

# **Eigenschaften optischer CCDs**

## **Gruppe 1**

Udo Beier

Leon Brückner  
Sebastian Ziegler

Valentin Olpp

März 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Methoden</b>	<b>6</b>
3.1	Halbleiter . . . . .	6
3.1.1	Bändermodell . . . . .	6
3.1.2	Dotierung . . . . .	6
3.2	Aufbau und Funktion eines CCD-Chips . . . . .	7
3.3	Bildfehler und -korrekturen . . . . .	7
3.4	Der Gain-Faktor . . . . .	9
3.5	Durchführung . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>11</b>
4.1	Messung des Dunkelstroms in Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	11
4.2	Bestimmung des Bias . . . . .	11
4.3	Bestimmung des Gain-Faktors . . . . .	13
4.4	Untersuchung der Linearität des CCDs . . . . .	13
4.5	Blooming und Smear . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>19</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Aufnahme eines dark frames bei $-3^{\circ}\text{C}$ . . . . .	11
2	Auftragung von Dunkelstrom über der CCD-Temperatur . . . . .	12
3	Aufnahme eines bias frame . . . . .	12
4	Auftragung des gemessenen ADU-Wertes über der einfallenden Lichtintensität . . . . .	14
5	Aufnahme der Diode bei extremer Überbelichtung . . . . .	15
6	Erste Aufnahme nach Belichtungsbeginn . . . . .	15
7	Zweite Aufnahme . . . . .	16
8	Aufnahme nach Einführen des Blattes . . . . .	16

## Tabellenverzeichnis

1	Messwerte für den Dunkelstrom in Abhängigkeit der CCD-Betriebstemperatur	19
2	Messung des Gain-Faktors für verschiedene Belichtungszeiten . . . . .	19
3	Gemessener ADU-Wert über dem Anteil des transmittierten Lichts . . . .	20

## 1 Abstract

Zur Untersuchung der Eigenschaften optischer CCDs wurden der Zusammenhang zwischen Dunkelstrom und Temperatur des CCD-Chips, der Gain-Faktor der verwendeten Kamera sowie der Zusammenhang zwischen Lichteinfall und ADU-Output überprüft, daneben wurden bias frames aufgenommen und die Effekte „smear“ und „blooming“ untersucht. Es konnte näherungsweise ein exponentieller Zusammenhang zwischen Dunkelstrom und Temperatur, sowie ein kaum von der Belichtungszeit abhängiger Gain-Faktor  $\bar{g} = 1.94 \pm 0.04 \frac{\text{adu}}{\text{e}}$  beobachtet werden. Der Zusammenhang zwischen Lichteinfall und ADU-Output ergab sich in Näherung als linear, allerdings sichtbar fehlerbehaftet.

## 2 Einleitung

Zu Beginn der Photographie im 19. Jahrhundert wurden Photoplatten verwendet, um optische Eindrücke festzuhalten. Diese waren mit Silbernitrat beschichtet und verfärbten sich je nach Stärke des Lichteinfalls unterschiedlich dunkel, desweiteren waren aufwendige chemische Prozesse notwendig, um eine weitere Verdunklung bei Lichteinfall nach der gewünschten Belichtungszeit zu verhindern. Im Laufe der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde dieses Prinzip von digitalen Aufnahmemethoden abgelöst, die insbesondere den Vorteil bieten, dass sie im Gegensatz zu den teuren Photoplatten mehrmals verwendbar sind.

Ein Beispiel für solche Technologie ist der CCD-Chip, der heute neben den CMOS-Elementen für digitale Aufnahmen verwendet wird. Ein solcher CCD-Chip besteht aus Halbleiterelementen, in denen bei Lichteinfall Ladung ausgelöst wird, die anschließend ausgelesen und in ein digitales Signal umgewandelt werden kann.

In diesem Versuch sollen die Eigenschaften von CCDs näher untersucht werden. Insbesondere wird dabei auf gängige Methoden zur Bildverbesserung sowie auf Effekte, die sich aus dem Ausleseprozess ergeben, eingegangen.

## 3 Methoden

### 3.1 Halbleiter

Im Folgenden nach [Ast]

#### 3.1.1 Bändermodell

In Kristallgittern überlagern sich die Energieniveaus der benachbarten Atome und es entstehen Energiebänder anstatt der diskreten Niveaus. Das höchste Band, in dem sich Elektronen frei bewegen können, heißt Leitungsband, das Band darunter, in dem sich die Valenzelektronen der Atome befinden, heißt Valenzband. In Leitern überschneiden sich Valenzband und Leitungsband, sodass es stets frei bewegliche Elektronen gibt, in Halbleitern und Isolatoren gibt es eine Lücke zwischen den beiden Bändern. Die Trennung zwischen Halbleitern und Isolatoren wird anhand der Größe der Bandlücke definiert.

#### 3.1.2 Dotierung

In das Kristallgitter von Halbleitern können Fremdatome eingearbeitet werden, die dann die Bandlücke und damit die Leitfähigkeit ändern. So kann man z.B. in Silizium Phosphor- und Boratome einbringen. Silizium hat 4 Valenzelektronen, Phosphor besitzt 5. Durch die Einbringung („Dotierung“) kommen also überzählige Elektronen hinzu, die nun leicht ins Leitungsband wechseln können (genannt Elektronenleitung oder n-Leitung). Bor hat nur 3 Valenzelektronen, also entstehen durch die Einbringung Elektronenfehlstellen, die Elektronen aus dem Valenzband anlagern (Löcherleitung, p-Leitung).

