

Eigenschaften optischer CCDs

Gruppe 1

Udo Beier

Leon Brückner
Sebastian Ziegler

Valentin Olpp

März 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Methoden	5
2.1	Halbleiter	5
2.2	Aufbau und Funktion eines CCD-Chips	5
2.3	Bildfehler und -korrekturen	5
2.4	Der Gain-Faktor	8
2.5	Durchführung	8
3	Ergebnisse	9
4	Anhang	14

Abbildungsverzeichnis

1	Auftragung von Dunkelstrom über der CCD-Temperatur	9
2	Aufnahme eines bias frame	10
3	Auftragung des gemessenen ADU-Wertes ueber der einfallenden Lichtintensitaet	11
4	Aufnahme der Diode bei extremer Ueberbelichtung	12
5	Erste Aufnahme nach Belichtungsbeginn	12
6	Zweite Aufnahme	13
7	Aufnahme nach Einfuehren des Blattes	13

Tabellenverzeichnis

1	Messwerte für den Dunkelstrom in Abhängigkeit der CCD-Betriebstemperatur	14
2	Messung des Gain-Faktors für verschiedene Belichtungszeiten	14
3	Gemessener ADU-Wert über dem Anteil des transmittierten Lichts	15

1 Einleitung

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

Ein Beispiel für solche Technologie ist der CCD-Chip, der heute neben dem CMOS-Elementen für digitale Aufnahmen verwendet wird. Ein solcher CCD-Chip besteht aus Halbleiterelementen, in denen bei Lichteinfall Ladung ausgelöst wird, die anschließend ausgelesen 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 zeitlich verzögerten Ausleseprozess ergeben.

2 Methoden

2.1 Halbleiter

Halbleiter sind besondere Elemente mit vier Valenzelektronen, das bekannteste Beispiel hierfür ist der Halbleiter Silizium. Sie können durch Einbringen von Fremdatomen mit drei oder fünf Valenzelektronen „dotiert“ werden. Die hat zur Folge, dass der dotierte Halbleiter zwar elektrisch neutral ist, sich allerdings Unregelmäßigkeiten im Metallgitter ausbilden:

Wird ein Atom mit fünf Valenzelektronen eingebracht, so existiert im regelmäßigen Siliziumgitter kein freier Platz für das Elektron, sodass es

2.2 Aufbau und Funktion eines CCD-Chips

Ein CCD-Chip setzt sich aus einer rechtecksgitterförmigen Anordnung von Halbleiterelementen, sogenannten Pixeln, zusammen. An diesen liegt eine Spannung in Sperrrichtung an, sodass zunächst kein Strom fließen kann. 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 Sägezahnspannung an die Spalten werden die in den Potenzialtöpfen während der Beleuchtung des Chips gesammelten Elektronen während dem Ausleseprozess Zeile für Zeile in Ausleserichtung verschieben. Am Rand des Gitters befindet sich in Ausleserichtung die Ausleseelektronik, die die Ladungsmenge pro Pixel misst und digitalisiert. Dieser Ausleseprozess kann nicht immer sämtliche Ladung um ein Pixel verschieben, sodass er eine Quelle von Bildfehlern darstellt.

Dieser Ausleseprozess findet nicht instantan statt, sondern erfordert eine gewisse Zeitspanne, welche zu verschiedenen Bildfehlern führt.

2.3 Bildfehler und -korrekturen

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. Wenn man also mehrere Bilder aufnimmt, bekommt man auch mehrere Werte für jeden Pixel. 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. Man kann also bei mehreren Bildern für jeden Pixel einen Mittelwert und eine Standardabweichung (auch 'noise' genannt) für die Photonenzahl bestimmen. 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 nicht näher definierten Einheit (genannt 'analog-to-digital unit' oder ADU). Der Zusammenhang zwischen den gelösten Elektronen und dem Wert in ADU heißt 'Gain-Faktor' g . Es ist insbesondere nicht klar, ob ein Wert von 0 ADU auch 0 detektierten Photonen entspricht, 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 korrektes Ergebnis zu erhalten. Ein weiterer Effekt der Signalwandelelektronik ist der 'readout noise', eine konstante Unsicherheit, die ihren Ursprung in den Verstärkerschaltkreisen hat.

