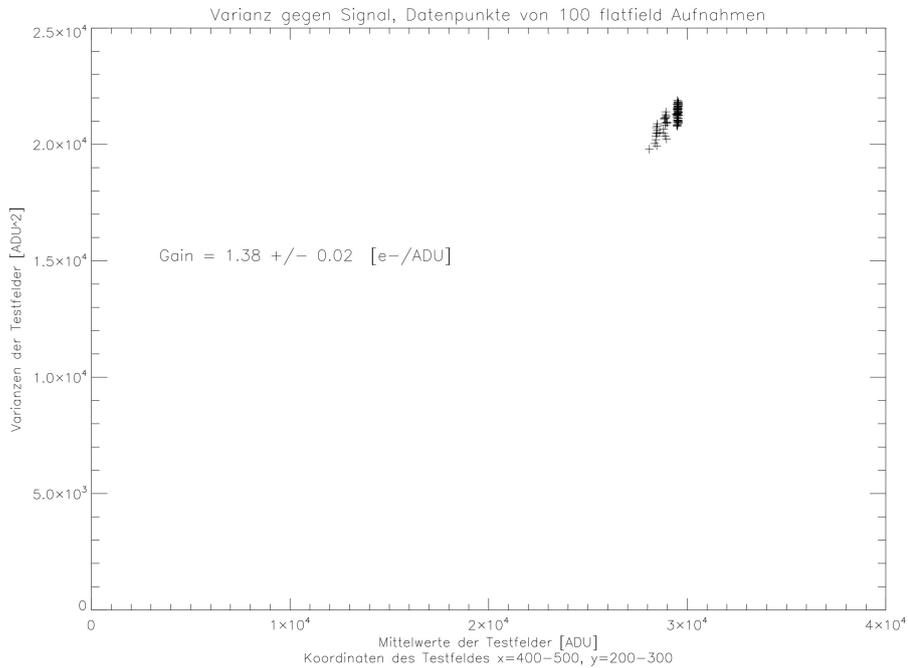


Abbildung 3.10: Signale und Varianzen der SBIG-402ME. Die Werte beziehen sich auf den ausgewählten Bereich (Pixelkoordinaten $x=400-500$, $y=200-300$).

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

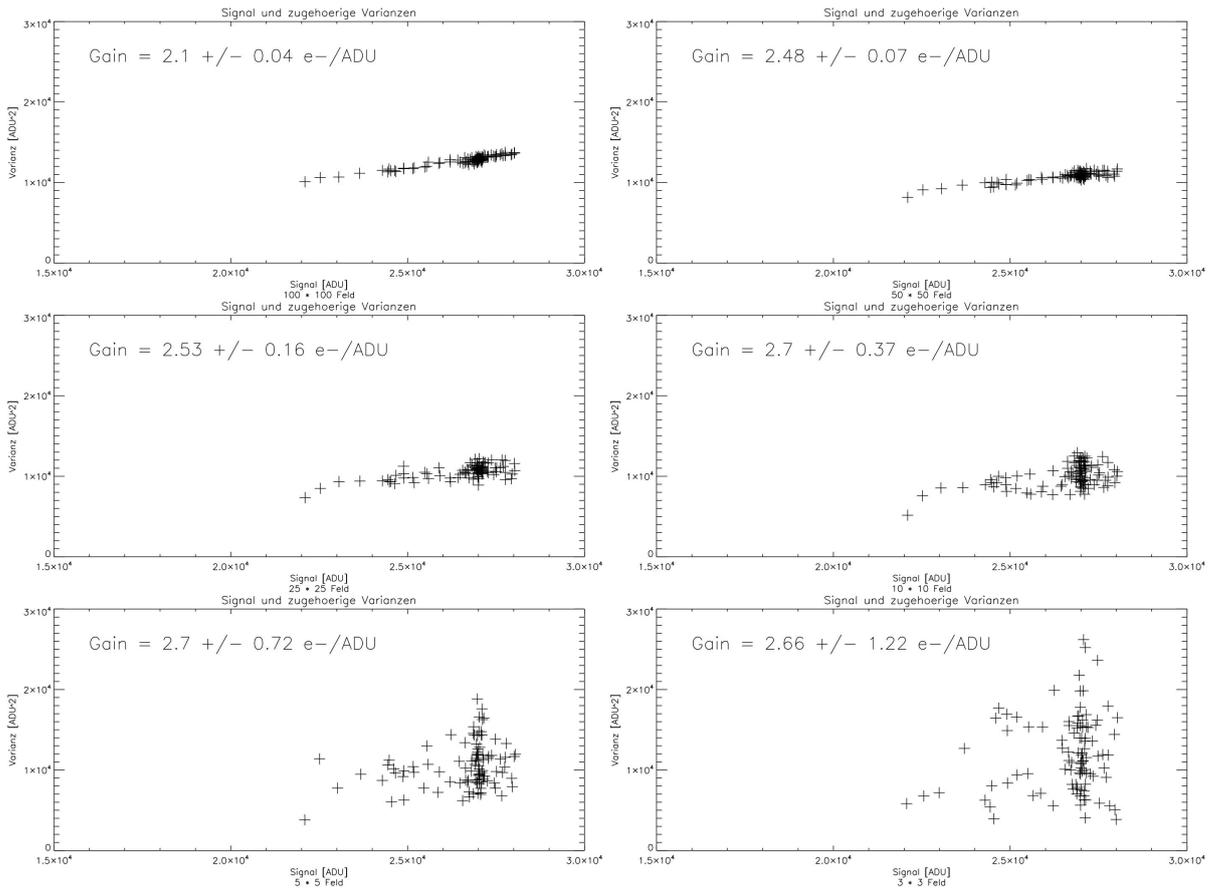


Abbildung 3.11: Signal und Varianzen der SBIG-ST7E. Von links oben nach rechts nimmt die Größe des Feldes von 100 · 100 Pixeln hin bis 3 · 3 Pixeln ab. Auf der x-Achse sind die Signale der Felder aufgetragen und auf der y-Achse die Varianzen.

Mittelwert einem Grenzwert entgegen, der mit dem Konversionsfaktor bei Betrachtung des 100 x 100 Feldes übereinstimmt.

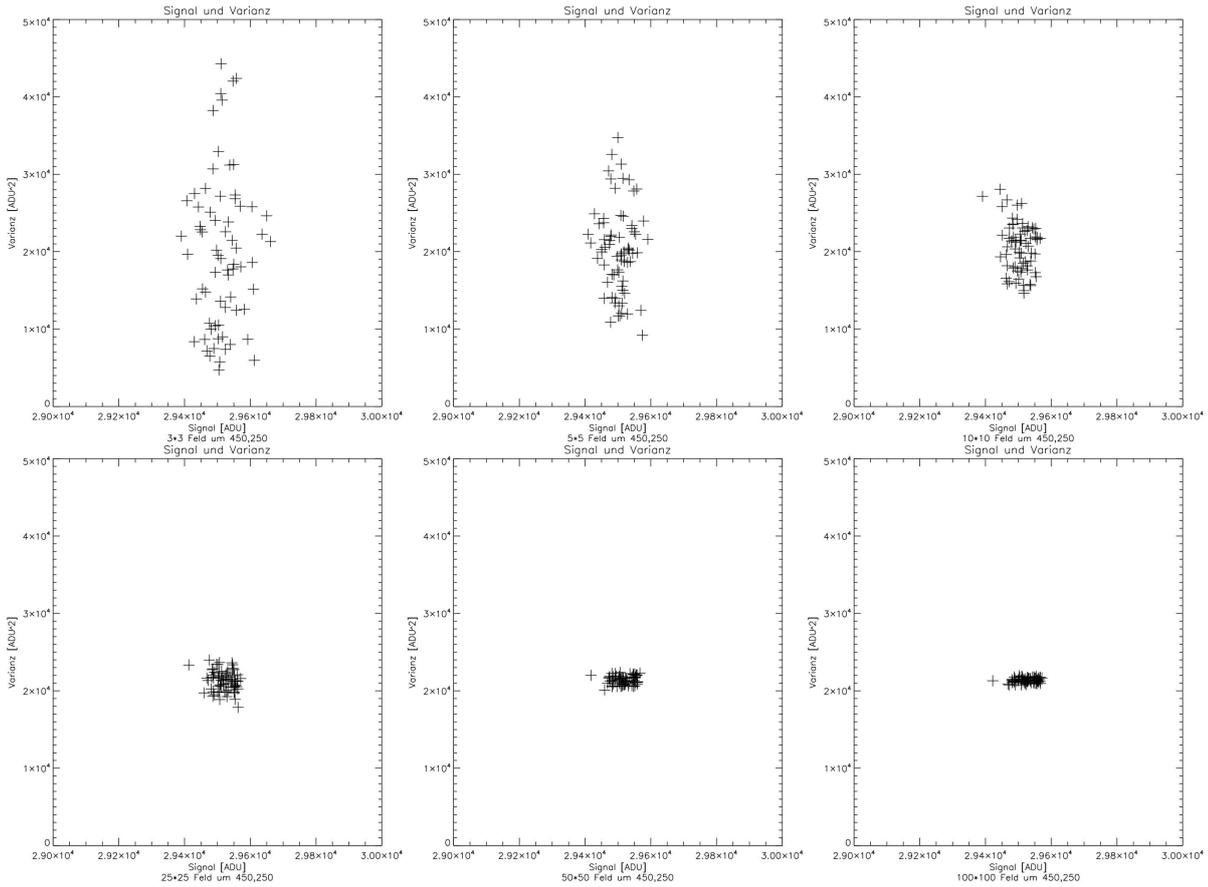


Abbildung 3.12: Signal und Varianzen der SBIG-402ME. Von links oben nach rechts unten nimmt die Größe des Feldes von $3 \cdot 3$ Pixeln bis $100 \cdot 100$ Pixeln zu. Auf der x-Achse sind die Signale der Felder aufgetragen und auf der y-Achse die Varianzen.

- **Methode B:** Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf Messungen an Einzelpixeln. Der Wert des Konversionsfaktors g mit Methode B berechnet sich aus dem Mittelwert der Pixelwerte g_k des k -ten Pixels aus den $I=100$ Aufnahmen gemäß :

$$g = \overline{g_k} = \frac{\overline{\sigma_{ADU,k}^2}}{S_{ADU,k}} = \frac{\sum_i \sigma_{ADU,i,k}^2}{I}.$$

Es wird ein Bild produziert, in dem jeder Pixelwert des k -ten Pixels den Konversionsfaktor g_k repräsentiert. In den Abbildungen 3.13 und 3.14 sind die errechneten Werte der Konversionsfaktoren g_k für alle Pixel als Häufigkeitsverteilungen $H(g_k)$ dargestellt. Für die SBIG-ST7E ergibt sich ein mittlerer Konversionsfaktor von $2,97 \pm 0,44 \frac{e^-}{ADU}$ und für die SBIG-402ME von $1,52 \pm 0,27 \frac{e^-}{ADU}$. Bei den Verteilungen ist erkennbar, dass die Konversionsfaktoren der Einzelpixel um einen Mittelwert schwanken. Das bedeutet, dass die Konversionsfaktoren der Einzelpixel unterscheiden sich voneinander.

