

Eigenschaften optischer CCDs

Alexander Helbok*, Jakob Höck[†], Max Koppelstätter[‡]

27. Mai 2024

Abstract

In diesem Versuch wird auf die Funktionsweise eines CCD-Sensors eingegangen, mite besonderem Augenmerk auf die Kalibrierung und Korrektur der Rohdaten. Dabei wird das Rohbild schrittweise mittels Bias-, Flatfield- und Dunkelstromaufnahmen kalibriert and analysiert. Dabei können wir den Gain-Faktor des CCD-Sensors, sowie das Ausleserauschen und die full well capacity bestimmen und mit dem Datenblatt vergleichen. Zuletzt bestimmen wir die Bandlücke von Silizium und des Donatorelements.

*alexander.helbok@student.uibk.ac.at

[†]jakob.hoeck@student.uibk.ac.at

[‡]max.koppelstaetter@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	1
1	Theorie	1
1.1	Funktionsweise eines CCD-Sensors	1
1.2	Kalibrierung einer Aufnahme	1
2	Versuchsaufbau	2
3	Ergebnisse	3
3.0	Aufgabe 0: Bandlücke	3
3.1	Aufgabe 1: Staubkörner	3
3.2	Aufgabe 2: Bias-Frames	3
3.3	Aufgabe 3: Bestimmen des Gain-Faktors g anhand von $\sigma_{\text{ADU}}^{(\text{stat})}$ und N_{ADU}	4
3.4	Aufgabe 4: Betrachtung des linearen Verhaltens in Abhängigkeit der Belichtungszeit	5
3.5	Aufgabe 5: Exaktere Bestimmung des Gains	7
3.6	Aufgabe 6: Bestimmung des Ausleserausches in Elektroneneinheiten	8
3.7	Aufgabe 7: Blooming	8
3.8	Aufgabe 8: Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes	9
4	Schlussfolgerung	10
5	Appendix	11

0 Einleitung

Wo wären wir ohne CCDs? Diese Frage wirkt zwar nicht alltäglich, sollte sie jedoch sein. Auch wenn dem einfachen Endnutzer einer Digitalkamera deren Funktion als peripher erscheint, ist deren Auswirkung auf den Erkenntnisgewinn der letzten Dekaden unabschätzbar. Auch wenn die Familie der Halbleiterbauteile die Welt nachhaltig verändert hat, revolutionierte das CCD speziell die Bildgebung in der Astrophysik.

Genug der schönen Worte, was wurde in diesem Versuch behandelt. Es wurden grundlegende Eigenschaften eines CCDs untersucht, welche zur Kalibrierung benötigt werden, um schlussendlich damit valide Messungen durchzuführen. Weiters wurden phänomenologische Eigenschaften betrachtet, wie die Temperaturabhängigkeit und das Blooming. Nach einem kurzen Theorie-Teil werden wir auf unsere Ergebnisse eingehen.

1 Theorie

In diesem Kapitel wird die nötige Theorie zum Versuch beschrieben. Begonnen wird hierbei mit der Funktionsweise eines CCD-Sensors, danach werden die unterschiedlichen Kalibrierungen einer Aufnahme besprochen. Dieses Kapitel bezieht sich inhaltlich auf das Versuchsskript [1].

1.1 Funktionsweise eines CCD-Sensors

In einem CCD-Sensor besteht jeder Pixel aus einem Halbleitermaterial mit pn-Übergang, also einem Übergang zwischen Regionen positiver und negativer Dotierung. In der Übergangszone können durch den Photoeffekt Elektronen durch das Eintreffen von Photonen aus dem Halbleitermaterial gelöst werden. Diese Elektronen werden bis zum Auslesen in Potentialtöpfen gespeichert. Nach der Aufnahme des Bildes werden die Elektronen durch periodische Spannungspulse in eine Richtung verschoben. Das Auftreffen der Elektronen wird dann detektiert, und das Signal in Analog-Digital-units (ADU) umgewandelt.

1.2 Kalibrierung einer Aufnahme

In diesem Versuch konzentrieren wir uns auf das Bereinigen von CCD-Aufnahmen durch unterschiedliche Kalibrierungsaufnahmen. Dabei werden Bias-, Flatfield-, und Dunkelstromaufnahmen verwendet.

Die Bias-Subtraktion beseitigt das Signal, das aufgezeichnet wird, während der Sensor keinem Licht ausgesetzt ist. Der Bias ist also ein konstanter Offset, der von der Rohdatei subtrahiert werden muss. Der Bias kann gemessen werden, indem man Bilder macht, ohne den CCD-Sensor zu belichten, sowie die Aufnahmezeit minimal hält. Zudem ist auf Bias-Frames das Ausleserauschen des Sensors zu erkennen, durch Mitteln mehrerer Bias-Frames kann dieses Rauschen entfernt werden, wodurch nur mehr der konstante Offset bleibt. Zusätzlich wird eine Flatfield-Korrektur durchgeführt, da die Empfindlichkeit der einzelnen Pixel schwankt. Daher wird der gesamte Sensor gleichmäßig mit einer Lichtquelle belichtet. Wenn das CCD so bestrahlt wird, sollte die Reaktion des Sensors bei einem perfekten Sensor konstant sein. Dennoch sind

in diesen Flatfield-Bildern einige Abweichungen zu erkennen. Um die Rohdaten zu korrigieren, müssen die Daten durch die Flatfield-Aufnahmen dividiert werden.

Zudem werden Dark-Frame-Aufnahmen in dem Versuch verwendet. Bei diesen Aufnahmen wird der Sensor keinem Licht ausgesetzt, die Belichtungszeit kann dabei entweder gleich wie für die richtigen Aufnahmen, oder länger gewählt werden. Für längere Belichtungen muss das Ergebnis jedoch zeitgemittelt werden. Bei längeren Aufnahmen besteht die Möglichkeit, dass das CCD von einem hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung getroffen wird, um diese Signale zu minimieren, werden auch hier mehrere Messungen gemittelt.