Der CCD-Chip selbst ist auch eine Fehlerquelle. Defekte im Kristallgitter der Halbleiterstruktur führen zu 'hot pixels' (zu kleine Bandlücke, sodass immer Elektronen herausgelöst sind), '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, die dann vom eigentlichen Bild abgezogen werden können. 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 usw. 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, der dann vom flat field abgezogen wird. Die eigentliche Aufnahme (die schon mittels bias und dark frame verbessert wurde) wird schließlich mit dem flat field gewichtet (d.h. dadurch geteilt).

Die vorhin schon angesprochenen statistischen Betrachtungen (signal, noise) haben eine wichtige praktische Bedeutung, die hier noch kurz angesprochen werden soll.

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

$$S_{raw} = \frac{x}{g} + \frac{x_d}{g} + b \quad (1)$$

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 σ_{raw} (in ADU) der ursprünglichen Aufnahme berechnet sich

durch

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

wobei σ die Standardabweichung der detektierten Elektronen, σ_d der dark current noise und σ_{ron} der readout noise ist.

Diese Formeln gelten entsprechend auch für den dark frame und das flat field. Die praktische Anwendung zeigt sich, wenn man mehrere Bilder aufnimmt (um ein Mittel zu erzeugen). Die resultierende Signalstärke und Abweichung ergibt sich dann zu:

$$S_{combined} = \frac{N_{raw} S_{raw}}{N_{raw}} - \frac{N_{dark} S_{dark}}{N_{dark}} = S_{raw} - S_{dark} \quad (3)$$

$$\sigma_{combined} = \sqrt{\frac{\sigma_{raw}^2}{N_{raw}} + \frac{\sigma_{dark}^2}{N_{dark}}} \quad (4)$$

Man sieht, dass die Signalstärke nicht von der Anzahl N der Aufnahmen abhängt, wohl aber die Abweichung. Je mehr Bilder man verwendet, desto kleiner wird die Abweichung, also wird die signal-to-noise ratio größer. Mit diesen Formeln kann man abschätzen, wie viele Aufnahmen angefertigt werden müssen, um eine gewünschte Bildqualität zu erhalten. Eine SNR von 3 liefert ein unklares und stark körniges Bild, während eine SNR von 30 bereits ein scharfes und deutliches Bild ergibt. Bei einer SNR von 100 kann man sogar kleine Details klar erkennen und Nebel- und Staubwolken gut sichtbar und scharf abbilden.

Noch zu bedenken ist, dass durch die flat field - Korrektur zusätzliche Unsicherheit hinzukommt. Der Einfluss auf die resultierende Bildqualität ist wegen der sehr hohen SNR der flat field - Aufnahme jedoch üblicherweise vernachlässigbar, insbesondere anhand der enormen optischen Aufwertung des Bildes durch die Korrektur. Die resultierende SNR berechnet sich aus:

$$SNR_{result} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{SNR_{image}^2} + \frac{1}{SNR_{flatfield}^2}}} \quad (5)$$

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“ werden nicht sämtliche Elektronen während dem Auslesevorgang zeilenweise verschoben, sondern ein Teil der Ladung verbleibt in den Pixeln.

Beim sogenannten Smear-Effekt werden beim Auslesevorgang nicht sämtliche Elektronen, die sich in einem Pixel während der Beleuchtung gesammelt haben, pixelweise verschoben, sondern es verbleiben Elektronen in den Pixeln. Die Auswirkung davon wird in der Diskussion näher ausgeführt.

2.4 Der Gain-Faktor

...

2.5 Durchführung

In diesem Versuch soll zunächst die ideale Betriebstemperatur für den CCD-Chip ermittelt werden, die sich als Temperatur mit minimalem Dunkelstrom ergibt. 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 notwendig ist.

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 eines aufgenommenen LED ausgewertet. Weiter werden die angesprochenen Effekte „blooming“ und „smear“ untersucht.