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

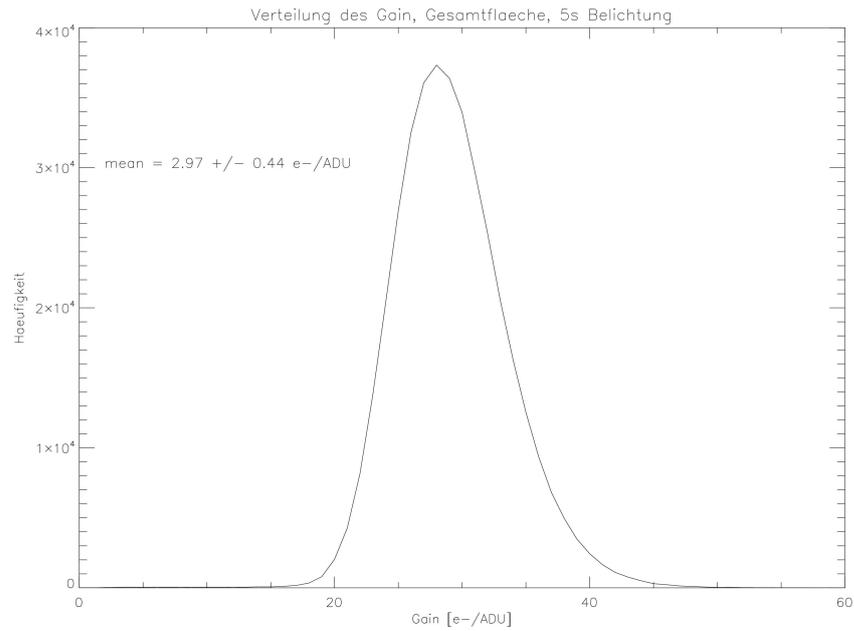


Abbildung 3.13: Häufigkeitsverteilung $H(g_k)$ (y-Achse) der Gainwerte g_k (x-Achse) von Einzelpixeln der SBIG-ST7E. Die y-Koordinate gibt den Wert des Konversionsfaktors in $\frac{e^-}{ADU} \cdot 10$ an.

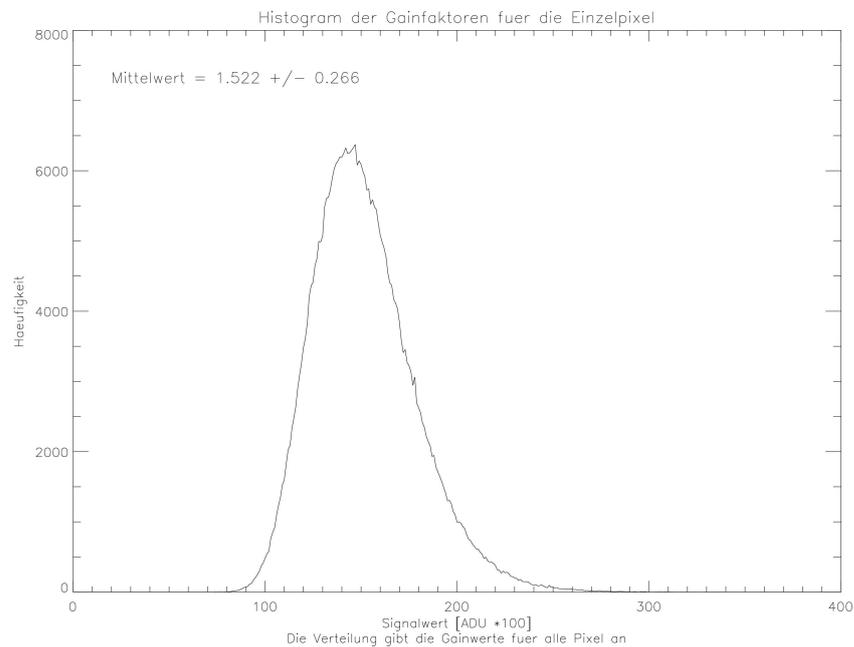


Abbildung 3.14: Häufigkeitsverteilung $H(g_k)$ (y-Achse) der Gainwerte g_k (x-Achse) von Einzelpixeln der SBIG-402ME. Die y-Koordinate gibt den Wert des Konversionsfaktors in $\frac{e^-}{ADU} \cdot 100$ an.

Die Analyse der Fluktuationen von Einzelpixeln im Wert des Konversionsfaktors wird durch die Betrachtung der 9 mittleren Pixel der SBIG-ST7E vertieft, um eine Abschätzung der Unterschiede benachbarter Pixel vorzunehmen. Die Bestimmung des Konversionsfaktors eines Pixels erfolgt hierbei mit 3 Datenpunkten aus Signal und Varianz. Es werden hierfür jeweils 100 Aufnahmen bei drei unterschiedlichen Zeiten von $t = 5, 10$ und 15 s gemacht. Die drei Datenpunkte des Konversionsfaktors der unterschiedlichen Zeiten für das k -te Mittelpunktpixel werden gemeinsam in Abbildung 3.15 aufgetragen. Diese Punkte liegen nach

$$\sigma_{ADU}^2 = g \cdot S_{ADU}$$

alle auf einer Geraden. Durch Bestimmung einer Fitgeraden (chi-Quadrat) an diese Datenpunkte kann anhand der Steigung g der Konversionsfaktor des jeweiligen k -ten Mittelpunktpixels bestimmt werden.

Es ist erkennbar, dass es signifikante Unterschiede in den Werten des Konversionsfaktors von Pixel zu Pixel auftreten. Die Geraden verlaufen nicht durch den Nullpunkt und weisen einen Offset auf, obwohl bei einem Signal von $S_{ADU} = 0$ auch $\sigma_{ADU}^2 = 0$ sein sollte. Die Ursache für diesen Offset konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Es zeigt sich aber, dass unter Nachbarnpixeln Schwankungen von wenigen $10^{-1} \frac{e^-}{ADU}$ bis zu $2,58 \frac{e^-}{ADU}$ im Konversionsfaktor auftreten.

Zur Abschätzung der Schwankungen des Konversionsfaktors innerhalb einer Zeile und Spalte werden die Konversionsfaktoren der mittleren drei Zeilen mit den y -Koordinaten 254, 255 und 256 entlang der Spalten (x -Richtung) und der mittleren drei Spalten mit den x -Koordinaten 381, 382 und 383 entlang der Zeilen (y -Richtung) aufgetragen. Hierbei wird jeder der drei Datenpunkte aus den unterschiedlich lang belichteten Aufnahmen gesondert betrachtet. Dies ermöglicht dann einen Vergleich der Schwankungen des Konversionsfaktors bei unterschiedlichen Belichtungsstärken entlang der Koordinatenachsen der CCD. Die Abbildung 3.16 zeigt den Verlauf des Gain entlang der Zeilen und Abbildung 3.17 entlang der Spalten.

Die Profile zeigen, dass der Konversionsfaktor innerhalb von ganzen Zeilen und Spalten Schwankungen unterworfen ist, die mit der Größe der Schwankungen unter Nachbarnpixeln vergleichbar ist. Das heißt, innerhalb der Zeilen und Spalten treten Fluktuationen von wenigen $10^{-1} \frac{e^-}{ADU}$ bis zu ca. $2 - 3 \frac{e^-}{ADU}$ auf.

In Abbildung 3.18 sind über die Spalten und Zeilen gemittelte Profile entlang der Achsen der SBIG-ST7E aufgetragen. Die Werte berechnen sich für das Profil g_x entlang der x -Achse zu

$$g_x = \frac{\sum_y g_y}{510}$$

mit den Werten g_y der Spalte x und für das Profil g_y entlang der y -Achse zu

$$g_y = \frac{\sum_x g_x}{765}$$

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

mit den Werten g_x der Zeile y .

Es ist hieran zu erkennen, dass der Konversionsfaktor bei der Mittelwertbildung in der Mitte der CCD-Fläche recht konstant bei ca. $3 \frac{e^-}{ADU}$ ist. Zu den Rändern hin fällt dieser dann etwas ab. Die Mittelung vieler Einzelkonversionsfaktoren ergibt den von Herstellern angegebenen. Zumindest für den Bereich konstanten Gains in der Mitte der CCD trifft diese Aussage zu.

3.3 Bestimmung der Grundgrößen

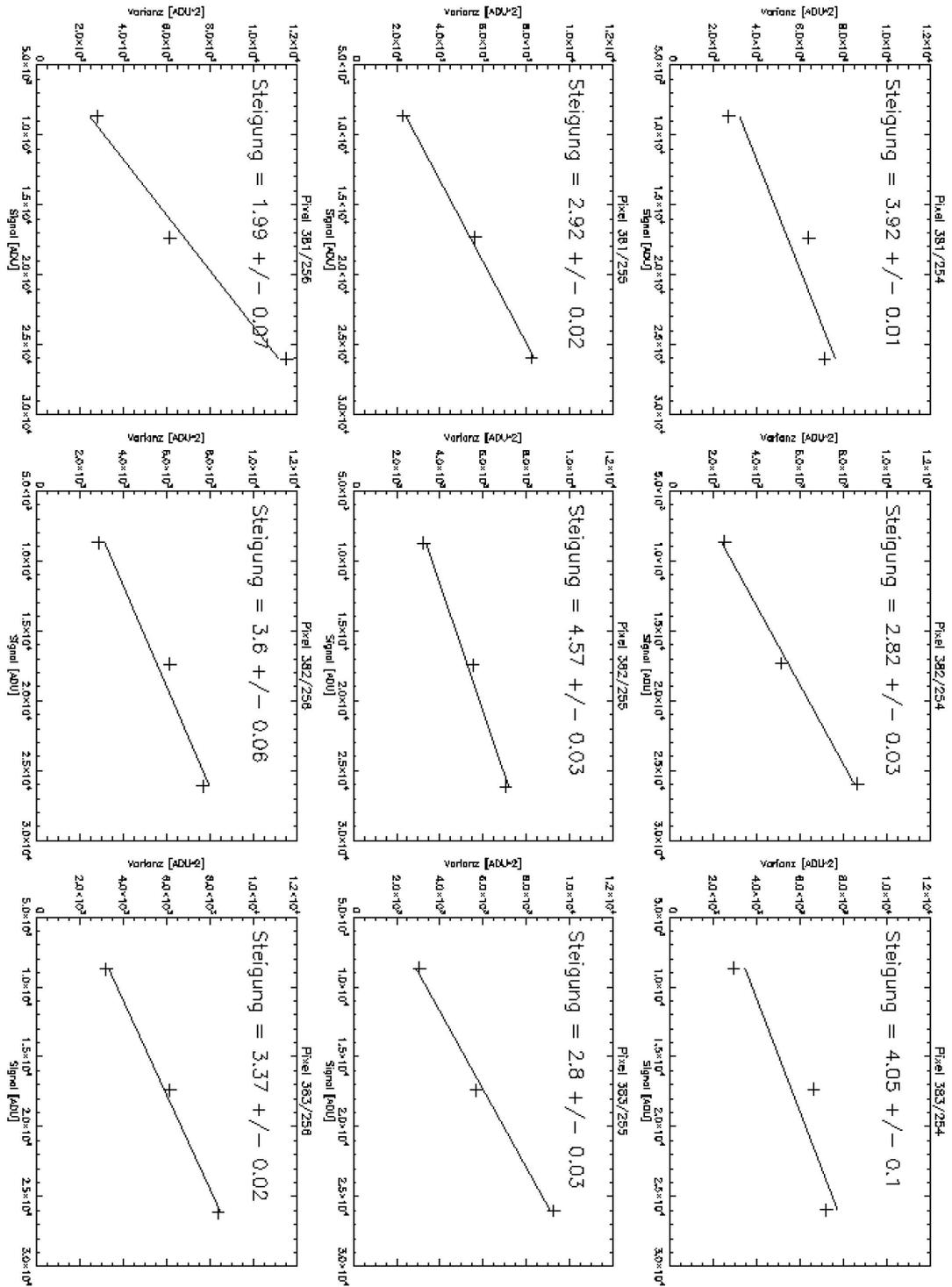


Abbildung 3.15: Bestimmung der Konversionsfaktoren über die Geradensteigung für die SBIG-7E. Die Pixel sind die 9 Mittelpunktpixel der SBIG-ST7E. Die x-Achse gibt den Signalwert an, die y-Achse die Varianz des jeweiligen Pixels.