Da wir hier mit Zählereignissen zu tun haben, hat die Poissonstatistik Gültigkeit, welche den Zusammenhang

$$\sigma^e = \sqrt{N^e}$$

zwischen der Standardabweichung σ^e und der Anzahl N^e erlaubt (vgl. Gl. 2.1 aus [1]).

2 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs besteht hauptsächlich aus einer Kamera mit CCD-Sensor, die auf einem Stativ platziert wird, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Kamera ist mit einem PC verbunden, an dem die Einstellungen für Aufnahmen vorgenommen werden. Dabei verwenden wir die Modi Bias, Dark, und Light. Für Flatfieldaufnahmen verwenden wir den Modus Light anstatt Flatfield, ansonsten entsprechen die Modi ihrer Funktion.



Abbildung 1: Kamera mit CCD-Sensor, platziert auf einem Stativ.

In manchen Aufgaben werden Flatfield-Folien und Flatfield-Lampen verwendet. Dabei nutzt man eine blaue und eine grüne Folie. Die Flatfield-Lampe ist mit einer Spannungsquelle verbunden, deren erzeugte Spannung variiert werden kann. Die für die jeweilige Messung relevanten Einstellungen werden im Zuge der Ergebnisse diskutiert.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Resultate der Messungen präsentiert, sowie die für die Versuche gewählten Einstellungen spezifiziert.

3.0 Aufgabe 0: Bandlücke

Diskutieren Sie warum (welche) Elektronen die Hürde von 1.115 eV überwinden können, wo doch die mittlere Energie der Elektronen durch die thermische Bewegung nur $E_{\text{kin}} = 3/2 k_B T$ ist.

Wie bereits angedeutet, handelt es sich bei dem angegebenen E_{kin} um eine gemittelte kinetische Energie. Somit gibt es auch Teilchen mit Energiewerten, die deutlich größer sind und somit die Bandlücke überspringen können. Dabei handelt es sich um die Elektronen im Valenzband, welche also am nächsten zum Leitungsband liegen.

3.1 Aufgabe 1: Staubkörner

Bei den Aufnahmen des CCD-Sensors können sechseckige Staubkörner entdeckt werden. Die sechseckige Form resultiert aus der sechseckigen Geometrie des Verschlusses der Kamera. Die Staubkörner schirmen Licht nicht vollständig ab, was ein Ergebnis von Lichtbeugung an den Staubkörnern ist.

3.2 Aufgabe 2: Bias-Frames

Nachdem die Temperatur des Sensors auf -20°C abgekühlt wurde, werden 23 Bias-Frames aufgenommen, davon werden die ersten drei jedoch nicht verwendet, da diese bei diesem CCD unzuverlässige Ergebnisse liefern. Für die Auswertung werden hier die äußersten 50 Pixel auf allen Seiten der Frames ignoriert. Es ergibt sich ein mittlerer Bias von

$$b_0^{\text{ADU}} = 543,40 \text{ ADU},$$

mit einer Standardabweichung von

$$\sigma_{\text{ron},0}^{\text{ADU}} = 1,81 \text{ ADU}.$$

Ziehen wir diesen Mittelwert von einer Bias-Aufnahme ab, bleibt nur mehr das Ausleserauschen übrig. Nach diesem Abziehen ergibt sich

$$b_1^{\text{ADU}} = 0,02 \text{ ADU},$$

mit einem Ausleserauschen von

$$\sigma_{\text{ron},1}^{\text{ADU}} = 5,95 \text{ ADU}.$$

An b_1^{ADU} sieht man, dass es fast vollständig gelingt, hier den konstanten Offset zu entfernen.

3.3 Aufgabe 3: Bestimmen des Gain-Faktors g anhand von $\sigma_{\text{ADU}}^{(\text{stat})}$ und N_{ADU}

Für die folgenden Messungen wurde die Blende für die blaue Folie auf 16 mm bei einer Versorgungsspannung der Flatfield-lampe von 9 V. Für die grüne Folie wurde die Blende auf 22 mm und die Spannung auf 8,1 V eingestellt. Es wurden für beide Folien (grün und blau) je eine Flatfield-Aufnahme mit Belichtungszeit von 1 s sowie je drei Bias-Aufnahmen genommen. Verwenden wir die zwei Relationen $N^e = g \cdot N^{\text{ADU}}$ sowie $\sigma^e = g \cdot \sigma^{\text{ADU}}$ und die Tatsache, dass laut Poissonstatistik $\sqrt{N^e} = \sigma^e$ gilt, erhalten wir

$$g = \frac{N^{\text{ADU}}}{\sigma^{\text{ADU}^2}}.$$

Der Gain-Faktor g beschreibt hierbei die Umwandlung von Elektronen in Analog-Digital-Units. Die Signalstärke wird durch N , die Standardabweichung durch σ symbolisiert, wobei das tiefgestellte ADU immer für das Signal in Analog-Digital-Units steht, und das tiefgestellte e für die Stärke des elektronischen Signals. Für die grüne Folie ergab sich ein mittlerer Wert von 6415,12 ADU mit einer Standardabweichung von 55,03 ADU, daraus resultiert ein Gain Faktor

$$g_{\text{grün}} = 2.11.$$

Analog ergibt sich für die blaue Folie ein Mittelwert von 2553,77 ADU mit Standardabweichung 35,36 ADU. Hier ergibt sich

$$g_{\text{blau}} = 2.04.$$

In Abbildung 7 sieht man exemplarisch für die blaue Folie das Gesamtbild des CCD, sowie das ausgewählte 200×200 Pixel Quadrat. Es wurde eine divergierende Farbpalette gewählt, um die Inhomogenität der im Idealfall perfekten Folie hervorzuheben. Für dieses Quadrat ist darunter das Histogramm der Pixel-Sättigung sowie die Aufnahme im Detail zu sehen. Der Ausschnitt aus dem Gesamtbild weist aber eine annähernd homogene Beleuchtung auf, wie man an der Gaußähnlichen Form des Histogramms erkennen kann. Im Anhang ist die selbe Grafik auch für die grüne Folie zu sehen.