Bringt man nun eine p-dotierte und eine n-dotierte Schicht zusammen, diffundieren die Elektronen aus dem Leitungsband in die Elektronenfehlstellen des Valenzbands. Das p-dotierte Gebiet wird dadurch negativ aufgeladen, das n-dotierte positiv, es entsteht ein elektrisches Feld, das vom n- ins p-Gebiet gerichtet wird. Legt man nun zwischen den beiden Schichten eine Spannung an, so verschieben sich die Bänder. Wenn an das p-Gebiet der Pluspol und an das n-Gebiet der Minuspol angeschlossen, verschieben sich die Bänder zueinander hin und das Halbleiterelement leitet Strom („Durchlassrichtung“). Wird die Spannung andersrum angelegt, verschieben sich die Bänder voneinander weg und es kann kein Strom fließen („Sperrrichtung“).

Trifft ein Photon auf ein Halbleiterelement, absorbieren die Elektronen die Energie des Photons und können damit die Bandlücke überwinden, wodurch kurzzeitig ein Strom fließt. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Energie des Photons größer als die Bandlücke ist. Durch thermische Effekte entstehen jedoch Gitterschwingungen, wodurch das Photon mehr Energie als die Bandlücke aufwenden muss.

In der folgenden Rechnung soll überprüft werden, wie viele Elektronen durch ein Photon aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums gelöst werden können.

Für die Energie eines Photons gilt:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

Dementsprechend folgt für eine Wellenlänge von 450 nm:

$$E = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \frac{3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{450 \text{ nm}} = 2.8 \text{ eV}. \quad (2)$$

Die Energie eines einfallenden Photons reicht also für zwei Elektron/Lochpaare aus. Somit können zwei Elektronen ausgelöst werden.

Für rotes Licht (etwa Wellenlänge  $\lambda = 700 \text{ nm}$ ) ergibt eine analoge Rechnung eine Energie von 1.7 eV. Unter der Annahme, dass nur die Bandlücke von 1.12 eV aufgebracht werden muss, ist das CCD rot-empfindlich. Da aufgrund von Gitterschwingungen zusätzliche Energie aufgebracht werden muss, welche im Mittel etwa 2.56 eV beträgt, ist der CCD-Chip nur schwach rot-empfindlich, da nur wenige der Photonen tatsächlich Elektronen auslösen.

### 3.2 Aufbau und Funktion eines CCD-Chips

Ein CCD-Chip setzt sich aus einer rechtecksgitterförmigen Anordnung von Halbleiterelementen, sogenannten Pixeln, zusammen. Wird der Halbleiter allerdings mit Photonen hinreichend großer Energie bestrahlt, so kann das Photon ein oder mehrere Paare von Elektronen und Löchern aus dem Gitter lösen, die schließlich in einem Potenzialtopf gesammelt werden.

Die einzelnen Pixel sind spaltenweise gegeneinander isoliert, allerdings nicht zeilenweise. Durch Anlegen einer zeitlich gepulsten Spannung ( $\Phi$ -Puls) an die Spalten werden die in den Potenzialtöpfen während der Beleuchtung des Chips gesammelten Elektronen während dem Ausleseprozess Zeile für Zeile in Ausleserichtung verschoben. Am Rand des Gitters befindet sich in Ausleserichtung die Ausleseelektronik, die die Ladungsmenge pro Pixel misst und digitalisiert. Durch den Ausleseprozess sowie aufgrund von Fehlern in der Struktur des CCD-Chips entstehen verschiedene Bildfehler, die im Folgenden dargestellt werden.

### 3.3 Bildfehler und -korrekturen

Die folgenden Informationen wurden entnommen aus [Ber]. CCD-Kameras zählen die auf den Chip auftreffenden Photonen und rechnen diese in ein Signal um. Dabei ist jedoch zunächst zu beachten, dass Photonen nicht gleichmäßig auf den Chip auftreffen, sondern zufällig verteilt. Dabei ergibt sich für die Anzahl der detektierten Photonen pro Zeiteinheit eine Poisson-Verteilung. Bei wiederholten Messungen bekommt man also auch jeweils verschiedene Werte. Dies wäre bei herkömmlichen, z.B. tagsüber aufgenommenen Bildern egal, da dort enorm viele Photonen auftreffen und die kleinen Variationen keinen Unterschied machen. Die Zahl der auftreffenden Photonen bei astronomischen Aufnahmen ist aber so gering, dass die zufälligen Variationen großen Einfluss nehmen können.

Bei mehreren Bildern wird für jeden Pixel ein Mittelwert und eine Standardabweichung (auch 'noise' genannt) für die Photonenzahl bestimmt. Anhand dessen wird ein Maß für die Qualität eines Bildes definiert, die „Signal-to-noise ratio“ (SNR)  $\frac{\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}}} = \sqrt{\bar{x}}$ . Daraus lässt sich auch erkennen, dass eine größere Anzahl detektierter Photonen eine bessere

Bildqualität liefert.

Die reine statistische Varianz der ankommenden Photonen ist aber nicht die einzige Quelle für Fehler bzw. Abweichungen. So ist der von der CCD-Kamera ausgegebene Wert für jeden Pixel nicht einfach die Zahl der detektierten Photonen, sondern ein Wert in einer willkürlich gewählten Einheit (genannt 'analog-to-digital unit' oder ADU). Der Zusammenhang zwischen den gelösten Elektronen und dem Wert in ADU heißt 'Gain-Faktor'  $g$ . Insbesondere führen 0 detektierte Photonen zu einem ADU größer 0. Grund hierfür ist der bias, der dem Signal in der Ausleseelektronik hinzugefügt wird, um einen Auslesewert von unter 0 ADU zu verhindern, der zu aufgrund des analog-digital-Wandlers einem scheinbar extrem hohen Signal führen würde. So besitzen die meisten Kameras einen Offset (genannt 'bias'), der vom Messwert abgezogen werden muss. Dieser Offset kann bestimmt werden, indem ein 'bias frame', also ein Bild mit minimaler Belichtungszeit aufgenommen wird. Dieser 'bias frame' muss dann vom eigentlichen Bild abgezogen werden, um ein Ergebnis, das proportional zur Anzahl der detektierten Photonen ist, zu erhalten. Ein weiterer Effekt der Signalwandlelektronik ist der 'readout noise', die Unsicherheit des bias.