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

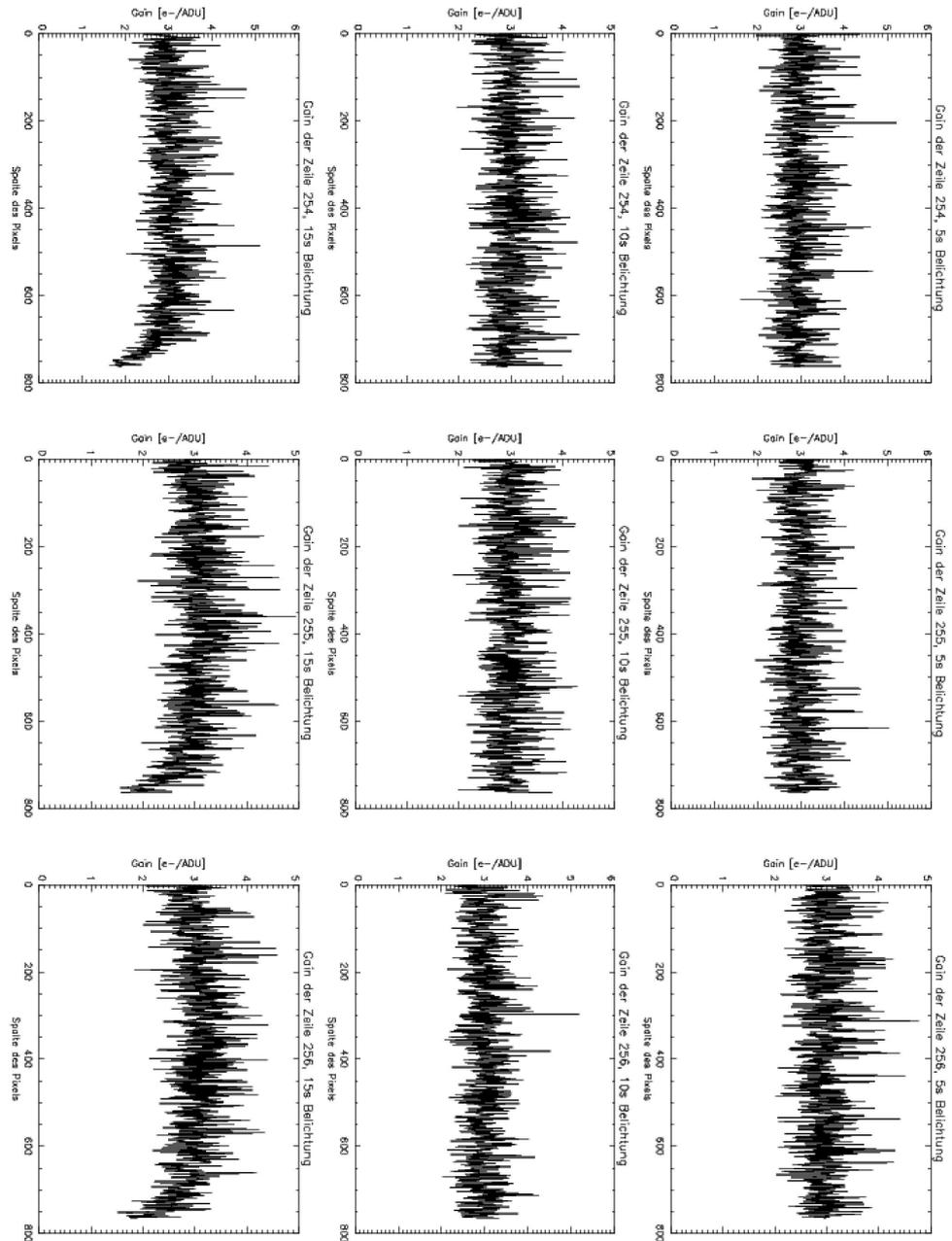


Abbildung 3.16: Profil des Konversionsfaktors entlang der Spalten für die drei mittleren Zeilen der SBIG-ST7E. Von links nach rechts wird die Zeilenkoordinate größer. Von oben nach unten wird die Belichtungszeit variiert. (5s oben, 10s Mitte, 15s unten)

3.3 Bestimmung der Grundgrößen

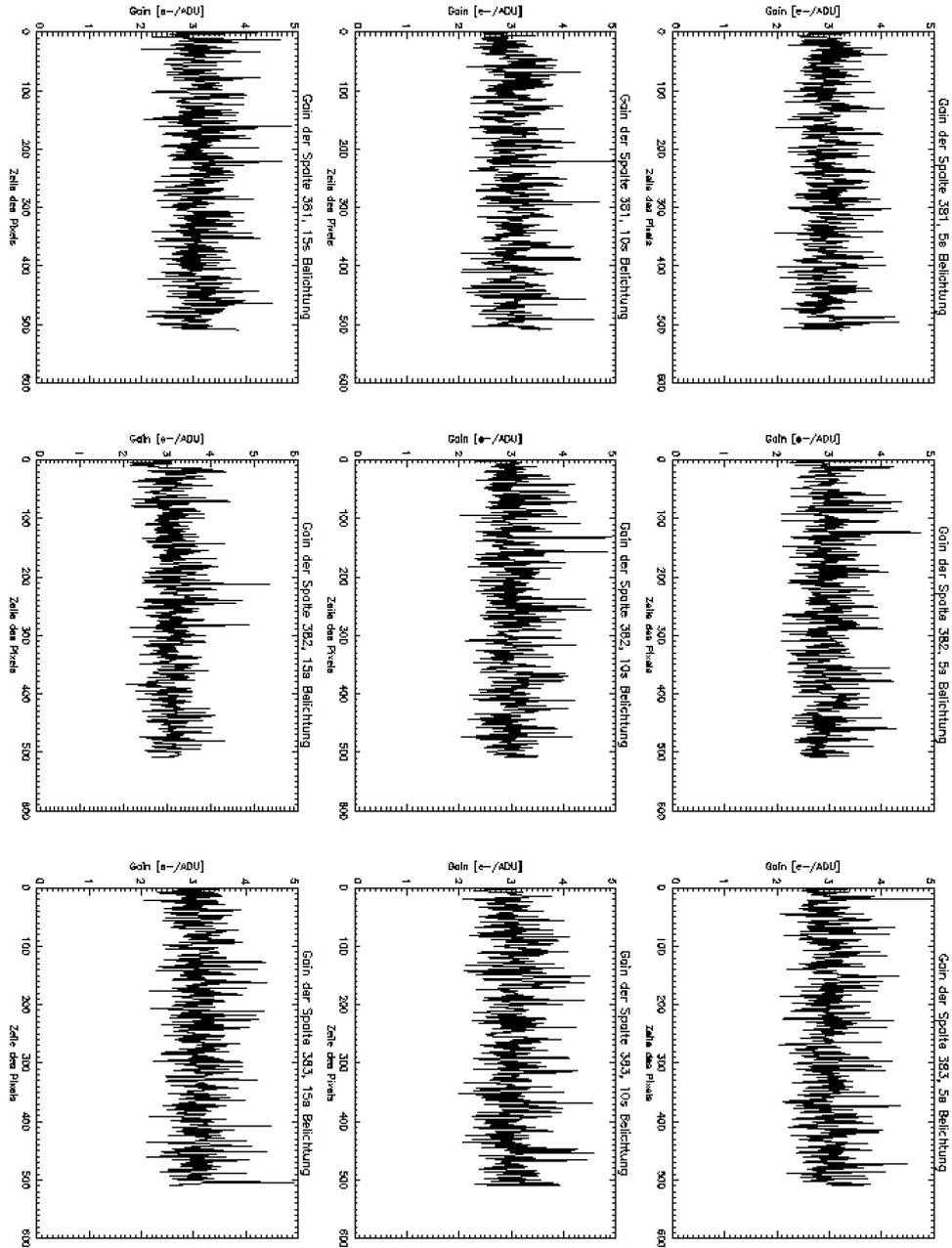


Abbildung 3.17: Profil des Konversionsfaktors entlang der Spalten für die drei mittleren Zeilen der SBIG-402ME. Von links nach rechts wird die Spaltenkoordinate größer. Von oben nach unten wird die Belichtungszeit variiert. (5s oben, 10s Mitte, 15s unten)