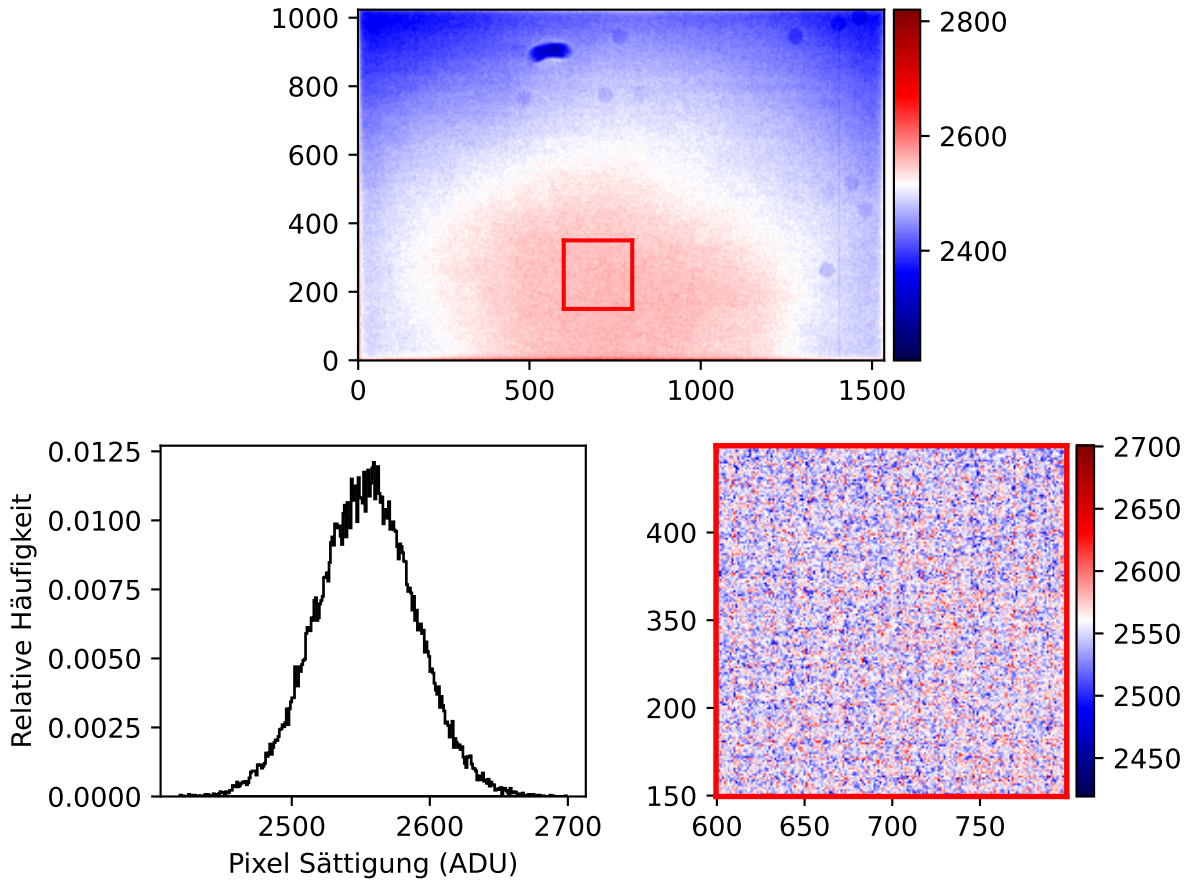


Abbildung 2: Zu sehen ist oben das gesamte Flatfield-Frame des CCD für die blaue Folie, rechts unten ist auf das rote Quadrat gezoomt. Das Quadrat hat eine Seitenlänge von 200 Pixeln und seine rechte untere Ecke liegt auf der x-Achse bei 600, auf der y-Achse bei 150. Links unten ist ein Histogramm der Pixel Sättigung gezeigt.

3.4 Aufgabe 4: Betrachtung des linearen Verhaltens in Abhängigkeit der Belichtungszeit

Um das Verhalten in Abhängigkeit der Belichtungszeit zu untersuchen, wurden bei der blauen und grünen Folie Belichtungszeiten zwischen 0.5 s und 30 s betrachtet. Für geringe sowie sehr hohe Belichtungszeiten, bei denen Sättigung auftritt, wird kein lineares Verhalten erwartet. Daher ist in diesen Bereichen die Schrittweite geringer gewählt worden. In Abbildung 3 ist für beide Farbuntersuchungen der Wert $N^{\text{ADU}}/t_{\text{exp}}$ gegen die Belichtungszeit t_{exp} aufgetragen, wobei die y-Achse mit dem Mittelwert, $N_{\text{mean}}^{\text{ADU}}$ aus dem linearen Bereich normiert wurde. Somit ist für den linearen Bereich konstant 1 zu erwarten. Im Sättigungsfall haben wir dann eine negative Steigung und im Bereich der sehr kurzen Belichtungszeit haben wir eine Steigung größer als 1. Für diese Messungen wurde dasselbe Quadrat wie bereits in Abbildung 7 verwendet.

Woher rührt nun die Nichtlinearität bei sehr kleinen Belichtungszeiten? Nachdem die CCD durch einen mechanischen Verschluss von der Linse getrennt ist, der je nach Belichtungszeit länger oder kürzer geöffnet ist, und dieser Shutter nicht perfekt arbeitet, ist dieser Effekt gerade bei kurzen Belichtungszeiten stärker zu erkennen. Es ist zu bedenken, dass die Kappe ja eine

Wegstrecke zurücklegen muss um zu Öffnen oder zu Schließen, somit gibt es einen bestimmten Zeitraum in dem eine teilweise Belichtung des CCD vorliegt. Dies lässt sich auch nicht unterdrücken. Weiters ist nicht klar, wie genau die Belichtungszeit mit dem Shutter funktioniert, also ob am Ende der Belichtungszeit der Verschluss gänzlich geschlossen sein muss, oder ob der Verschluss sein Verschließen gerade beginnt. Alle Szenarien dazwischen sind natürlich auch möglich.