Der CCD-Chip selbst hat auch Fehlerquellen. Defekte im Kristallgitter der Halbleiterstruktur führen zu 'hot pixels' (zu kleine Bandlücke, sodass immer Elektronen herausgelöst werden), 'dead pixels' (zu große Bandlücke, sodass nie Elektronen herausgelöst werden), außerdem führen thermische Effekte (nicht ausreichende Kühlung) ebenfalls dazu, dass Elektronen gelöst werden, ohne dass ein Photon auf den Chip auftrifft. Die thermischen Effekte und 'hot pixels' können mittels einer 'dark frame'-Aufnahme, also einer Aufnahme mit identischer Belichtungszeit zur eigentlichen Aufnahme, aber ohne Lichteinfall (z.B. mit geschlossenem Shutter), korrigiert werden. Auf dem 'dark frame' sind also nur die Fehler des Chips zu sehen. Zur Korrektur wird das dark frame vom flat subtrahiert, um hot pixels und den Fehler durch Dunkelstrom zu beheben. Da die Auslösung der Elektronen durch thermische Effekte aber auch ein Zufallsprozess ist, kommt durch die 'dark frame'-Aufnahme eine weitere Unsicherheit hinzu ('dark current noise'). 'Dead pixels' können in der Nachbearbeitung behoben werden, indem der Wert des defekten Pixels als Mittelwert der beiden benachbarten Pixel berechnet wird.

Der dritte wichtige Faktor, der das Bild verfälschen kann, ist der eigentliche optische Aufbau, (d.h. Teleskop, Okular, Filter, etc.) Reflexionen, Staub, Linsen-/Spiegelfehler usw., sowie die unterschiedliche Empfindlichkeit verschiedener Pixel auf Photoneneinfall (z. B. aufgrund leicht unterschiedlicher Bandlücken) erzeugen auf dem Bild sichtbare Artefakte. Um diese zu entfernen, wird ein 'flat field' aufgenommen, ein homogen ausgeleuchtetes Bild. Dieses Bild sollte möglichst hell sein (also eine große signal-to-noise ratio besitzen), um wenig zusätzliche Unsicherheiten in das fertige Bild einzubringen. Außerdem kann noch ein 'flat dark frame' aufgenommen werden. Dieser 'flat dark frame' wird dann analog zum dark frame bei der eigentlichen Aufnahme vom flat field subtrahiert. Diese eigentliche Aufnahme (die schon mittels bias und dark frame verbessert wurde) wird schließlich mit dem flat field gewichtet (d.h. dadurch geteilt).

Ein letzter, wichtiger Aspekt für astronomische Aufnahmen ist der Einfluss der Lichtverschmutzung, der durch die OSR („object-to-sky ratio“) beschrieben wird. Dieser kann in städtischen Gebieten (also auch in Bamberg) sehr groß sein, ist aber für diesen Versuch



irrelevant.

„Blooming“ und „Smear“ sind zwei weitere Effekte, die bei Aufnahmen mit CCD-Chips auftreten können. „Blooming“ bezeichnet den Effekt, dass Pixel im CCD-Chip überbelichtet werden, sodass Elektronen in benachbarte Pixel wandern. Dies führt zu einem hellen Schein um das überbelichtete Pixel herum.

Beim sogenannten „Smear“ muss der Shutter deaktiviert sein. Es kommt während des Auslesevorgangs zu weiterer Belichtung der Pixel, sodass in der stark belichteten Spalte ein heller Streifen wahrnehmbar ist.

### 3.4 Der Gain-Faktor

$$\sigma_{EL} = g \cdot \sigma_{ADU}, \quad (3)$$

$$N_{EL} = g \cdot N_{ADU} \quad (4)$$

und

$$\sigma_{EL} = \sqrt{N_{EL}}. \quad (5)$$

Aus (3) ergibt sich:

$$\sigma_{EL}^2 = N_{EL}, \quad (6)$$

sodass gilt:

$$N_{EL} = g^2 \cdot \sigma_{ADU}^2 = g \cdot N_{ADU}. \quad (7)$$

Daraus ergibt sich:

$$g = \frac{N_{ADU}}{\sigma_{ADU}^2} \quad (8)$$

Das gesamte detektierte Signal (in ADU) in der ursprünglichen Aufnahme  $S_{raw}$  ist gegeben durch

$$S_{raw} = \frac{x}{g} + \frac{x_d}{g} + b \quad (9)$$

, wobei  $x$  die Anzahl der detektierten Elektronen,  $x_d$  der Dunkelstrom, also die Anzahl der durch CCD-Effekte herausgelösten Elektronen,  $g$  der Gain-Faktor und  $b$  der Bias ist.

Die gesamte Unsicherheit  $\sigma_{raw}$  (in ADU) der ursprünglichen Aufnahme berechnet sich durch

$$\sigma_{raw}^2 = \sigma_b^2 + \frac{\sigma^2}{g^2} + \frac{\sigma_d^2}{g^2} \quad (10)$$

wobei  $\sigma$  die Standardabweichung der detektierten Elektronen,  $\sigma_d$  der dark current noise und  $\sigma_b$  der readout noise ist.