3 Ergebnisse

Zunächst wurden bei einer Belichtungszeit von 30 Sekunden dark frames bei verschiedenen Temperaturen des Chips aufgenommen, um die ideale Betriebstemperatur des CCD zu ermitteln. Hierbei ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Werte, welche in Abb. 1 graphisch dargestellt sind. Hier wurde der Verlauf mit einer Exponentialfunktion

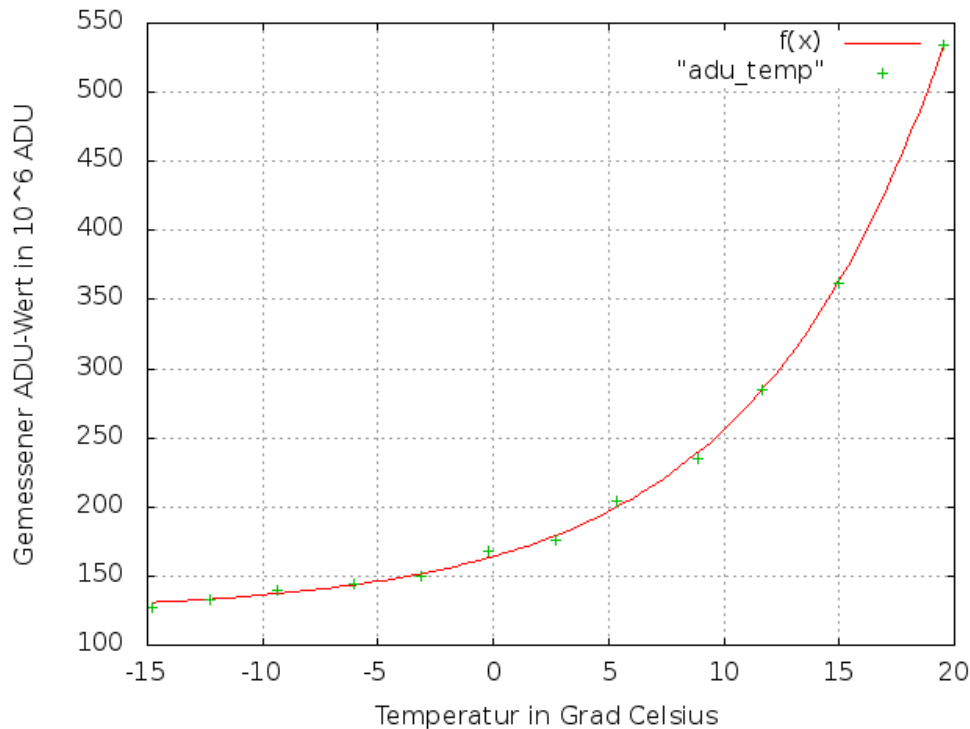


Abbildung 1: Auftragung von Dunkelstrom über der CCD-Temperatur

$f(T) = a \cdot \exp(T \cdot c) + b$ 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°C im betrachteten Intervall von -15 bis $+20^\circ \text{C}$. Eine tiefere Temperatur ist aufgrund der begrenzten Kühlleistung des CCD-Chips nicht erreichbar. Für die Fitparameter ergibt sich: $a = 40.0 \text{ adu}$, $c = 0.119 \frac{1}{\text{K}}$, $b = 124.2 \text{ adu}$.

Die Aufnahme eines bias frames bei einer Belichtungszeit von 0.12 s und einer Blendenöffnung von 5.6 wird in Abb. 2 dargestellt. 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 Speichervorgänge 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. Des weiteren ist ein leichter Helligkeitsgradient von links nach rechts sichtbar. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich ein