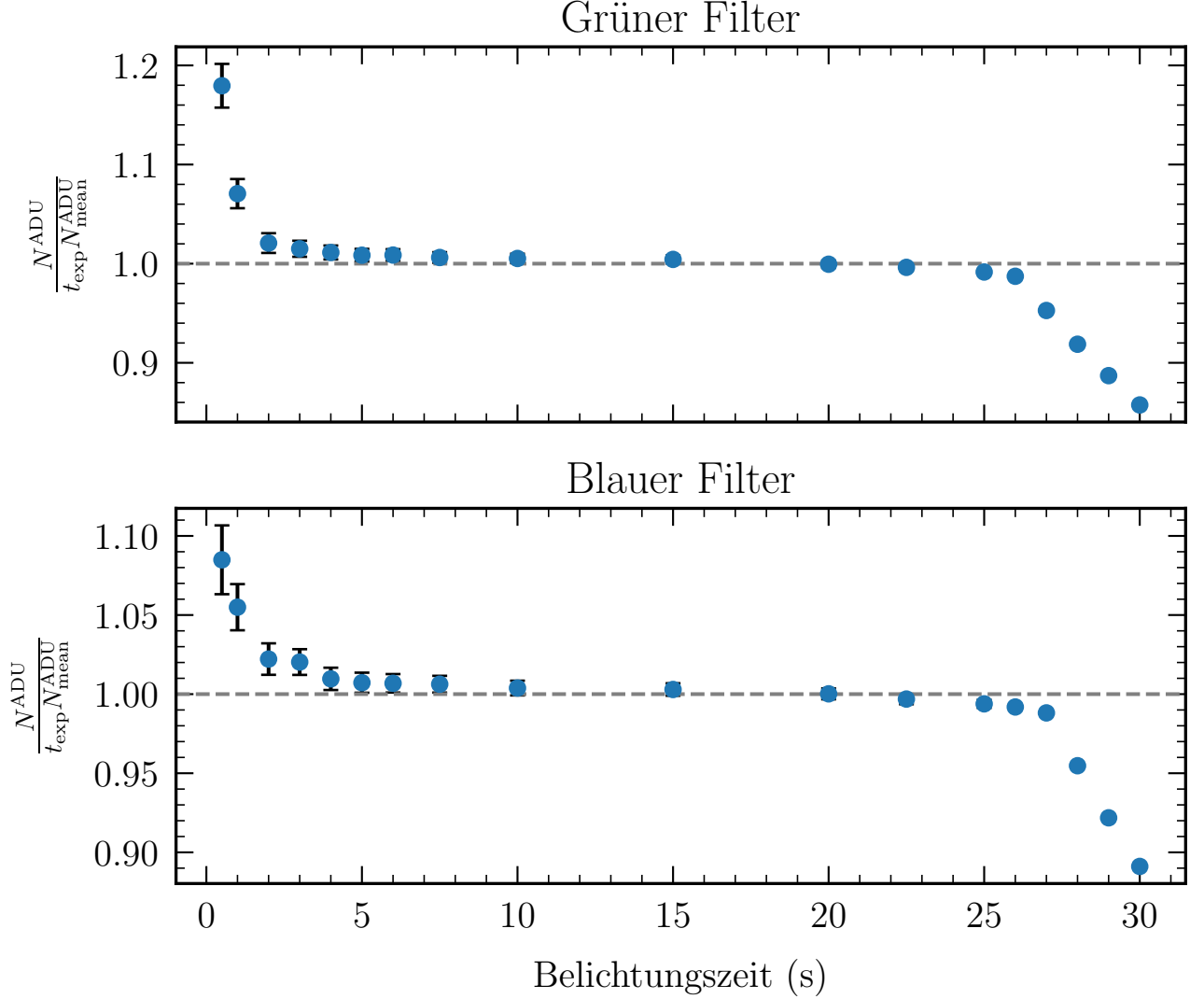


Abbildung 3: Zu sehen ist der aufgetragene Differenzenquotient gegenüber der Belichtungszeit, wobei dabei für eine lineare Funktion, welche normiert ist, der Wert 1 angenommen wird. In nichtlinearen Bereichen ist eine Abweichung davon ersichtlich.

Der Dunkelstrom darf in dieser Untersuchung ignoriert werden, da er mit er mit dem exponentiellen Verhalten bezüglich der Temperatur, mit einem Faktor von $\sim e^{-11.5}$ multipliziert wird (vgl. Unterabschnitt 3.8, Abbildung 6). Damit wird dieser vernachlässigbar klein.

3.5 Aufgabe 5: Exaktere Bestimmung des Gains

In Abbildung 4 sehen wir das gemessene Totalrauschen in Abhängigkeit des Signals. An die Datenpunkte wurde eine Parabel angepasst, aus der sich der Gain-Faktor ergibt. Wir erhalten

$$g_{\text{gruen},1} = 2.11(4) \quad \text{und} \quad g_{\text{blau},1} = 2.15(5).$$

Setzt man nun den Offset der Parabel auf das in Aufgabe 2 bestimmte Ausleserauschen $\sigma_{\text{ron},1}^{\text{ADU}}$ (also der Form $f(x) = ax^2 + bx + \sigma_{\text{ron},1}^{\text{ADU}}$) und passt diese erneut an die Daten an, erhalten wir fast identische Fits, die Plots hierzu sind in Abbildung 8 im Anhang zu finden. Dabei kommt man auf

$$g_{\text{gruen},1} = 2.13(2) \quad \text{und} \quad g_{\text{blau},1} = 2.16(2).$$

und somit sind diese Werte im Rahmen der Unsicherheit vereinbar.