Durch Umstellen ergibt sich:

$$x + x_d = (S_{raw} - b) \cdot g. \quad (11)$$

Da sowohl  $x$  als auch  $x_d$  Poisson-verteilt sind, folgt:

$$\sigma^2 + \sigma_d^2 = x + x_d = (S_{raw} - b) \cdot g \quad (12)$$

und mit (10) ergibt sich:

$$(S_{raw} - b) \cdot g = x + x_d = \sigma^2 + \sigma_d^2 = g^2 \cdot (\sigma_{row}^2 - \sigma_b^2). \quad (13)$$

Daraus folgt direkt:

$$g = \frac{(S_{raw} - b)}{\sigma_{row}^2 - \sigma_b^2}. \quad (14)$$

Für zwei systematisch gleiche Aufnahmen kann statt  $S_{raw}$  auch der Mittelwert von  $S_{raw,A_1}$  und  $S_{raw,A_2}$  betrachtet werden. Gleiches gilt für zwei systematisch gleiche bias frames. Weiter gilt nach der in [Ast] angegebene Formel:

$$\sigma_{raw}^2 = \frac{\sigma^2(A_1 - A_2)}{2}, \quad (15)$$

wobei  $A_1$  und  $A_2$  die beiden systematisch gleichen Aufnahmen sind. Gleiches gilt für die beiden systematisch gleichen bias frames. Somit ergibt sich durch Einsetzen:

$$g = \frac{(S_{raw} - b)}{\sigma_{row}^2 - \sigma_b^2} = g = \frac{\frac{S_{raw,A_1} + S_{raw,A_2}}{2} - \frac{b_1 + b_2}{2}}{\frac{\sigma^2(A_1 - A_2)}{2} - \frac{\sigma^2(B_1 - B_2)}{2}} = \frac{S_{raw,A_1} + S_{raw,A_2} - b_1 - b_2}{\sigma^2(A_1 - A_2) - \sigma^2(B_1 - B_2)}. \quad (16)$$

Diese Formel wird zur Berechnung des Gain-Faktors verwendet.

### 3.5 Durchführung

In diesem Versuch soll zunächst die ideale Betriebstemperatur für den CCD-Chip ermittelt werden, also die Temperatur, bei der der Dunkelstrom minimal ist. Dazu werden verschiedene Temperaturen eingestellt und dann ein dark frame aufgenommen und ausgewertet. Es ist zu beachten, dass sich die Temperatur erst einpendeln muss, bevor eine Messung durchgeführt werden kann.

Weiter sollen bias frames und flat fields aufgenommen werden, um hieraus einen Wert für den Gain-Faktor zu bestimmen. Dazu wird mit der CCD-Kamera das Bild eines mit einem Baustrahler weitgehend homogen ausgeleuchteten Blatts Papier an der etwa drei Meter von der Kamera entfernten Tür aufgenommen und ausgewertet. Es ist hier zu beachten, dass das Bild nicht überbelichtet sein darf, da es andernfalls zu unerwünschten Effekten wie etwa blooming kommen kann.

Schließlich soll der Zusammenhang zwischen der Intensität des einfallenden Lichts und dem ADU-Output des CCD-Chips untersucht werden, indem Filter verschiedener Stärke vor der CCD-Kamera montiert werden. Für sämtliche, auch durch mehrere Filter erzeugte, Filterstärken wird die Helligkeit einer aufgenommenen LED ausgewertet. Weiter werden die angesprochenen Effekte „blooming“ und „smear“ untersucht.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Messung des Dunkelstroms in Abhängigkeit von der Temperatur

Zunächst wurden bei einer Belichtungszeit von 30 Sekunden dark frames bei verschiedenen Temperaturen des Chips aufgenommen, um die ideale Betriebstemperatur des CCD zu ermitteln. Eine beispielhafte Aufnahme bei  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist in Abb. 1 dargestellt.

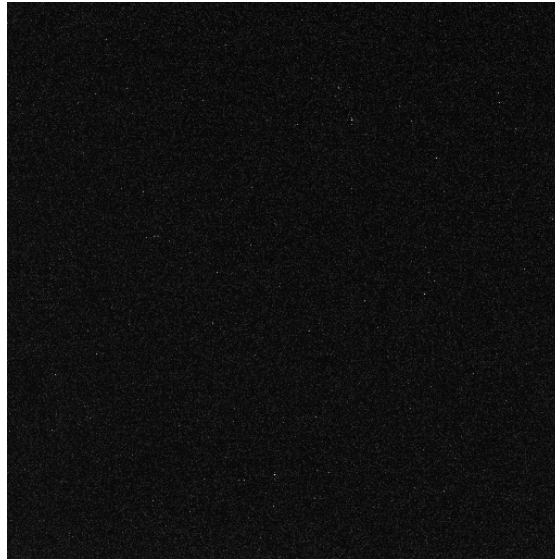


Abbildung 1: Aufnahme eines dark frames bei  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Hierbei ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Werte, welche in Abb. 2 graphisch dargestellt sind. Hier wurde der Verlauf mit einer Exponentialfunktion  $f(T) = a \cdot \exp(T \cdot c) + b$  gefittet, welche theoretisch zu erwarten ist, da die Energie der Elektronen im Halbleiter prinzipiell Boltzmann-verteilt ist.

Es ergibt sich also eine ideale Temperatur von etwa  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  im betrachteten Intervall von  $-15$  bis  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eine tiefere Temperatur ist aufgrund der begrenzten Kühlleistung des CCD-Chips nicht erreichbar. Für die Fitparameter ergibt sich:  $a = 40.0\text{ adu}$ ,  $c = 0.119\frac{1}{\text{K}}$ ,  $b = 124.2\text{ adu}$ . Augenscheinlich approximiert der Fit die Messdaten sehr gut, die variance of residuals ergibt sich nach gnuplot zu 12.06.