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

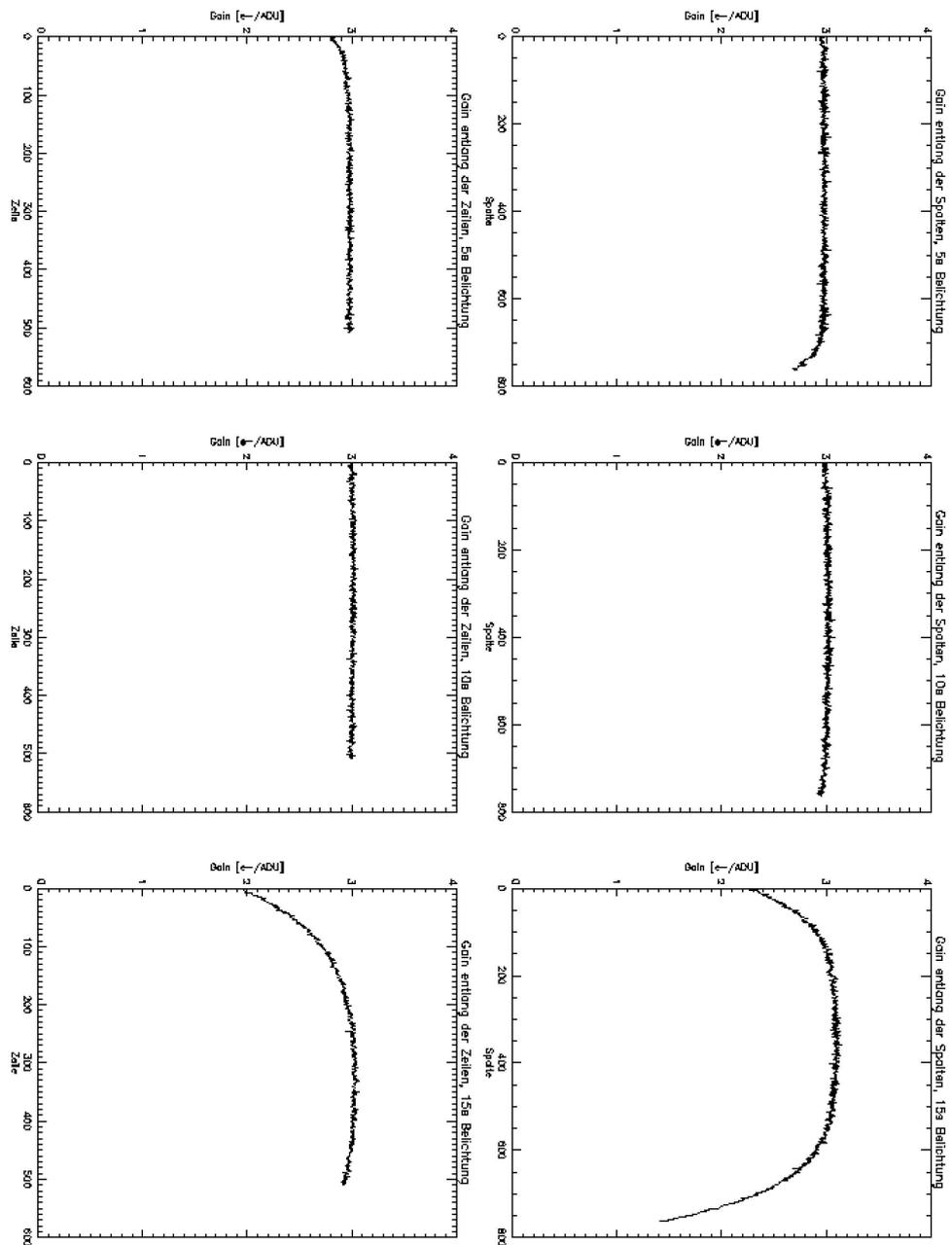


Abbildung 3.18: Profil des Konversionsfaktors entlang der Zeilen und Spalten für die gesamte CCD. Von links nach rechts wird die Belichtungszeit größer (5s, 10s, 15s). Die oberen drei Graphen sind die Profile über die gemittelten Spalten, die unteren drei Graphen über die Zeilen

3.4 Vergleich der Ergebnisse mit den Datenblättern

In diesem Kapitel werden die gemessenen Werte für Ausleserauschen, Dunkelstrom und Gainfaktor mit denen vom Hersteller in Tabelle 3.1 gegebenen Werten für die Kameras verglichen und interpretiert (3.4.1). Am Anfang findet die Umrechnung mit den gemessenen Gainfaktoren statt, um die anderen gemessenen Größen in Einheiten von Elektronen auszudrücken. Diese können dann verglichen werden. Danach erfolgt in Kapitel 3.4.2 eine Interpretation der Ergebnisse der Gainbestimmung für das ALPS-Experiment.

3.4.1 Kameras

- SBIG-ST7E: Bei der SBIG-ST7E ist die Angabe des Herstellers $2,3 \frac{e^-}{ADU}$ für den Gain. Die in Methode A und B errechneten Werte sind $2,42 \pm 0,16 \frac{e^-}{ADU}$ und $2,97 \pm 0,44 \frac{e^-}{ADU}$. Die beiden Werte stimmen innerhalb ihrer Fehler überein, weisen aber dennoch eine große Differenz auf. Bezogen auf die Herstellerangabe sind die gemessenen Werte etwas größer. Der bei Methode A gewonnene Wert stimmt mit der Angabe des Herstellers innerhalb des Fehler überein. Der Wert aus Methode A weicht stark von der Herstellerangabe ab. Die Umrechnung der zu vergleichenden Größen Dunkelstrom und Ausleserauschen in Einheiten von Elektronen wird mit dem Mittelwert $2,7 \pm 0,3 \frac{e^-}{ADU}$ der Werte beider Methoden durchgeführt.

Der Dunkelstrom der SBIG-ST7E berechnet sich hiermit zu

$$I_{DS} = 0,0992 \pm 0,0004 \frac{ADU}{s \cdot Pixel} \cdot 2,7 \pm 0,3 \frac{e^-}{ADU} = 0,268 \pm 0,03 \frac{e^-}{s \cdot Pixel}$$

und das Ausleserauschen zu

$$\sigma_{AR}[e^- rms] = 4,71 \pm 0,44 ADU rms \cdot 2,7 \pm 0,3 \frac{e^-}{ADU} = 12,72 \pm 2,6 e^- rms.$$

Der errechnete Wert für das Ausleserauschen ist etwas kleiner als der vom Hersteller angegebene ($15 e^- rms$). Innerhalb des Fehlers stimmt der Wert mit der Angabe überein. Beim Dunkelstrom ist der errechnete Wert größer, als der angegebene von $< 0,2 \frac{e^-}{s \cdot Pixel}$.

- SBIG-402ME: Die Angaben des Herstellers für den Gain der SBIG-402ME ist $1,5 \frac{e^-}{ADU}$. Die aus den beiden Methoden gewonnenen Werte sind $1,38 \pm 0,02$ bei Betrachtung von Regionen auf der CCD und $1,52 \pm 0,27$ bei der Einzelpixelanalyse. Der erste angegebene Wert stimmt nicht mit dem vom Hersteller überein. Der kleine Fehler resultiert aus der geringen Auslesegeschwindigkeit der Kamera von wenigen $10^{-1} s$. Dadurch kann man bei der Aufnahme der belichteten Bilder von einer nahezu konstanten Beleuchtung aller 100 Bilder ausgehen. Deshalb

streuen die Werte des Signals und der Varianz nicht so sehr wie bei der SBIG-7E, die eine Auslesegeschwindigkeit von ca. 2-3 s hat. Der bestimmte Gainwert bei den Einzelpixeln stimmt gut mit der Herstellerangabe überein, weist dazu aber einen großen Fehler auf. Zur Umrechnung der gemessenen Werte, Dunkelstrom und Ausleserauschen für die SBIG-402ME, wird der Mittelwert der beiden Werte verwendet. Dieser berechnet sich zu $1,45 \pm 0,15 \frac{e^-}{ADU}$.

Der Dunkelstrom der SBIG-402ME berechnet sich hiermit zu

$$I_{DS} = 0,0273 \pm 0,0018 \frac{ADU}{s \cdot Pixel} \cdot 1,45 \pm 0,15 \frac{e^-}{ADU} = 0,04 \pm 0,007 \frac{e^-}{s \cdot Pixel}$$

und das Ausleserauschen zu

$$\sigma_{AR}[e^- rms] = 11,74 \pm 0,01 ADU rms \cdot 1,45 \pm 0,15 \frac{e^-}{ADU} = 17,02 \pm 1,78 e^- rms.$$

Der Dunkelstrom kann nur relativ zur Herstellerangabe von $1 \frac{e^-}{s \cdot Pixel}$ bewertet werden, da diese Messungen bei $0^\circ C$ durchgeführt wurden. Der berechnete Dunkelstrom stimmt mit der Herstellerangabe überein, da bei geringerer Temperatur weniger Dunkelstrom erwartet wird. Das berechnete Ausleserauschen stimmt recht gut mit der Angabe des Herstellers von $17 e^- rms$ überein.

Die mit beiden Methoden A und B berechneten Werte des Konversionsfaktors stimmen innerhalb der angegebenen Fehler überein. Die Werte für Dunkelstrom und Ausleserauschen der beiden Kameras sind von gleicher Größe, wie sie der Hersteller angibt, wenn zur Umrechnung der Mittelwert des Konversionsfaktors aus beiden Methoden verwendet wird. Deshalb ist die Methode B als Möglichkeit zur Bestimmung des Gain eines Einzelpixels generell geeignet. Speziell die Ergebnisse bei der neuerem Kamera SBIG-402ME lassen darauf schließen, daß die Methode zur Bestimmung des Gain herangezogen werden kann, da hier der mit Methode B errechnete Wert gut mit der Herstellerangabe und dem aus mit Methode A bestimmten übereinstimmt. Bei den Profilen der Mittelwerte von Spalten und Zeilen zeigt sich diese Schwankung nicht mehr so ausgeprägt. Das bedeutet, dass der Gain innerhalb der Zeilen und Spalten relativ konstant ist und um einen Mittelwert schwankt, der mit dem aus Methode A und der Herstellerangabe vergleichbar ist.

3.4.2 Interpretation für ALPS

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die prinzipielle Möglichkeit den Konversionsfaktor eines Einzelpixels zu bestimmen. Wird versucht mit einem Pixel ein Einzelphoton nachzuweisen, sollte für diesen eine Analyse des Konversionsfaktors, anhand einer Fitgeraden an mehrere Datenpunkte unterschiedlicher Signalstärken, erfolgen, da eine allgemeine

Herstellerangabe nur einen Mittelwert darstellt. Bei ALPS wird eine 5 x 5 Pixel große Region als Detektorfläche für die erwarteten Photonen verwendet. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es innerhalb einer 5 x 5 Pixel Fläche starke Streuungen in den Varianz-Signal-Werten gibt, so dass eine Analyse mit Methode A dieser Region unter Betrachtung des 5 x 5 Feldes wahrscheinlich einen Gain mit großem Fehler aufweisen wird. Eine Analyse der gesamten CCD-Fläche wiederum ist nicht repräsentativ für den Gain der verwendeten Pixel. Im Prinzip sollte bei der Detektion von Einzelphotonen mit einer CCD der Gain jedes an der Detektion beteiligten Pixels vermessen werden. Speziell bei einer Punkt-Abbildungs-Funktion der Optik, wie sie bei der Detektion im ALPS-Experiment in der 5 x 5 Pixel großen Region auftritt, kann aufgrund der Verteilung der ADU Werte nicht auf die Photonverteilung geschlossen werden, wenn nicht die einzelnen Konversionsfaktoren berücksichtigt werden.

3 Charakterisierung der SBIG-ST7E und SBIG-402ME

4 Versuchsaufbau für simulierte ALPS-Messung

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit den Messbedingungen eines Versuchsaufbaus mit dem Ziel der Nachstellung der ALPS-Konditionen und stellt die Komponenten zur Erzeugung von mHz Photonenraten mit einer Wellenlänge von 532 nm vor. Es werden die Komponenten beschrieben, die für den angestrebten Versuchsaufbau (siehe Kapitel 1) verwendet wurden. In Kapitel 4.1 werden die optischen Komponenten des Versuchsaufbaus beschrieben. Der Lichtpulsler wird in Kapitel 4.2 vorgestellt. Mit den eingeführten Komponenten wird in Kapitel 4.3 eine Abschätzung über die zu erwartenden Photonenraten gegeben. Das Kapitel 4.4 stellt die Ergebnisse der ersten Messungen dar. Abschließend wird in Kapitel 4.5 ein Fazit zum simulierten ALPS-Versuchsaufbau gezogen.

4.1 Lichtquelle und optische Komponenten

Der Versuch wurde so konzipiert, dass die Bedingungen des ALPS- Experiments nachgestellt werden können. In den Abbildung 4.1 ist dargestellt, wie eine gleichmäßige Ausleuchtung der CCD erreicht werden soll und in Abbildung 4.2 die Fokussierung auf wenige Pixel.