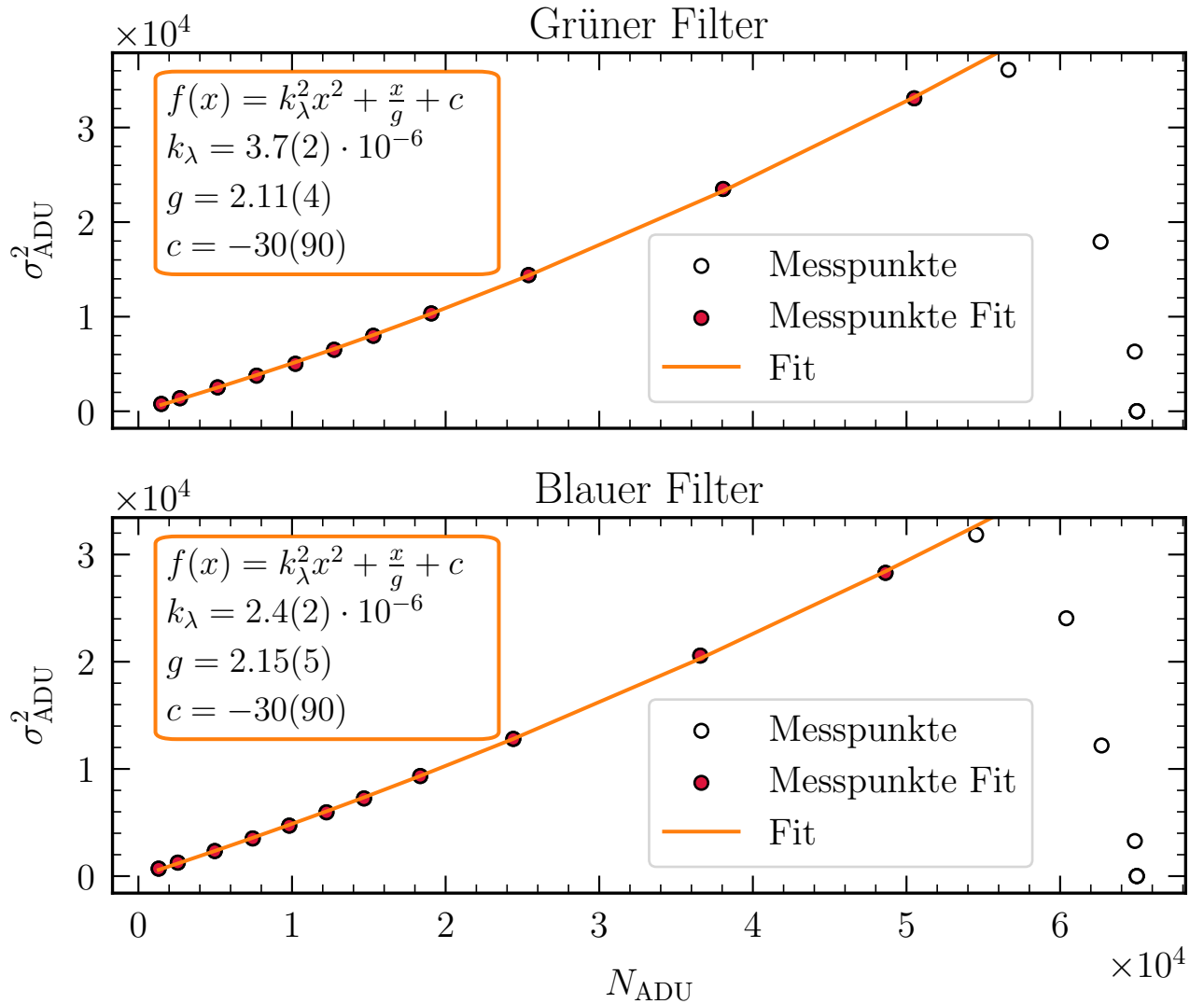


Abbildung 4: Zu sehen ist die quadrierte Standardabweichung in ADU abhängig der Signalstärke in ADU für die grüne und die blaue Folie. Ebenso sind Fitfunktionen an die Daten angepasst worden.

Eine spannende Betrachtung hierbei ist die *full well capacity*. Hierbei handelt es sich um die maximale Elektronenzahl, die in einem Potentialtopf gespeichert werden kann, also der Punkt an dem man Sättigung erreicht und die Messwerte in Abbildung 4 das zu erwartende Verhalten verlassen. Dieser ist ungefähr bei $N_{\text{ADU}} = 5.0(2) \cdot 10^4$ (Der letzte Verwendete Punkt für den Fit), was unter Berücksichtigung des $g_{\text{gruen},1} = 2.11(4)$ zu $N_{\text{SAT}} = 10.5(5) \cdot 10^4$ Elektronen. Wenn man das mit dem zugehörigen Wert aus dem Datenblatt von $N_{\text{SAT,Data}} = 10^4$ (vgl. [2]) lässt sich eine Übereinstimmung erkennen. Da es sich hierbei nur um eine qualitative Einschätzung der Größenordnung handelt, wurde die Berechnung nur für den Grünen Filter und den Gain mittels der Bestimmung über das vorgegebene $\langle \text{bias} \rangle$ gemacht.

Um das $\langle \text{bias} \rangle$ zu bestimmen ohne es zuvor in einer Bias-Frame Serie zu messen kann der Schnittpunkt der gefitteten Funktion mit der y-Achse herangezogen werden. Worin liegt nun der Nachteil dieser Methodik? Es ist schlicht eine Unbekannte mehr, die zu bestimmen ist, und diese könnte ein schlechteres Ergebnis für den Gainfaktor bringen. In unseren Messungen hat das jedoch keinen signifikanten Unterschied ergeben.