### 4.2 Bestimmung des Bias

Die Aufnahme eines bias frames bei einer Belichtungszeit von 0.12 s ist in Abb. 3 zu sehen, wobei die Helligkeit zur besseren Darstellung erhöht wurde. Neben dem Rauschen im Hintergrund erkennt man mehrere senkrechte gepunktete Linien. Diese sind auf ein hot pixel in der entsprechenden Spalte zurückzuführen. Aufgrund des „schubweisen“ Auslesens der Zeilen, welches laut dem Betreuer durch Speicherüberläufe in der Ausleseelektronik verursacht wird, kommt es in regelmäßigen zeitlichen Abständen zu einer Verzögerung beim Auslesen und somit zu hellen Punkten mit räumlich gleichem Abstand.

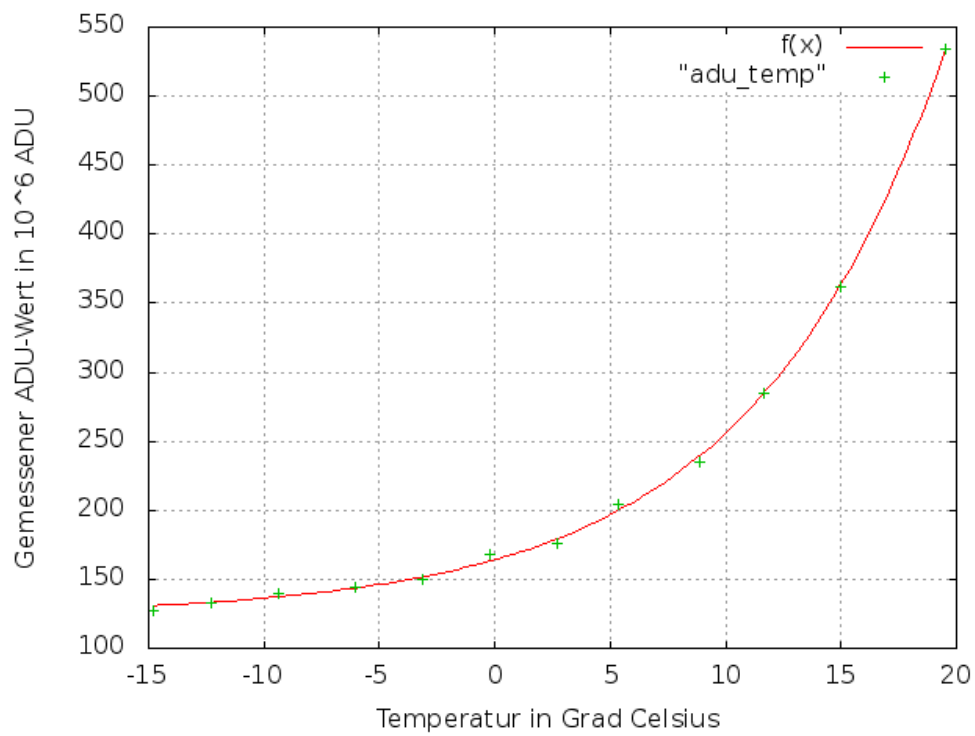


Abbildung 2: Auftragung von Dunkelstrom über der CCD-Temperatur

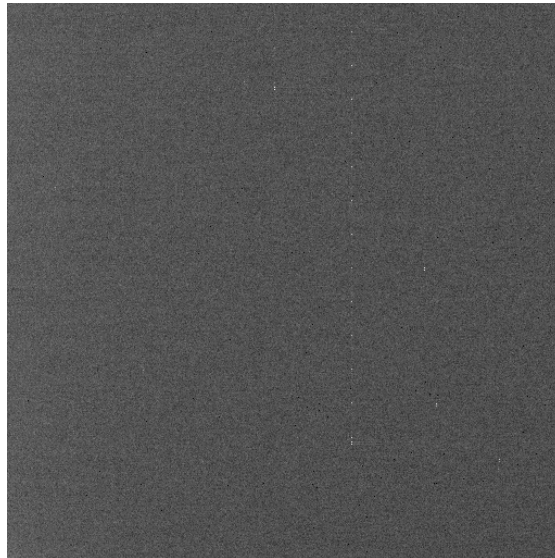


Abbildung 3: Aufnahme eines bias frame

Des weiteren ist ein leichter Helligkeitsgradient von links nach rechts sichtbar. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich ein Temperaturgradient im CCD-Chip und ein somit räumlich

unterschiedlicher Dunkelstrom. Eine weitere Erklärung wäre ein Elektronenverlust beim Auslesen der Zeile, sodass die zuerst ausgelesenen Pixel heller als die nachfolgenden erscheinen.

Es wurden insgesamt 11 bias frames aufgenommen, deren mittlerer ADU-Wert sich zu  $115.6 \pm 1.07$  ergibt, wobei der hier angegebene Fehler die Standardabweichung der ADU-Werte ist.