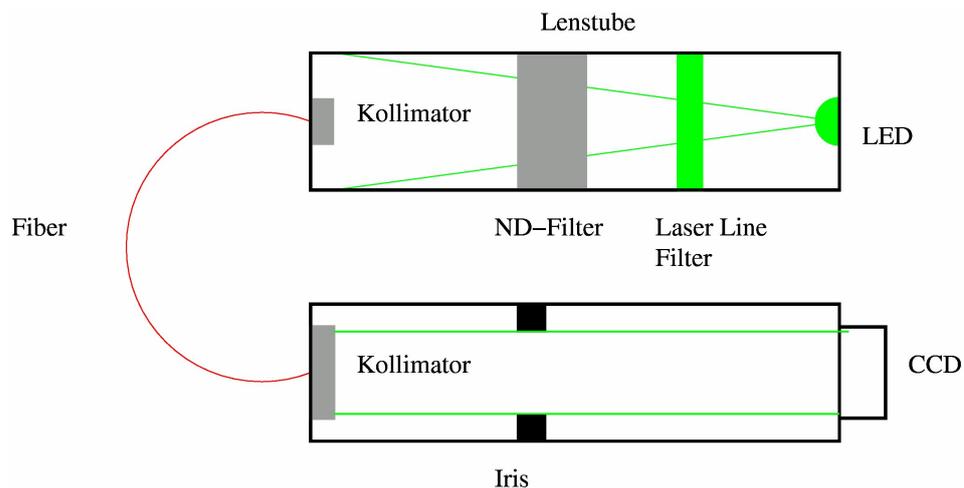


Abbildung 4.1: Schematischer Versuchsaufbau der ALPS-Simulation mit einer Iris. Ziel mit dieser Anordnung ist eine gleichmäßige Ausleuchtung.

4 Versuchsaufbau für simulierte ALPS-Messung

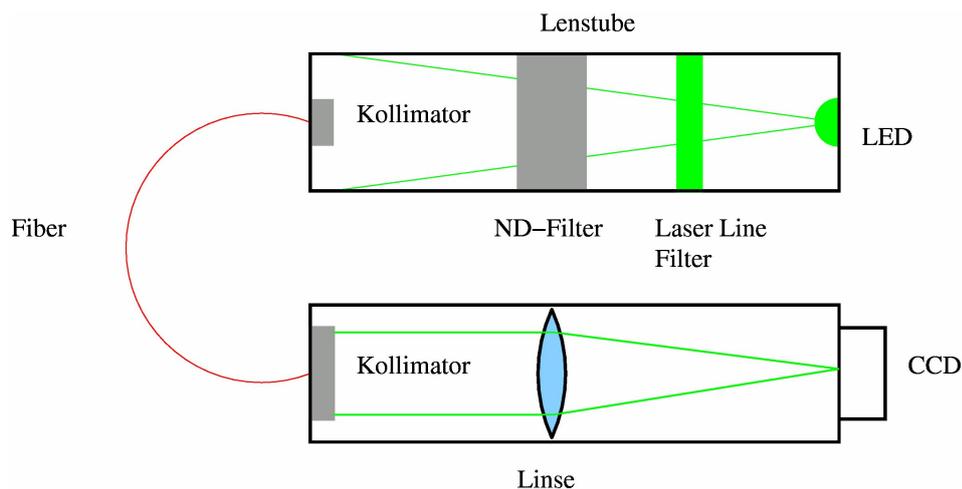


Abbildung 4.2: Schematischer Versuchsaufbau der ALPS-Simulation mit einer Linse. Ziel mit dieser Anordnung ist die Fokussierung auf einen oder wenige Pixel.

Für den Versuchsaufbau wurden Komponenten des Vertreibers von optischen und elektronischen Bauteilen, Thorlabs verwendet. Die Komponenten können unter den genannten Bezeichnungen auf der Thorlabs Webseite [10] oder im Thorlabs Katalog V 19 [11] nachgeschlagen werden.

Das gesamte optische System wurde in Lenstubes (Abk. LT) umgesetzt. Die LT sind kleine, an den Grundflächen offene, Zylinder mit Innendurchmesser von 1 Zoll oder 2,54 cm. Der gesamte Zylinder hat ein Gewinde in der Innenseite. Man kann Ringe in die LT schrauben um Filter oder Linsen darin zu befestigen. In eine Grundfläche einer LT wird die Halterung der LED geschraubt und in einer Grundfläche der zweiten LT wird die CCD befestigt. Um auf der Detektorseite eine gleichmäßige Ausleuchtung der CCD zu erreichen, werden die zwei LTs über Kollimatoren miteinander verbunden. Der Kollimator in der Tube mit der LED wird zum Einspeisen des Lichts in eine Fiber verwendet. Der Kollimator in der LT mit der CCD dient dazu den Lichtstrahl aus der Fiber homogen auf die CCD zu leiten. Das System gewährleistet damit eine dunkle Umgebung mit geringer Anzahl von Hintergrundphotonen, weil es sich um massive, geschlossene Zylinder handelt, deren einzige Öffnungen passgenau verschlossen werden.

Für die Nachbildung der Wellenlänge (532 nm) des ALPS-Lasers dient als Lichtquelle die Diode LED528E. Die Spezifikationen finden sich in Tabelle 4.1.

Der Wellenlängenbereich der LED deckt sich mit der angestrebten Wellenlänge von 532 nm. Abbildung 4.3 zeigt die Spektralverteilung der LED. Abbildung 4.4 gibt die winkelverteilte Intensität der LED wieder. Sie hat ihr Maximum der Intensität bei ca. 535 nm.

Die Wahl der LED wurde aufgrund ihrer Eigenschaften bezogen auf ihre Wellenlänge und Leistung getroffen. Die Realisierbarkeit der Ansteuerung mit μs oder ns Strompulsen wurde erst nachträglich als wichtiges Kriterium herausgearbeitet, siehe hierzu Kapitel 5.

Um die Wellenlänge 532 nm mit der LED zu erreichen, wird im Strahlengang der LED

Charakteristik	Wert
Betriebsstrom	max. 30 mA
Betriebsspannung	3,5 - 4,3 V
Peak Wellenlänge	535 nm
FWHM bei Peakwellenlänge	40 nm
Halber Abstrahlwinkel	10°
Leistung	1.5 mW CW (central wavelength)

Tabelle 4.1: Charakteristika der LED528E

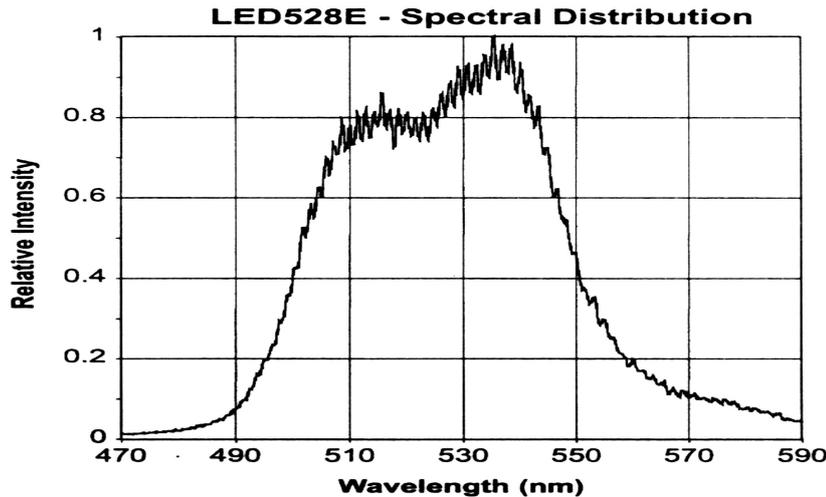


Abbildung 4.3: Spektralverteilung der im Versuch verwendeten LED. Quelle: Thorlabs Katalog V19, Seite 513 oben

ein Laserlinienfilter (engl. Laserlinefilter, Abk. LLF) verwendet. Es handelt sich hierbei um einen Farbfilter mit einer sehr kleinen spektralen Durchlässigkeit um die zentrale Wellenlänge. Im vorliegenden Fall wurde der LLF FL532-1 von Thorlabs verwendet. Die zentrale Wellenlänge des Filters liegt bei 532 ± 0.2 nm, das FWHM bei 1 ± 0.2 nm und die Transmissivität bei 40 % im durchlässigen Spektralband.

Desweiteren werden ND-Filter (engl. neutral density) verwendet. Die Filter dienen der Reduzierung der Lichtintensität. ND-Filter (auch Graufilter genannt) werden anhand ihres Abschwächungsfaktors beschrieben. So wurden für den Versuchsaufbau ND-Filter mit den optischen Tiefen $\tau = 1, 2, 3$ und 5 angeschafft. Der Begriff optische Tiefe bei einem ND-Filter bezieht sich auf den Faktor der Abschwächung. Bei einem ND-Filter mit optischer Tiefe τ kann die Transmission dargestellt werden als $T = 10^{-\tau}$ ([10]), wobei die Transmission Wellenlängenunabhängig ist ($T(\lambda) = \textit{konstant}$). Die hier verwendeten Filter sind von Thorlabs und tragen, je nach Grad der Abschwächung, die Bezeichnungen NE10B, NE20B, NE30B und NE50B.

Bei den beiden Kollimatoren handelt es sich bei dem auf der LED seitigen LT befestigten um das Modell F230FC-A mit einem Durchmesser von 1,1 cm. Der Kollimator

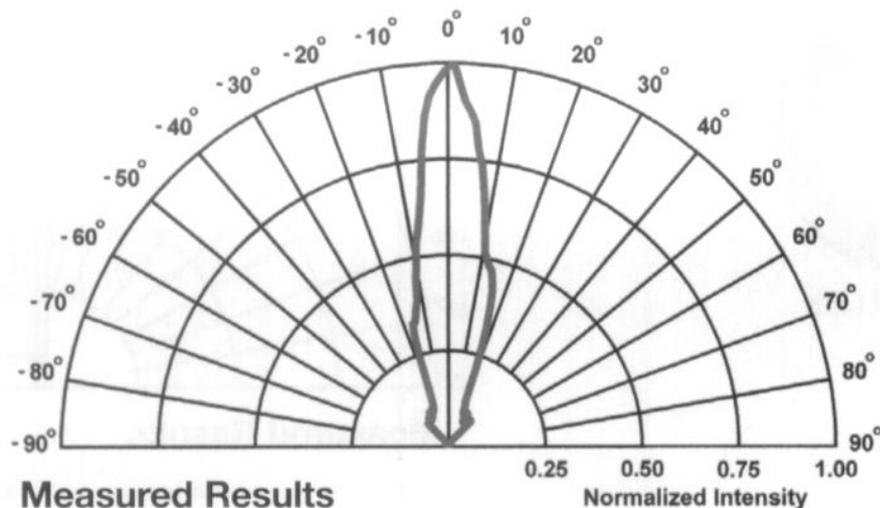


Abbildung 4.4: Winkelabhängige Intensitätsverteilung der LED. Quelle: Thorlabs Katalog V19, Seite 513 oben

auf der CCD seitigen LT ist das Modell F810FC-543 mit einem Durchmesser von 2,39 cm. Die Fiber hat die Bezeichnung P1-460A-FC-2. Das System aus Kollimatoren und Fiber soll einen möglichst homogenen Lichtstrahl erzeugen. In einem Aufbau wird in der LT mit der CCD eine Iris eingefügt (s. Abbildung 4.1). Diese soll dazu dienen, die Größe der bestrahlten Fläche auf der CCD einzustellen. In einem anderen Aufbau soll mit einer Linse im Strahlengang die Fokussierung auf einen oder wenige Pixel umgesetzt werden (s. Abbildung 4.2).