3.6 Aufgabe 6: Bestimmung des Ausleserauschens in Elektroneneinheiten

Um das Ausleserauschen des CCD-Sensors von der arbiträren Einheit ADU in die tatsächliche Anzahl an geflossenen Elektronen zu konvertieren müssen wir $\sigma_{\text{ron},1}^{\text{ADU}}$ mit dem Gain multiplizieren. Dafür verwenden wir für das Ausleserauschen den in Unterabschnitt 3.2 bestimmten Wert $\sigma_{\text{ron},1}^{\text{ADU}} = 5.95$. Nachdem der Gain unabhängig von der Wellenlänge abhängen sollte, mitteln wir über die in Unterabschnitt 3.5 gefitteten Gain Werte und erhalten $\bar{g} = 2.13(3)$. Damit ergibt sich für das Ausleserauschen

$$\sigma_{\text{ron}}^e = g \cdot \sigma_{\text{ron}}^{\text{ADU}} = 12.66(19).$$

Vergleicht man diesen Wert mit der Angabe des Herstellers von 15 Elektronen [2], so erkennt man dass wir signifikant darunter liegen. Das ist aber nicht unüblich, da Toleranzen im Datenblatt so gewählt sind, dass sie von keinem Gerät überstiegen werden. Damit werden run-to-run Varianzen berücksichtigt.

3.7 Aufgabe 7: Blooming

Das Blooming ist eine phänomenologische Erscheinung, welche dadurch entsteht, dass die einzelnen Pixel nur eine begrenzte Menge an Elektronen in ihrem Potentialtopf halten können. Sollte diese Anzahl überschritten werden, wandern die Elektronen in den benachbarten Potentialtopf. Dieser Vorgang wiederholt sich weiter. Da die CCD Pixel immer in einer bestimmten Linie ausgelesen werden, ist es baulich so vorgesehen, dass die Elektronen sich in einer bestimmten Richtung leichter fortbewegen können. Daher ist in Abbildung 5 auf der rechten Seite auch eine vertikale Linie zu sehen, welche sich nach unten hin prominenter ausbreitet. Dies entspricht der Ausleserichtung des CCD-Sensors (vgl.[3]).

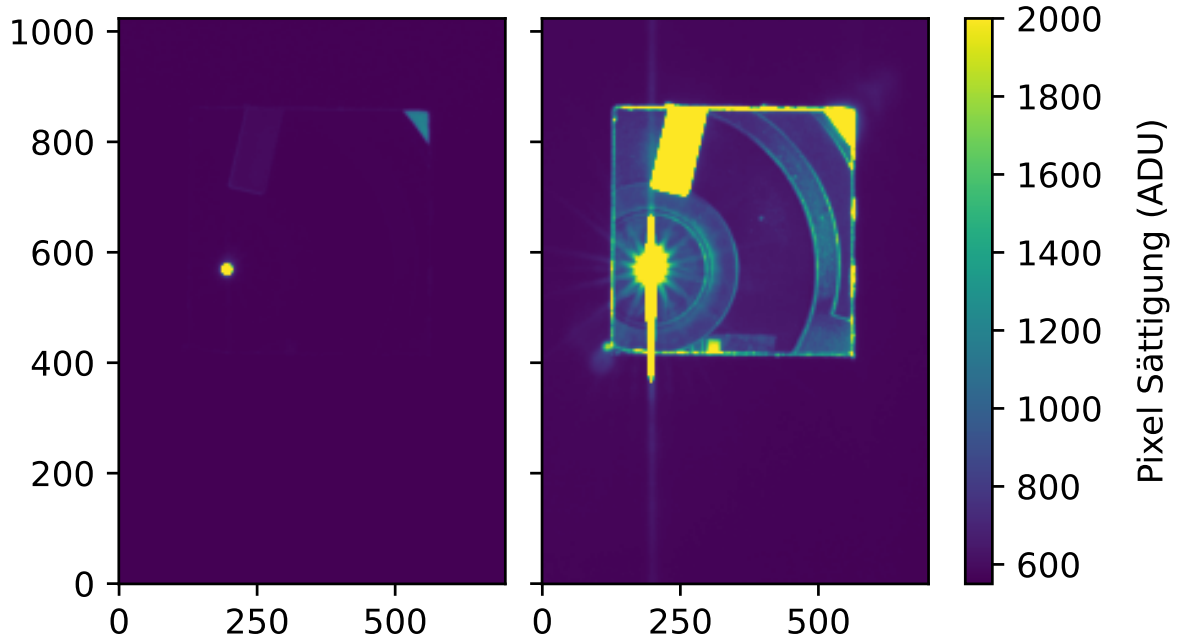


Abbildung 5: Zu sehen sind 2 Aufnahmen des gleichen Aufbaus mit unterschiedlicher Belichtungszeit, dabei liegt die Belichtungszeit links bei 0.1 s und rechts bei 12 s, das Blooming ist als vertikaler Strich, welcher maximal gesättigt ist erkennbar.

3.8 Aufgabe 8: Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes

Jetzt wird die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes untersucht. Dabei werden für jeden Temperaturschritt drei Darkframes und acht Bias-frames aufgenommen, von den Bias-frames werden die ersten drei wieder verworfen. Dabei wird die Temperatur in Schritten von 8 °C von −20 °C bis 20 °C. Die verwendete Belichtungszeit beträgt 180 s unter −10 °C, 12 s unter 10 °C und 60 s darüber. Der Dunkelstrom I folgt dem Zusammenhang

$$I = \text{const} \cdot T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}, \quad (1)$$

wobei E_g der Bandlücke des Materials entspricht [1]. Als Proxy für den Dunkelstrom wurde der Mittelwert der geflossenen Elektronen hergenommen, da die genaue Umrechnungskonstante einfach in den konstanten Term in Gleichung (1) integriert werden kann. Durch Logarithmieren und Umstellen von Gleichung (1) ergibt sich ein linearer Zusammenhang, der in Abbildung 6 zu sehen ist, und für einen Fit verwendet wird. Aus zwei unterschiedlichen Regimes mit zwei unterschiedlichen Geradenfits erhalten wir zwei Werte für Bandlücken:

$$E_{g,1} = 1,1(2) \text{ eV} \quad \text{und} \quad E_{g,2} = -0,34 \text{ eV}.$$

Letztere ist nicht mit einem Fehler behaftet, da eine Gerade mit zwei Freiheitsgrade an zwei Datenpunkte angepasst wurde und damit Unsicherheiten nicht sinnvoll abgeschätzt werden können.