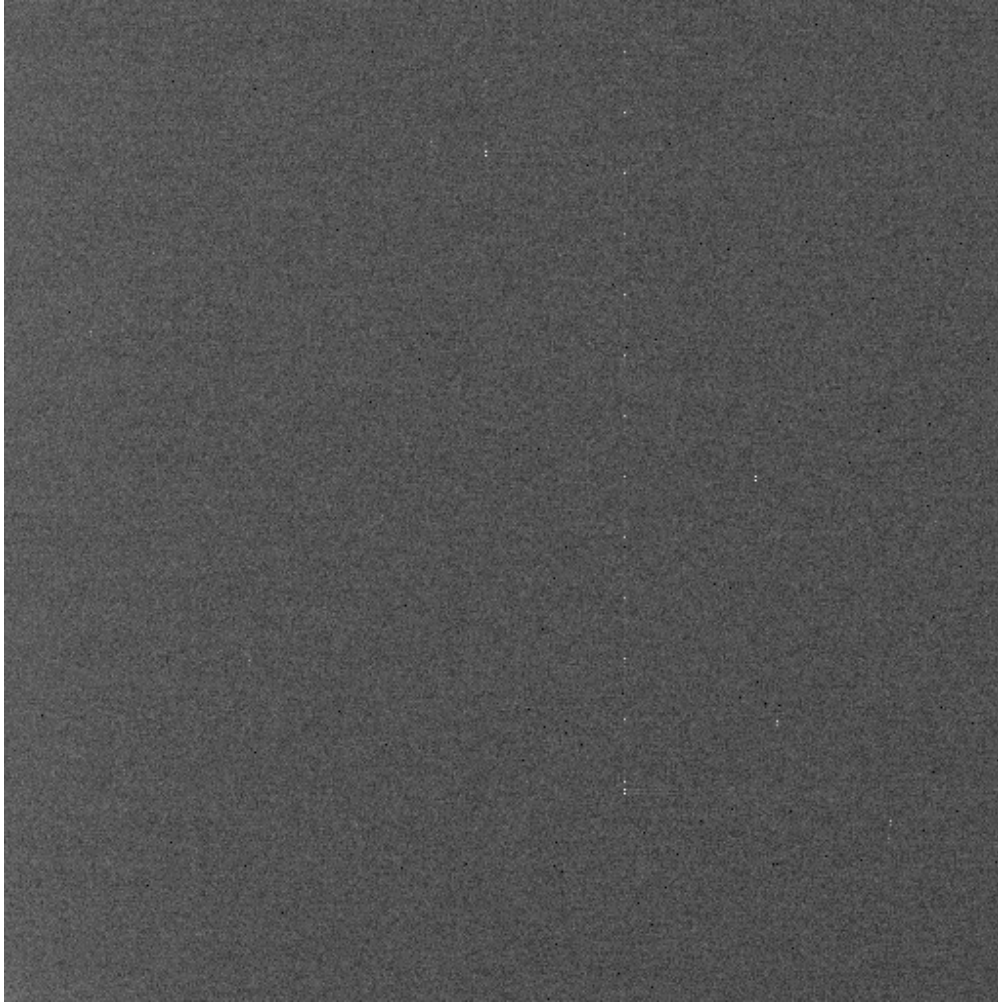


Abbildung 2: Aufnahme eines bias frame

Temperaturgradient im CCD-Chip und ein somit räumlich unterschiedlicher Dunkelstrom. Es wurden insgesamt 11 bias frames aufgenommen, deren mittlerer ADU-Wert sich zu 115.6 ± 1.07 ergibt.

Damit auch bei maximaler Belichtungszeit kein ueberbelichtetes Bild aufgenommen wurde, musste insgesamt ein Filter der Straerke 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 ... die in Tabelle 2 dargestellten Werte. Als gemittelter Wert ergibt sich

$$\bar{g} = 1.940 \pm 0.04 \frac{\text{adu}}{\text{e}}. \quad (6)$$

Die Werte für den Gain-Faktor sind zwar alle im gleichen Bereich, für eine kürzere Belichtungszeit ergibt sich allerdings ein größerer Gain-Faktor. Grund???

In Tabelle 3 sind die Werte für gemessenen ADU-Werte aufgetragen über dem durch die Filter transmittierten Licht als Anteil der Lichtintensität vor dem Filter. Plottet man die ermittelten Werte, so ergibt sich der in 3 dargestellte Verlauf. Werden die Datenpunkte mit der Funktion

$$f(x) = a \cdot x + b \quad (7)$$

gefittet, so ergeben sich die Werte $a = (119 \pm 5.0) \cdot 10^6 \text{ adu}$ und $b = (2.8 \pm 1.4) \cdot 10^6 \text{ adu}$. Problematisch ist, dass die Gerade die Punkte nahe der Null gut approximiert, die Werte