4.2 Strompulsler

Für die Realisierung kleiner Photonenraten wird die LED mit kurzen Strompulsen betrieben. Zur Erzeugung von kleinen Strompulsen wurde vom Technischen Entwicklungs Büro (TEB) von der Universität Hamburg ein Strompulsler konstruiert. Der Hauptbestandteil des Strompulsers ist der Mikroprozessor PIC18F448. Technische Daten finden sich zum Beispiel auf der Webseite eines Vertreibers von Mikrochips und Halbleitersystemen (<http://www.microchip.com>). Eine detaillierte Beschreibung findet sich in der Bedienungsanleitung des Pulsers ([12]).

Zur Ansteuerung des Pulsers wird ein CAN-Bus (Control Area Network) verwendet. Im vorliegenden Versuch wurde der CAN-Adapter PCAN-USB von Peak Systems verwendet. Technische Daten zum verwendeten CAN-Adapter finden sich auf der Herstellerseite ([13]).

Die Konstruktion des Pulsers erfolgte mit folgenden Vorgaben:

- Ausgangsstrom = 30 mA
- Pulslängen von mindestens $0,1 \mu\text{s}$ Dauer

- Steuerung des Pulser über ein CAN-Bus

Die wichtigen Charakteristika des Pulser sind:

- Erzeugung von Strompulsen von 50 ns bis 12,8 μ s in Schritten von 50 ns
- CAN-Steuerbar
- Ausgangsstrom dieser Konfiguration $29 \pm 0,5$ mA (Quelle: Werkstattmessung)

Zur Ansteuerung werden die ersten 4 Bit des Pulserregisters über den CAN-Adapter beschrieben (siehe [12]). Die wesentlichen Befehle sind das Einstellen der Pulslänge und das Starten eines Pulses. Für die Bedienung wurde ein Visual Basic 6 Programm unter WindowsXP vom TEB zur Verfügung gestellt. Mit diesem ist es möglich, die Befehle an den CAN zu senden. Das Starten eines Pulses erfolgt per Mausklick. Die Pulslänge wird durch Eingabe einer Zahl zwischen eins und zweihundertsechundfünfzig eingestellt. Sie bezieht sich auf den jeweiligen Multiplikationsfaktor des 50 ns Schritts der Pulslänge. Die Zahl 1 steht für eine Pulslänge von 50 ns und die Zahl 255 für eine Pulslänge von $255 \cdot 50ns = 12,75\mu s$. Die Null steht für die maximale Pulslänge von 12,8 μ s.

4.3 Photonenraten

Es soll nun eine Abschätzung für die zu erwartenden Photonenraten gegeben werden, um zu zeigen, dass sich das Ziel der Erzeugung von mHz-Photonenraten durch den Aufbau prinzipiell erreichen läßt. Für die abgestrahlte Leistung der LED bei 532 nm wird der Wert 1,5 mW der Abstrahlleistung bei 535 nm herangezogen. Für die Berechnung der Photonenrate kann nun folgende Annahme gemacht werden:

$$Rate = \frac{Leistung}{Photonenenergie} = \frac{1,5mW}{\frac{hc}{532nm}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6}W}{3,73 \cdot 10^{-19}J} = 4 \cdot 10^{12} \frac{Photonen}{s}$$

Es wurde hierbei die Beziehungen $E = h \cdot \nu$ und $c = \lambda \cdot \nu$ verwendet. Wobei h das plancksche Wirkungsquantum angibt, ν für die Frequenz und λ für die Wellenlänge des Lichts stehen und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die Reduktion der Photonenrate in den Bereich von mHz kann auf Grundlage folgender Überlegungen erreicht werden:

- LLF und Abstrahlcharakteristik:

Anhand der Spektralverteilung (s. Abbildung 4.3) und der FWHM Angabe von 40 nm um die zentrale Wellenlänge der LED, kann unter Verwendung des LLF mit einer durchlässigen spektralen Breite von $\Delta\lambda = 1nm$ um 532 nm grob einen Faktor $\frac{1}{40}$ angenommen werden, um die Abstrahlleistung der LED mit LLF bei 532 nm abzuschätzen. Desweiteren kommt unter Berücksichtigung der Transmissivität des

LLF noch ein Faktor von 0,4 hinzu. Diese beiden Komponenten sorgen für eine Rate von

$$4 \cdot 10^{10} \frac{\text{Photonen}}{\text{s}}.$$

Die LED hat einen maximalen Halben-Abstrahlwinkel von 10° (s. Abbildung 4.4). Mit der LT-Länge von 3 Zoll und einem Durchmesser von 1 Zoll ergibt sich ein maximaler Halber-Einstrahlwinkel auf die LT Grundfläche von $9,59^\circ$. Unter der Annahme, daß die Intensität der LED unterhalb eines Winkels von 10° im Schnitt bei 90% liegt und bei sehr kleinen Winkeln konstant ist, kann folgende Abschätzung auf den Photonenfluss gemacht werden. Es treffen $0,9 \cdot 4 \cdot 10^{10} \frac{\text{Photonen}}{\text{s}}$ auf die Grundfläche der LT ($5,07 \text{ cm}^2$). Dies entspricht einem Fluss von $7,1 \cdot 10^9 \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$. Die Sammelfläche des Kollimators F230FC-A zum Einspeisen beträgt $6,36 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ und errechnet sich aus den Herstellerangaben des Durchmessers von 0,9 mm. Es fließen somit $4,5 \cdot 10^7 \frac{\text{Photonen}}{\text{s}}$ in die Fiber. Unter der weiteren Annahme, dass sich das Licht beim Austritt aus dem Kollimator F810FC-543 homogen über die Kollimatorfläche ($36,3 \text{ mm}^2$) verteilt, beträgt der Photonenfluss $1,25 \cdot 10^8 \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$. Die Transmission der beiden Kollimatoren und der Fiber wird hierbei zu 100% angenommen. Bei einer Pixelgröße von $81 \mu\text{m}^2$ berechnet sich der Photonenfluss unter den gemachten Annahmen zu

$$1 \cdot 10^2 \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{Pixel}}.$$

- **ND-Filter:**
Um eine weitere Reduktion der Photonenrate zu erreichen, kommen die Grau- oder ND-Filter zum Einsatz (engl. neutral density). Mit den vorhandenen Filtern, die sich in ihrer Wirkung addieren, können somit Abschwächungen von 10^{-1} bis 10^{-11} der Ausgangsleistung erreicht werden.
- **gepulstes Licht:**
Die minimale Dauer eines Pulsers liegt bei 50 ns. Somit wird eine maximale Reduktion der Photonenrate um einen Faktor $5 \cdot 10^{-8}$ erreicht.

Somit kann man ohne Verwendung des Pulsers schon Photonenraten im Bereich von 100 Hz erzeugen und für ein Einzelpixel im Bereich von mHz. Unter Hinzunahme von ND-Filtern mit variablen optischen Tiefen τ und eines Strompulsers sollte dann die Erzeugung von mHz-Photonenraten für die Detektorfläche möglich sein.

4.4 Erste Messungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ersten Messungen mit dem Versuchsaufbau dargestellt werden. Für die Beschreibung der Ergebnisse, die mit der Ausgangskonfiguration des Versuchsaufbaus gemessen wurden, können keine Bilder zur Dokumentation

herangezogen werden, da der zur Datennahme verwendete Laptop aus dem Labor gestohlen wurde. Bei der Beschreibung der Ergebnisse mit einer geänderten Konfiguration können aus demselben Grund keine Bilder zur Dokumentation angeführt werden. Die Beschreibung des Verhaltens der LED kann deshalb nur mit vorhandenen Bildern dokumentiert werden.

- **Ausgangskonfiguration:** Die ersten Messungen wurden ohne ND-Filter durchgeführt (s. Abbildung 4.5).

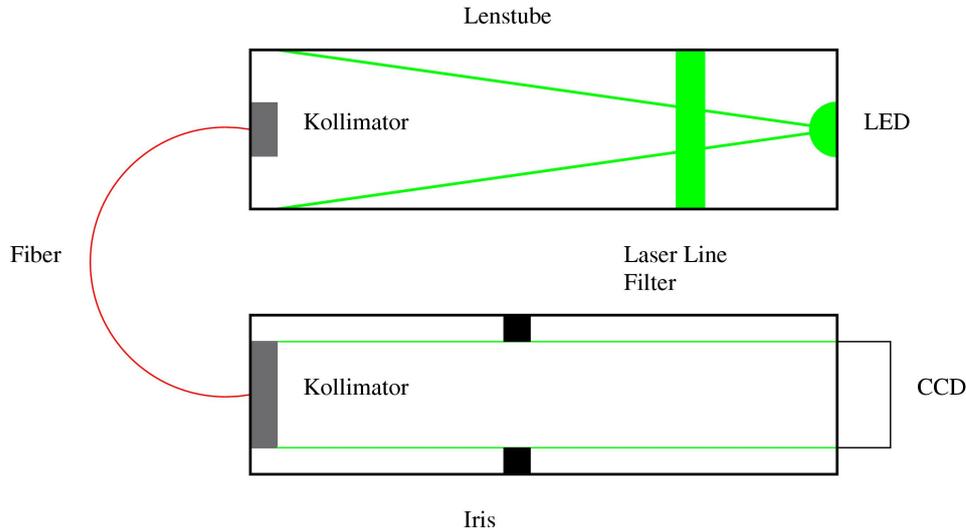


Abbildung 4.5: Schematischer Versuchsaufbau der ersten Messungen ohne ND-Filter zur Überprüfung der gemachten Abschätzung

Das Signal wird nur durch die Transmissivität des LLF und der räumlichen Abstrahlcharakteristik der LED und der Kollimatoren beeinflusst resp. reduziert. Es wird damit ein Photonenfluss von $100 \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{Pixel}}$ erwartet (s. Kapitel 4.3). Es wurden 2 Bilder mit einer Integrationszeit von einer Stunde aufgenommen. Beim ersten Bild blieb die LED ausgeschaltet, es wurde also eine Aufnahme des Dunkelstroms gemacht, wobei auftretende Hintergrundphotonen durch die geöffnete Blende der Kamera mitdetektiert werden. Das zweite Bild wurde bei eingeschalteter LED gemacht, so daß der abgeschätzte Photonenfluss erwartet wird. Aus diesen beiden Aufnahmen wurde ein Differenzbild gebildet. Es konnten in diesem Bild keine signifikanten Signale ausgemacht werden, die oberhalb des Rauschpegels von $17e^{-}rms$ resp. $4,71ADU_{rms}$ liegen. Die Transmissivität T der Kollimatoren und der Fiber läßt sich dadurch für einen Pixel abschätzen zu

$$T = \frac{\text{gemessener Fluss}}{\text{angenommener Fluss}} < \frac{4,7 \frac{ADU}{h}}{360000 \frac{\text{Photonen}}{h}}$$

Wird eine QE von 50% angenommen, sowie dass jedes Photon ein Elektron-Loch-Paar bildet, so beträgt der abgeschätzte Fluss in Einheiten von $\frac{ADU}{h}$

$$\frac{360000 \frac{\text{Photonen}}{h}}{2,7 \frac{e^{-}}{ADU}} \cdot 0,5 \cdot 1 \frac{e^{-}}{\text{Photon}} = 6,7 \cdot 10^4 \frac{ADU}{h}$$

4 Versuchsaufbau für simulierte ALPS-Messung

Somit ergibt sich als Abschätzung für die Transmissivität der Kollimatoren und der Fiber

$$T = \frac{\text{gemessener Fluss}}{\text{angenommener Fluss}} < \frac{4,7 \frac{\text{ADU}}{h}}{6,7 \cdot 10^4 \frac{\text{ADU}}{h}} \Rightarrow T < 7,05 \cdot 10^{-5}$$

Aufgrund dieser neuen Abschätzung wurde die Konfiguration des Versuchsaufbaus geändert, da davon auszugehen ist, dass die Kollimatoren und die Fiber entweder gar kein Licht von LT zu LT befördern oder die Transmissivität sehr viel kleiner ist, als ursprünglich angenommen, so dass die vorgenommenen Abschätzungen um bis zu 5 Größenordnungen vom eigentlichen Wert abweichen. Diese Abschätzung ist als Obergrenze anzusehen. Es wurde eine QE von 50% angenommen, was einem kleinen Wert entspricht. Je größer die QE ist, desto mehr Photonen werden erwartet und der Transmissionsfaktor wird kleiner.