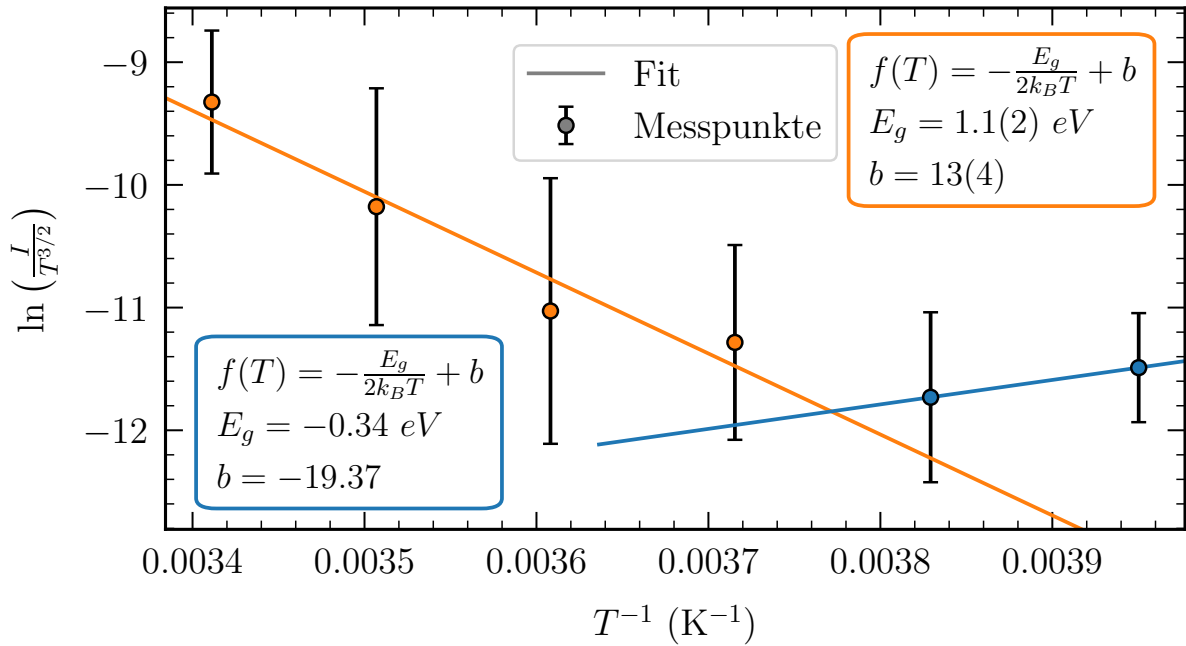


Abbildung 6: Zu sehen sind der Dunkelstrom (in logarithmischer Darstellung und durch $T^{3/2}$ dividiert), abhängig von der inversen Temperatur gezeigt. Für die zwei Regionen wurden zwei Fits erstellt, die Parameter des blau dargestellten weisen keine Unsicherheit auf, da sie nur durch zwei Punkte bestimmt wurden.

4 Schlussfolgerung

In der Versuchsreihe konnte die Funktionsweise und Kalibrierung eines CCD-Sensors veranschaulicht werden.

Der Gain-Faktor wurde auf zwei Arten bestimmt, einmal aus der statistischen Streuung bei Flatfield Aufnahmen, das zweite Mal exakter, durch einen Parabelfit. dabei erhalten wir für die grüne Folie Werte, die sich in der Unsicherheit entsprechen, bei der blauen Folie weichen die Werte voneinander ab. Die somit bestimmte maximale Elektronenanzahl ist mit der Herstellerangabe kompatibel. Gleiches gilt für das Ausleserauschen. Der Blooming-Effekt, ein Sättigungseffekt bei CCD-Sensoren, konnte anschaulich dargestellt werden, dabei werden Elektronen in benachbarte Potentialtöpfe entlang der Ausleserichtung verschoben, wenn der eigentliche Pixel gesättigt ist. Im letzten Teil wurden zwei Bandlücken ermittelt, die erste davon, 1,1(2) eV, deckt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem Literaturwert 1,12 eV bei 300 K [4] für die Bandlücke von Silizium. Im Datenblatt wird die genaue Dotierung des CCD-Sensors nicht erwähnt, was das Zuordnen der zweiten Bandlückenenergie von -0.34 eV schwierig macht.