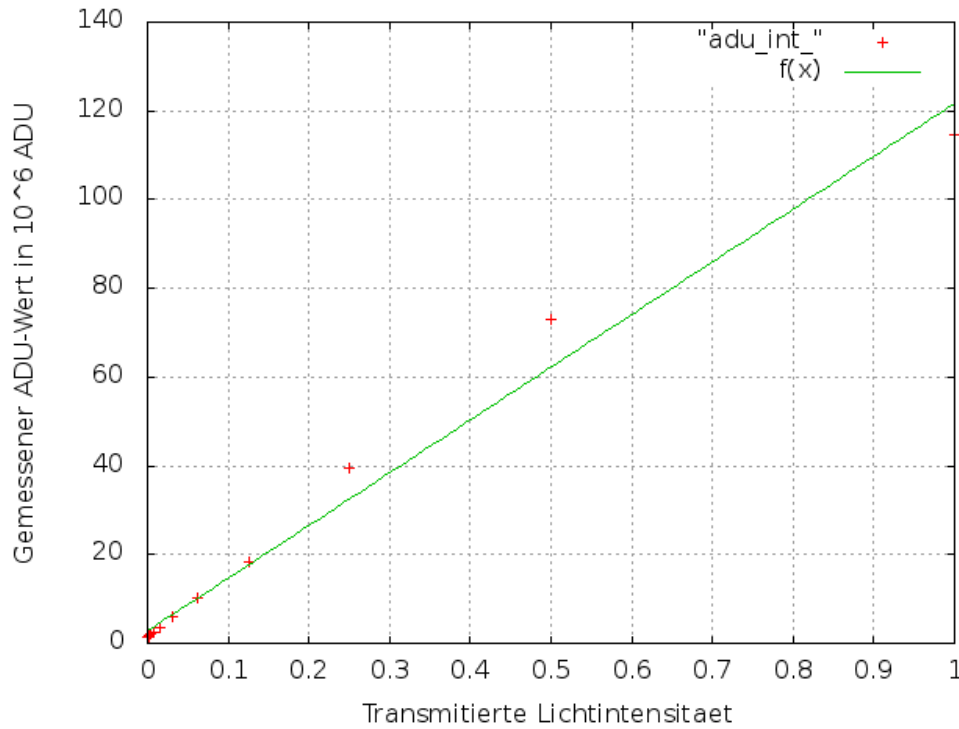


Abbildung 3: Auftragung des gemessenen ADU-Wertes ueber der einfallenden Lichtintensitaet

mit groesserer Lichtintensitaet aber verfehlt. Grund hierfuer ist die grosse Anzahl an Punkten nahe der Null, die folglich den Fit dominieren.

Schliesslich wurden die Effekte „smear“ und „blooming“ untersucht.

In 4 ist eine Aufnahme der Diode bei starker Ueberbelichtung dargestellt, was durch eine Belichtungszeit von 5 Sekudnen und einer Blende von 8f erreicht wurde. Man erkennt, dass nicht nur die tatsaechlich ueberbelichteten Pixel hell sind, sondern auch die spaltenweise benachbarten Pixel. Der Grund hierfuer ist, dass die Potentialtoepfe der einzelnen Pixel schlicht „ueberlaufen“, 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 Elektrnen in den Spalten verschoben, sodass diese nicht isoliert sein duerfen.

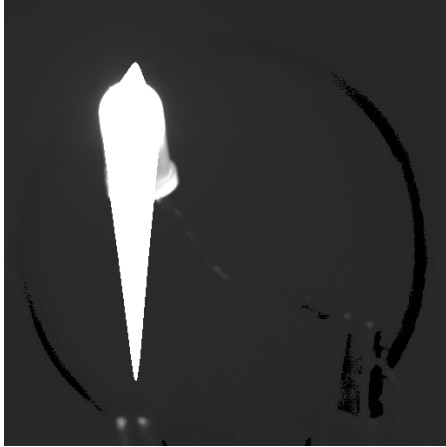


Abbildung 4: Aufnahme der Diode bei extremer Ueberbelichtung

Zur Veranschaulichung des Smear-Effektes wurden Aufnahmen bei deaktiviertem Shutter, einer Belichtungszeit von 0.5 Sekunden und ebenfalls einer Blende von 8f von 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 5 dargestellte Bild.