- **Konfigurationsänderung:** Daraufhin wurde das System derart umgestellt, dass die Kollimatoren weggelassen wurden (s. Abbildung 4.6).

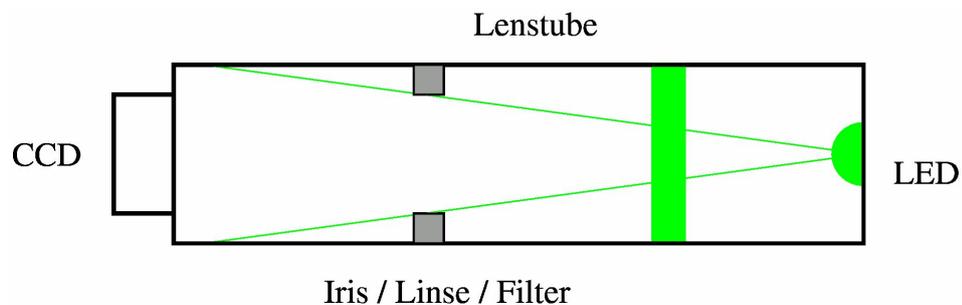


Abbildung 4.6: Schematischer Versuchsaufbau nach dem Umbau. Die Komponenten werden alle in eine LT gefasst.

Der Versuchsaufbau wurde so konstruiert, dass alle optischen Komponenten in einer LT angeordnet werden. Ohne ND-Filter wurde die Kamera bei wenigen 0,1s Belichtungszeit auf ihrer gesamten Fläche gesättigt. Unter Verwendung der ND-Filter wurde nur das Licht nahe der Strahlachse durchgelassen. Dies führte dazu, dass die Ausleuchtung auf der CCD inhomogen mit einer starken gaussförmigen Intensitätsverteilung in einem zentralen Bereich von ca. 40 - 50 % der Gesamtfläche auftrat. Auch der zusätzlich als Komponente eingeführte Diffuser (ED1-C50) konnte keine homogene Ausleuchtung der CCD erbringen. Dieser Diffuser hat die Eigenschaft, einen gaussförmigen Lichtstrahl innerhalb eines gesamten Abstrahlwinkels von 50° zu glätten resp. abzufachen. Die Entfernung des Diffusers zur CCD wurde so gewählt, dass die Ränder der CCD unter einem Abstrahlwinkel von 40° vom Diffuser aus angestrahlt wurden. Der Bereich der CCD sollte somit gleichmäßig ausgeleuchtet werden. Aufgrund der hohen Intensität der LED entlang der Strahlachse konnte der Diffuser die Gaussform des Lichtstrahls nicht glätten, dieser wurde weiterhin auf der CCD beobachtet.

Der in Abbildung 4.6 gezeigte Versuchsaufbau konnte ebenfalls nicht für die Fokussierung auf einen kleinen Bereich verwendet werden. Die Voraussetzung, für die Fokussierung eines Lichtstrahls in den Brennpunkt der ausgewählten bi-konkaven Linse, ist parallel eintreffendes Licht. Im System mit den Kollimatoren ist davon ausgegangen worden, mit homogenem und parallelem Licht zu fokussieren. Die Linse ist in der geänderten Konfiguration nicht in der Lage, das Licht der LED zu fokussieren, da die LT nicht lang genug sind.

- **Pulseraufnahmen:** In den Abbildungen 4.7, 4.8 und 4.9 sind drei Aufnahmen unter Verwendung des Pulser bei unterschiedlichen Pulslängen von 50 ns, 800 ns und $12,8\mu s$ dargestellt. Die LED bestrahlt direkt die CCD innerhalb einer LT mit LLF (s. Abbildung 4.6 mit dem Pulser als Stromquelle der LED). Bei der Aufnahme mit einer Pulslänge von 50 ns ist im zentralen Bereich wenig Signal vorhanden und erscheint am Rand der Aufnahme. Die Aufnahme bei halber maximaler Pulsdauer von 800 ns weist über die Fläche der LED gesehen keinen ausgezeichneten Punkt hoher Intensität auf. Bei der Aufnahme mit $12,8\mu s$ kann ein Intensitätsmaximum in der Mitte der LED gesehen werden.

Man erkennt hieran ein zeitlich aufgelöstes Ansprechverhalten der LED. Je länger ein Strompuls, desto größer wird der Bereich der LED, der Photonen emittiert. Die vom Hersteller angegebene räumliche Abstrahlcharakteristik der LED tritt erst bei großen Pulslängen auf. Die gemachte Abschätzung des Photonennflusses aus Kapitel 4.3 ist deshalb für kurze Pulse unterhalb von ca. $10\mu s$ nicht anwendbar.

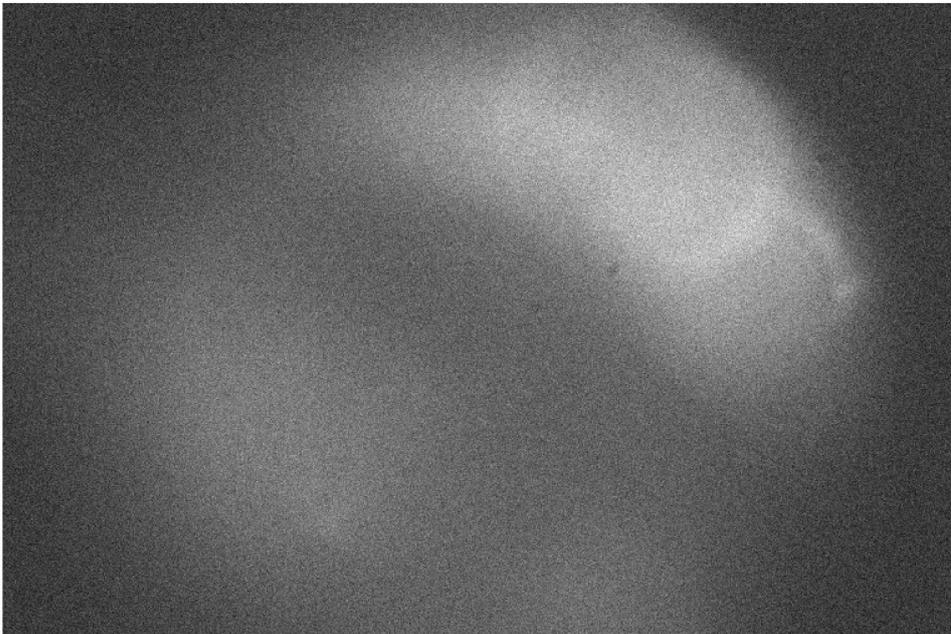


Abbildung 4.7: Aufnahme mit dem Strompulser bei 50 ns Pulslänge.

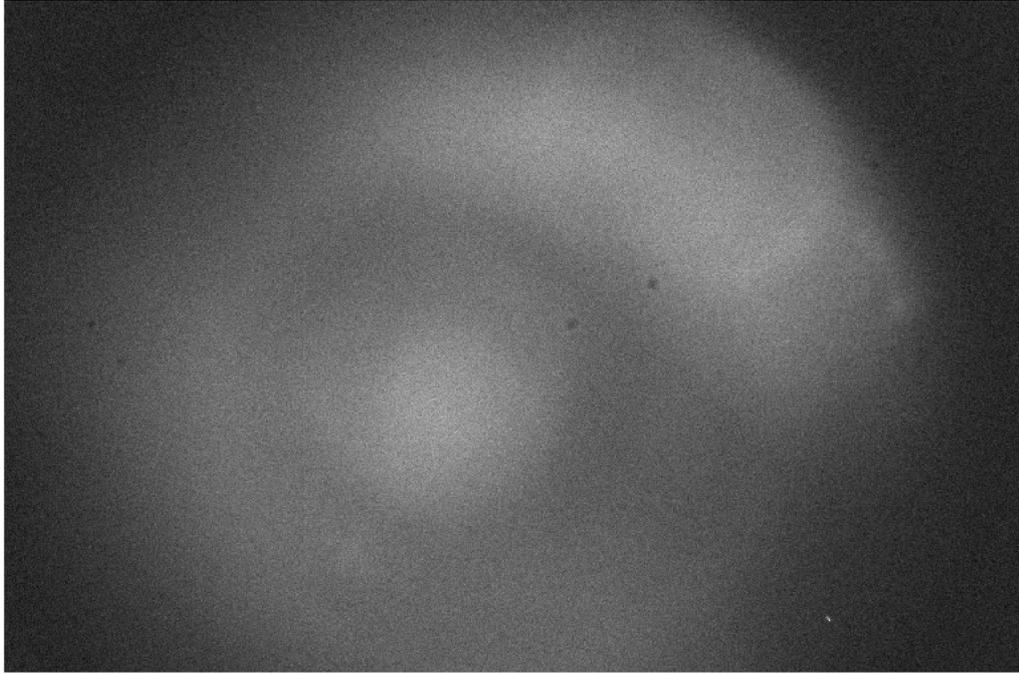


Abbildung 4.8: Aufnahme mit dem Strompulser bei 800 ns Pulslänge.