### 4.3 Bestimmung des Gain-Faktors

Hierzu wurden zu verschiedenen Belichtungszeiten je zwei flat field-Aufnahmen eines homogen ausgeleuchteten Blatts Papier angefertigt. Damit auch bei maximaler Belichtungszeit kein überbelichtetes Bild aufgenommen wurde, musste insgesamt ein Filter der Stärke 2048, der also nur  $\frac{1}{2048}$  des Lichts transmittiert, verwendet werden. Zur Bestimmung des Gain-Faktors werden zu jeder Belichtungsdauer je zwei flat fields aufgenommen und ausgewertet. Dabei ergeben sich mit der Formel (16) die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

Für den Fehler wurde der Fehler von  $N_{ADU}(A)$ ,  $N_{ADU}(C)$ ,  $N_{ADU}(\overline{B_1})$ ,  $N_{ADU}(\overline{B_2})$  sowie eine auf (16) aufbauende Fehlerfortpflanzung verwendet:

$$\begin{aligned} \delta g &= \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\sigma_{ADU}^2(A-C) - \sigma_{ADU}^2(B_1-B_2)}\right)^2 \cdot (\delta N_{ADU}(A)^2 + \delta N_{ADU}(C)^2 + \delta N_{ADU}(\overline{B_1})^2 + \delta N_{ADU}(\overline{B_2})^2)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Hierbei wurden nur für die im Zähler vorkommenden Werte Fehler verwendet. Für die Standardabweichungen im Nenner ist es schwierig, Fehler zu bestimmen, sodass diese nicht in der Fehlerfortpflanzung verwendet werden.

Als gemittelter Wert ergibt sich

$$\bar{g} = 1.94 \pm 0.04 \frac{\text{ADU}}{\text{e}}. \quad (18)$$

Die Werte für den Gain-Faktor sind zwar alle im gleichen Bereich, es ist aber eine leichte Tendenz zu kleineren Gain-Faktoren bei größeren Belichtungszeiten erkennbar. Der Grund hierfür dürfte in Fehlern, die sich in der statistischen Betrachtung zur Herleitung der Formel für den Gain-Faktor ergeben, liegen.

### 4.4 Untersuchung der Linearität des CCDs

In Tabelle 3 sind die gemessenen ADU-Werte aufgetragen über dem transmittierten Licht als Anteil der Lichtintensität, wobei die Helligkeit über einer rechteckigen Fläche, die die gesamte Diode einschließt, aufintegriert wurde. Da, laut dem Betreuer, die Werte für die aufintegrierte Intensität Poisson-verteilt ist, ergibt sich der Fehler als Quadratwurzel der gemessenen und aufintegrierten ADU-Werte.

Plottet man die ermittelten Werte, so ergibt sich der in Abb. 4 dargestellte Verlauf. Werden die Datenpunkte mit der Funktion

$$f(x) = a \cdot x + b \quad (19)$$

gefittet, so ergeben sich die Werte  $a = (119 \pm 5.0) \cdot 10^6 \text{ ADU}$  und  $b = (2.8 \pm 1.4) \cdot 10^6 \text{ ADU}$ . Der Fit approximiert die Punkte nahe der Null sehr gut, die Punkte mit höherer Intensität

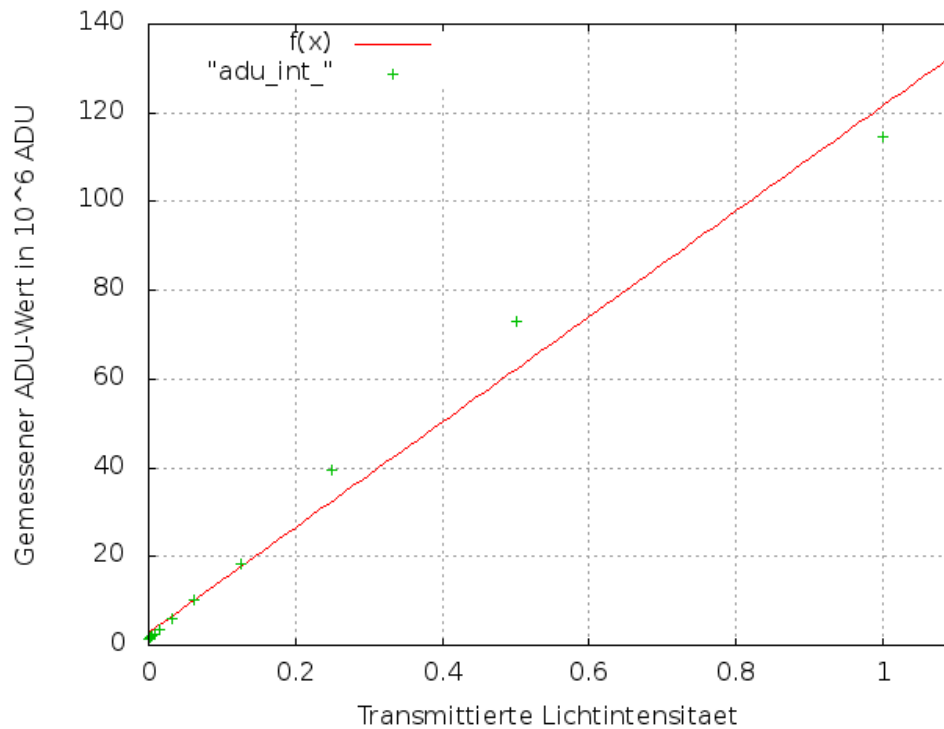


Abbildung 4: Auftragung des gemessenen ADU-Wertes über der einfallenden Lichtintensität

jedoch eher schlecht. Grund hierfür ist insbesondere der Wert bei Intensität 1, d.h. ohne Filter. Möglicherweise fand hier trotz entsprechender Blendeneinstellung von 5.6f eine Überbelichtung statt. Die variance of residuals ergibt sich zu 18.9.