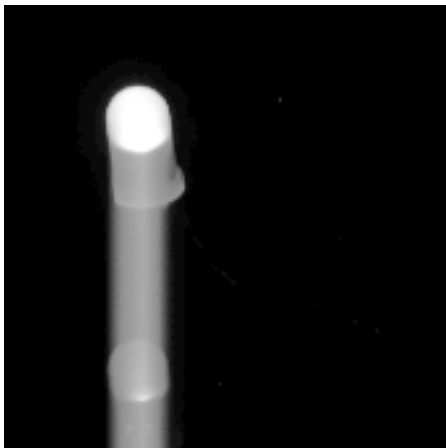


Abbildung 5: Erste Aufnahme nach Belichtungsbeginn

Der Effekt erklärt sich folgendermassen:

Zu Beginn des Auslesens sind die ersten ausgelesenen Pixel unbelichtet. Wird das erste stark belichtete Pixel ausgelesen, so ergibt sich ein heller Punkt. Die nach diesem Pixel nachfolgenden Pixel werden während dem zeitlich verzögerten Auslesen weiter belichtet, sodass sie überhellt 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 waerhend dem vorherhgehenden Ausleseprozess belichtet werden. Somit erscheint ein durchgehend heller Strich in der Spalte. Dies ist in Abb. 6 dargestellt.

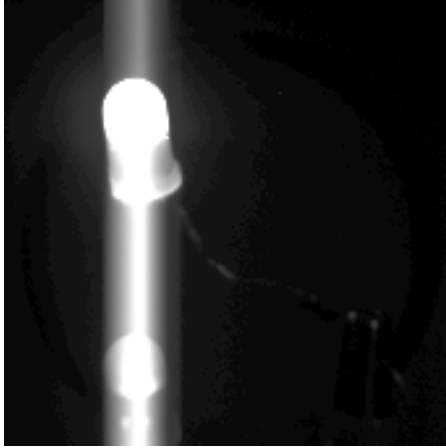


Abbildung 6: Zweite Aufnahme

Wird nun das Blatt Papier in den Strahlengang eingefuehrt, so ergibt sich die in Abb. 7 dargestellte Aufnahme.

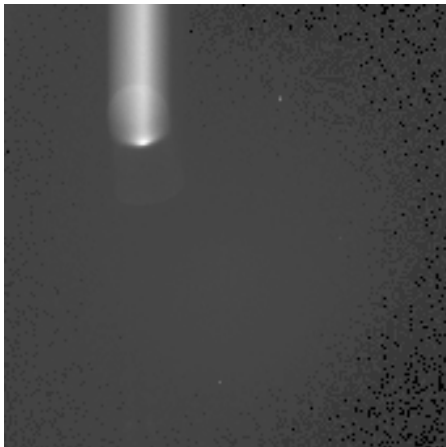


Abbildung 7: Aufnahme nach Einfuehren des Blattes

Der Grund dafuer ist, dass die ersten Pixel wiederum waehrend dem vorherigen Auslesen belichtet werden und somit hell erscheinen. Nach dem Einfuehren des Blattes in den Strahlengang werden keine weiteren Pixel belichtet, sodass der helle Streifen an einer durch den Zeitpunkt des Einbringens des Blattes definierten Stelle abbricht.

4 Anhang

Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	N_{ADU}	σ_{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
6.0	1.848
5.0	1.872
4.0	1.883
3.0	1.901
2.0	1.933
1.0	2.100
0.5	2.032

Tabelle 2: Messung des Gain-Faktors für verschiedene Belichtungszeiten

Anteil des transmittierten Lichts	aufintegrierter ADU-Wert der Diode in $10^6 ADU$
1	114.57
0.5	72.831
0.25	39.488
0.125	18.205
0.0625	10.329
0.03125	5.9369
0.015626	3.4533
0.0078125	2.5956
0.00390625	2.013
0.001953	1.664
0.00097656	1.5182
0.00048828	1.479
0.0002441	1.368
0.00012207	1.275

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.