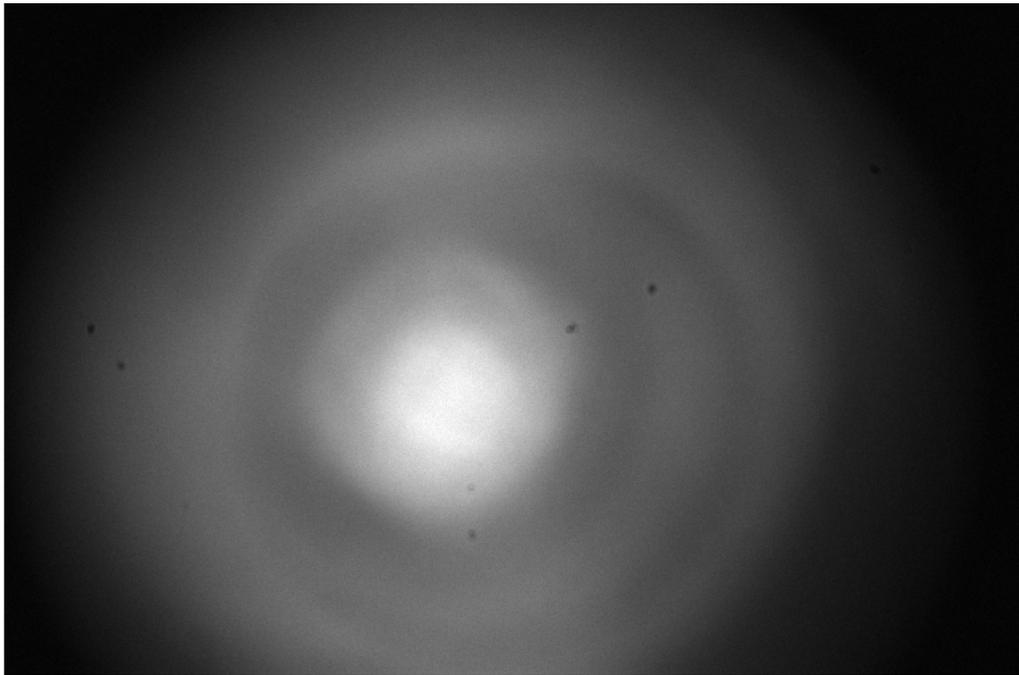


Abbildung 4.9: Aufnahme mit dem Strompulser bei $12,8\mu s$ Pulslänge.

4.5 Fazit zum simulierten ALPS-Versuchsaufbau

Im folgenden werden kurz die Nachteile der Komponenten dargestellt und Verbesserungsvorschläge für den Aufbau gemacht. Die wesentlichen Probleme beim Aufbau eines simulierten ALPS-Experiments mit den vorgestellten Versuchskomponenten sind:

- Zeitabhängige räumliche Abstrahlcharakteristik der LED
- Justierung des Brennpunktes der Linse
- Sehr geringe Transmission der Kollimatoren und der Fiber
- Zugänglichkeit der Komponenten bei Justierschritten innerhalb einer LT

Einige mögliche Verbesserungsvorschläge in der Wahl der Komponenten sind:

- Verwendung eines Laser, da hiermit homogenes, paralleles Licht bei der spezifischen Wellenlänge 532 nm erzeugt werden kann und kein LL-Filter oder Kollimatoren benötigt werden.
- Offener Aufbau z.B. mit Optikbank, die einen besseren Zugang zu den Komponenten wie Linsen und ND-Filtern bei Justierschritten bietet.
- Die CCD in Dunkelheit betreiben und Photonen kleiner Rate aus einem offenen Aufbau zuführen.

4 Versuchsaufbau für simulierte ALPS-Messung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Arbeit wurde ein Vergleich zwischen zwei Methoden durchgeführt, den Konversionsfaktor einer CCD zu messen. Zum einen wurde die von Herstellern oder Astronomen verwendete Methode angewendet, den Konversionsfaktor generell über Pixelbereiche auf der CCD zu bestimmen. Zum anderen wurde eine Methode beschrieben, den Konversionsfaktor eines einzelnen Pixels zu vermessen. Es zeigt sich, dass jedem Pixel ein eigener Konversionsfaktor zugeschrieben werden kann. Es finden sich signifikante Unterschiede im Wert des Konversionsfaktors zwischen Nachbarpixeln innerhalb von Spalten und Zeilen. Werden diese Fluktuationen als Mittelwerte betrachtet, stellt sich der allgemeine und zur Beschreibung des Konversionsfaktors herangezogene und von Herstellern angegebene Wert ein. Wird ein Einzelpixel oder ein kleiner Bereich von Pixeln zur Detektion von Photonen herangezogen, sollte jedes beteiligte Pixel auf seinen Konversionsfaktor bestimmt werden. Eine Möglichkeit zur Bestimmung besteht in der beschriebenen Methode, den Konversionsfaktor über die Steigung einer Varianz-Signal-Fitgeraden zu bestimmen. Bei Einzelphotonendetektionen mit wenigen Pixeln im Bereich von 1-2 ADU pro Pixel ist der Konversionsfaktor ebenso wichtig für die genaue Rekonstruktion der Photonenenergie und des Photonenflusses, wie z.B. die Quanteneffizienz.

Beim Versuch den ALPS-Versuch zu simulieren, konnten die vorgegebenen Bedingungen nur teilweise umgesetzt werden. Es zeigte sich beim Versuchsaufbau, dass die Kollimatoren und die Fiber den abgeschätzten Photonenfluss um 5 Größenordnungen geringer erscheinen lassen. Das System mit den Kollimatoren konnte nicht weiter als effektiver Lichtleiter angesehen werden. Der Versuchsaufbau war somit nicht mehr in der Lage paralleles Licht auf die CCD zu bringen. Mit einer gleichmäßigen Ausleuchtung bei bekannter Wellenlänge wären Untersuchungen bezüglich des Konversionsfaktors mit größerer Präzision möglich gewesen, wobei die Reproduzierbarkeit von großflächigen homogenen Belichtungen auf die CCD dabei entscheidend ist. Des Weiteren sollte das parallele Licht unter Verwendung einer Linse auf die CCD fokussiert werden, um Langzeitmessungen an Einzelpixeln vorzunehmen. Bei der LED Abstrahlcharakteristik und ohne paralleles Licht konnte keine Justierung des Fokus innerhalb einer LT erreicht werden. Die LT bieten als Umgebung eine gute Abschirmung gegen Hintergrundphotonen, sind aber bei ständig auszuführenden Justierarbeiten sehr störanfällig. Das gesamte System muss bei der Justierung einer Komponente zerlegt werden, so dass auch nicht neu zu justierende Komponenten zunächst immer entfernt werden müssen. Ein offener Aufbau ist den LT zu bevorzugen.

Die Erzeugung von mHz Photonenraten konnte mit der LED und dem Strompulsur umgesetzt werden, es zeigte sich jedoch eine starke zeitabhängige, räumliche Abstrahlcharakteristik. Eine Abschätzung des zu erwartenden Photonenflusses ist aufgrund der Unsicherheit der LED-Leistung bei kurzen Pulsen sehr fehlerhaft und kann nur sehr

grobe Richtwerte liefern.

Bei Photonenraten im Bereich von mHz wird das gesuchte Signal bei ALPS auf einen Bereich von 5 x 5 Pixeln fokussiert. Das Signal verteilt sich in einer Punktverteilungsfunktion der Optik um den zentralen Pixel, somit ist es von großem Interesse, die Eigenschaften der verwendeten Pixel zu kennen. Mit der LED und unter Verwendung der Linse konnte keine Fokussierung erreicht werden, die annähernd in dieser Größenordnung liegt.

Die wesentliche Änderung am vorgestellten Versuchsaufbau, um eine Simulierung des ALPS zu erreichen, sollte die Verwendung eines Lasers sein. Die Abschätzung der zu erwartenden Raten kann verbessert werden. Zudem werden Eichmessungen an der CCD zugänglich, die eine bekannte Abstrahlcharakteristik und gute Flussabschätzungen voraussetzen. Ebenfalls ist es ausreichend, für die CCD eine dunkle Umgebung herzustellen und das Licht von einer optischen Bank darauf zu leiten. Der Zugang zu den Komponenten wird hierdurch stark verbessert.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines MOS-Kondensators	10
2.2	Ein CCD-Chip	10
2.3	Funktionsprinzip der Photodetektion	12
2.4	Siliziumabsorbtionskoeffizient	16
2.5	Quanteneffizienzkurven von Pixis 1024 Modellen	17
3.1	Biasw SBIG-ST7E	25
3.2	Biaswert SBIG-402ME	26
3.3	Profile der Biasspannung der SBIG-ST7E	27
3.4	Profile der Biasspannung der SBIG-402ME	27
3.5	Dunkelstrom der SBIG-ST7E	28
3.6	Dunkelstrom der SBIG-402ME	29
3.7	Rauschen SBIG-7E	30
3.8	Rauschen SBIG-402ME	31
3.9	Gain SBIG-ST7E	33
3.10	Gain SBIG-402ME	33
3.11	Varianz und Signal unterschiedlicher Feldgrößen SBIG-ST7E	34
3.12	Varianz und Signal unterschiedlicher Feldgrößen SBIG-ST402ME	35
3.13	Einzelpixelgain SBIG-ST7E	36
3.14	Einzelpixelgain SBIG-402ME	36
3.15	Berechnung des Gain der Mittelpunktpixel SBIG-7E	39
3.16	Spaltenprofil des Gain SBIG-ST7E	40
3.17	Zeilenprofil des Gain SBIG-ST7E	41
3.18	Gesamtprofile der Spalten und Zeilen	42
4.1	Skizze des Versuchsaufbaus mit Iris	47
4.2	Skizze des Versuchsaufbaus	48
4.3	Spektrale Intensitätsverteilung der LED528E von Thorlabs	49
4.4	Winkelabhängige Intensitätsverteilung der LED	50
4.5	Skizze der Ausgangskonfiguration	53
4.6	Skizze der Konfigurationsänderung	54
4.7	Pulseraufnahme 50 ns	55
4.8	Pulseraufnahme 800 ns	56
4.9	Pulseraufnahme 12, 8 μ s	56

Tabellenverzeichnis

3.1	Kenngößen der SBIG Kameras	23
4.1	Charakteristika der LED528E	49

Literaturverzeichnis

- [1] R.D. Peccei und H.R. Quinn, Phys. Rev. D16 ,1791 (1977)
- [2] K. Ehret et. al, Production and Detection of Axion-Like Particles in a HERA Dipole Magnet, ALPS Letter of Intent, 2007
- [3] K. Ehret et. al, Resonant laser power build-up in ALPS - a light-shining-through-walls experiment, first results of ALPS setup 2009, arXiv:0905.4159v1
- [4] T. Gerialis for CAST Collaboration, CAST results and Axion review, 2009
- [5] G. C. Holst, CCD arrays cameras and displays;JCD Publishing, second edition, Seiten 58 ff.
- [6] Steve B. Howell, Handbook of CCD Astronomy second edition, Cambridge University Press
- [7] Apogee Instruments, CCD-University, <http://ccd.com/ccdu.html>
- [8] W. S. Boyle and G. E. Smith, Charge Coupled Semiconductor Devices, Bell Systems Technical Journal, Vol. 49
- [9] Prof. Dr. Horst Stöcker, Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, 4. korr. Auflage, Tabelle 30.9.1 Seite 1004
- [10] Herstellerseite von Thorlabs, www.thorlabs.de
- [11] Bestellkatalog V19, Thorlabs
- [12] J. Schütt, CAN controlled programmable Single pulse output, TEB der Universität Hamburg, 13.Nov.2008
- [13] Bedienungsanleitung zum PCAN-USB von PEAK Systems, http://www.peak-system.com/produktcd/Pdf/Deutsch/PCAN-USB_UserMan_deu.pdf

Erklärung:

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

Hamburg, den 14. Oktober 2009

Sönke Cramme