#### 4.5 Blooming und Smear

In Abbildung 5 (logarithmische Darstellung) ist eine Aufnahme der Diode bei starker Überbelichtung dargestellt, was durch eine Belichtungszeit von 5 Sekunden und einer Blende von 8f erreicht wurde. Man erkennt, dass nicht nur die tatsächlich überbelichteten Pixel hell sind, sondern auch die spaltenweise benachbarten Pixel. Der Grund hierfür ist, dass die Potentialtöpfe der einzelnen Pixel schlicht „überlaufen“, sodass Elektronen in benachbarte Pixel wandern. Dies geschieht vor allem innerhalb der Spalten und nur wenig in den Zeilen, da diese gegeneinander isoliert sind. Im Gegensatz dazu werden die Elektronen in den Spalten verschoben, sodass diese nicht isoliert sein dürfen.

Zur Veranschaulichung des Smear-Effektes wurden Aufnahmen bei deaktiviertem Shutter,

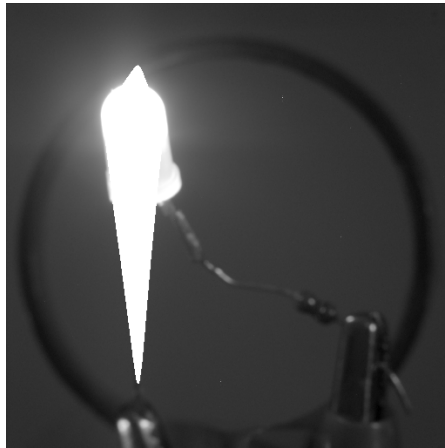


Abbildung 5: Aufnahme der Diode bei extremer Überbelichtung

einer Belichtungszeit von 0.5 Sekunden und ebenfalls einer Blende von 8f gemacht, wobei der Strahlengang zunächst durch ein Blatt Papier unterbrochen war, dass dann entfernt wurde. Die Ausleseelektronik befindet sich hier am oberen Bildrand. Bei der ersten Aufnahme zeigte sich das in 6 dargestellte Bild (hier in logarithmischer Darstellung).

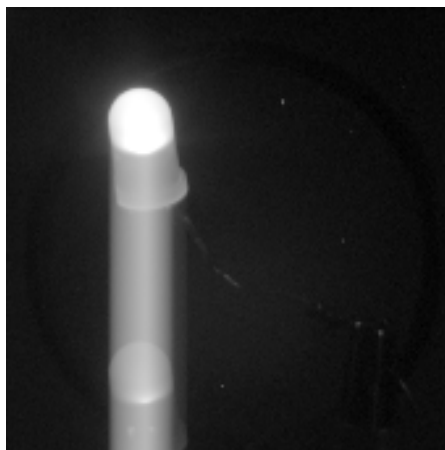


Abbildung 6: Erste Aufnahme nach Belichtungsbeginn

Der Effekt erklärt sich folgendermaßen:

An eine Belichtung des CCD-Chips schließt sich ein Auslesevorgang an, während dem der Chip weiter beleuchtet wird, da der Shutter geöffnet ist. Zu Beginn des Auslesens sind die ersten ausgelesenen Pixel unbelichtet. Wird das erste stark belichtete Pixel ausgelesen, so ergibt sich ein heller Punkt. Die diesem Pixel nachfolgenden Pixel wurden, da der Shutter geöffnet war, während des Auslesens weiter belichtet, sodass sie heller als der Hintergrund erscheinen. Diese Pixel liegen vom stark belichteten Pixel entgegen der Ausleserichtung. Bei der zweiten Aufnahme ist dann ein durchgehender „smear“ erkennbar, was daran

liegt, dass die Pixel vor dem stark belichteten Pixel noch während des vorhergehenden Ausleseprozesses belichtet werden, sodass noch vor der eigentlichen Belichtung sich bereits Elektronen in den Potentialtöpfen befinden. Somit erscheint ein durchgehend heller Strich in der Spalte. Dies ist in Abb. 7 (ebenfalls in logarithmischer Darstellung) dargestellt.

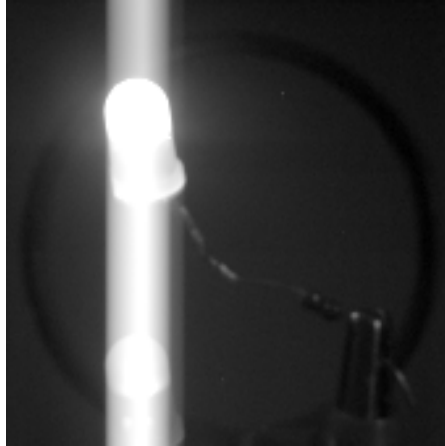


Abbildung 7: Zweite Aufnahme

Wird nun das Blatt Papier während (hier eher zum Ende) der Belichtung in den Strahlengang eingeführt, so ergibt sich die in Abb. 8 (ebenfalls logarithmisch) dargestellte Aufnahme.

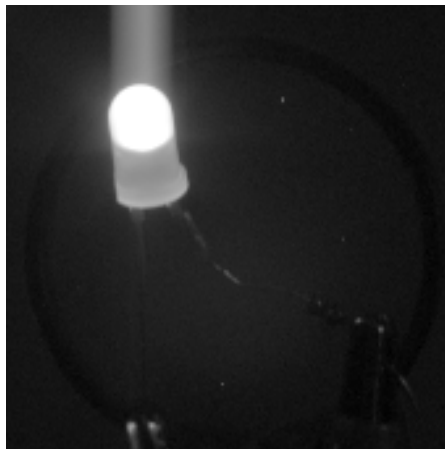


Abbildung 8: Aufnahme nach Einführen des Blattes

Der Grund für diese Erscheinung ist zunächst, dass die oberen Pixel wiederum während des vorherigen Auslesens belichtet werden und somit hell erscheinen. Auch das primäre Bild der Diode ist sichtbar, da der Strahlengang erst am Ende der Belichtungszeit unterbrochen wurde. Nach dem Einführen des Blattes in den Strahlengang werden keine weiteren Pixel belichtet, sodass der smear-Effekt unterhalb der Diode nicht auftritt, das



Blatt ersetzt quasi den Shutter der Kamera.

## 5 Diskussion

Für die ideale Betriebstemperatur des CCD-Chips ergab sich hier ein Wert von  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , der allerdings durch die eingeschränkte Kühlleistung der Kamera nach unten beschränkt ist. Würde man eine verbesserte Kühlung verwendet, so wäre eine tiefere Temperatur und wahrscheinlich auch ein noch geringerer Dunkelstrom zu erwarten.

Der geplottete Verlauf entspricht weitgehend den theoretischen Erwartungen:

Die Elektronen im Halbleitermaterial sind Boltzmann-verteilt, die Anzahl pro Energie und Temperatur geht also mit  $e^{(-\frac{E}{k \cdot T})}$ . Der exponentielle Anstieg des Dunkelstroms mit der Temperatur findet sich auch im entsprechenden Plot wieder.

Der offset der Exponentialfunktion ist wahrscheinlich auf den bias des CCD-Chips zurückzuführen, also den ADU-Wert, der auch bei minimaler Belichtungszeit und geschlossener Blende messbar ist.

Bei der Berechnung des Gain-Faktors ergibt sich zwar eine Tendenz bei unterschiedlichen Belichtungszeiten, allerdings ist der Fehler des Gain-Faktors verhältnismässig klein. Für eine Verbesserung der Bestimmung des Gain-Faktors dürfte eine genauere Aufschlüsselung der Beiträge zur Streuung hilfreich sein, sodass eine genauere Bestimmung von  $\sigma^{stat}$  möglich sein dürfte.

Bei der Betrachtung des ADU-Outputs über der Intensität des eingestrahnten Lichts ergibt sich in guter Näherung eine lineare Abhängigkeit. Allerdings sind die ADU-Werte für grössere Intensitäten geringer als durch Interpolation des linearen Verlaufs zu erwarten wäre. Grund hierfür kann sein, dass bei großen Intensitäten einige Pixel der Aufnahme doch überbelichtet sind, sodass hier der ADU-Wert konstant bei dem Maximalwert von etwa 65500 liegt. Des weiteren wurde bei der Auswertung ein Rechteck, das genau die Diode einschloss, betrachtet und aufintegriert. Hierbei ist zunächst der von der von der eingestrahnten Intensität unabhängige Dunkelstrom ein Fehler, der insbesondere bei geringen Helligkeiten eine zunehmend große Rolle spielt. Weiter ist es bei den kaum belichteten Aufnahmen schwierig, die Diode exakt „einzurahmen“, sodass hier unterschiedliche Bereiche betrachtet werden. Dieser Fehler könnte vermieden werden, indem man leichte Störungen der Anordnung von Diode und Kamera verhindert und anschließend immer den gleichen Bildausschnitt betrachtet. Eine weitere Fehlerquelle können auch die Filter sein, die möglicherweise nicht exakt den angegebenen Absorptionsgrad aufweisen.

Eventuell könnte die Messung verbessert werden, indem man statt einer Diode mit großem Helligkeitsgradienten eine homogen ausgeleuchtete Fläche verwendet, da hier überbelichtete Pixel verhindert werden können. Des weiteren wäre es sinnvoll, von den Diodenaufnahmen einen passenden dark frame zu subtrahieren, sodass der Dunkelstrom keinen Fehler mehr liefert.

Tatsächlich liefert der Versuch aber das erwartete Ergebnis.

## 6 Anhang

T [°C]	$N_{ADU}$ [ADU]	$\sigma_{ADU}$ [ADU]
19.52	534.599	1.277
14.96	361.729	0.919
11.63	285.273	0.734
8.87	234.327	0.621
5.33	204.370	0.551
2.73	176.372	0.481
-0.23	168.276	0.448
-3.16	150.341	0.405
-6.06	144.344	0.387
-9.37	139.575	0.347
-12.29	133.011	0.316
-14.81	127.119	0.294

Tabelle 1: Messwerte für den Dunkelstrom in Abhängigkeit der CCD-Betriebstemperatur

Belichtungszeit in s	Gain-Faktor(g)	$\sigma(g)$
6.0	1.848	0.022
5.0	1.872	0.05
4.0	1.883	0.05
3.0	1.901	0.05
2.0	1.933	0.05
1.0	2.100	0.05
0.5	2.032	0.05

Tabelle 2: Messung des Gain-Faktors für verschiedene Belichtungszeiten

Anteil transmittierten Lichts	aufintegrierter ADU-Wert [ $10^6 ADU$ ]	Fehler
1	114.57	0.011
0.5	72.831	0.009
0.25	39.488	0.007
0.125	18.205	0.005
0.0625	10.329	0.004
0.03125	5.9369	0.003
0.015626	3.4533	0.002
0.0078125	2.5956	0.002
0.00390625	2.013	0.002
0.001953	1.664	0.002
0.00097656	1.5182	0.002
0.00048828	1.479	0.002
0.0002441	1.368	0.002
0.00012207	1.275	0.002

Tabelle 3: Gemessener ADU-Wert über dem Anteil des transmittierten Lichts

## Literatur

[Ast] Astronomisches Praktikum. Modul „Einführung in die Astronomie“. Dr. Karl Remeis Sternwarte. Bamberg

[Pho] <http://de.wikipedia.org/wiki/Fotografie>

[Wik] <http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>

[Ber] The Handbook of Astronomical Image Processing, Richard Berry, James Burnell, Willmann-Bell 2006.