5 Appendix

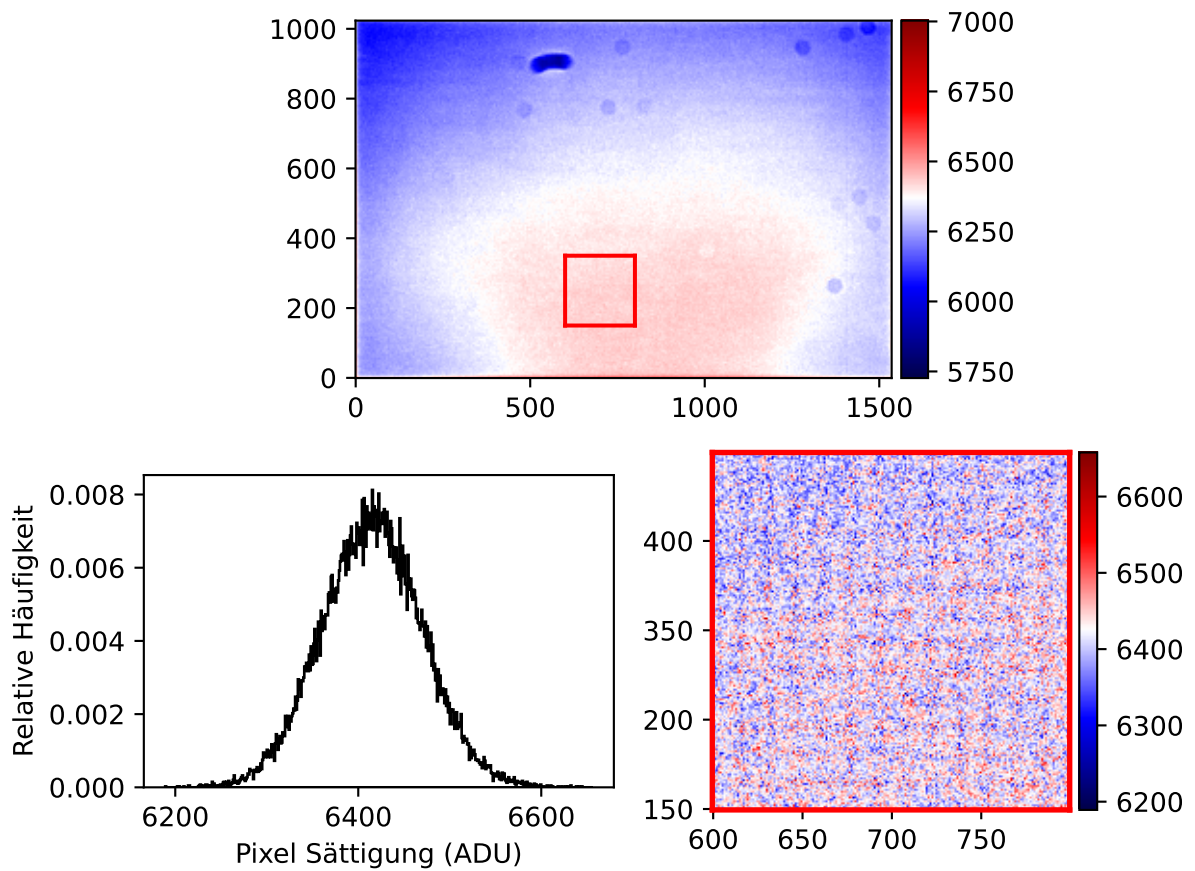


Abbildung 7: Zu sehen ist oben das gesamte Flatfield-Frame des CCD für die grüne Folie, rechts unten ist auf das rote Quadrat gezoomt. Links unten ist ein Histogramm der Pixel Sättigung gezeigt.

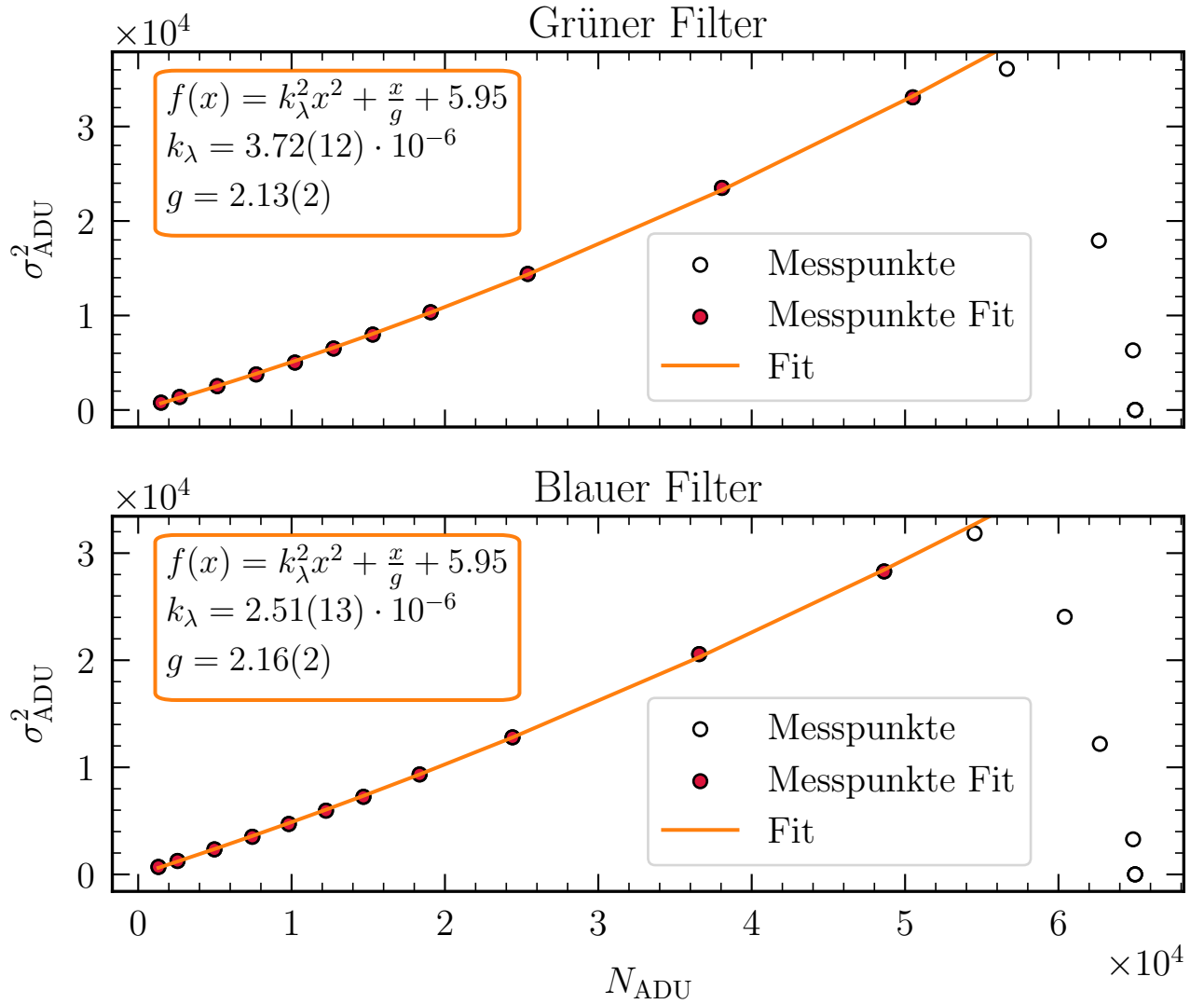


Abbildung 8: Zu sehen ist die quadrierte Standardabweichung in ADU abhängig der Signastärke in ADU für die grüne und die blaue Folie. Ebenso sind Fitfunktionen an die Daten angepasst worden. Bei dieser Fitfunktion wurde der Nulldurchgang der y-Achse als gegeben angenommen (Berechnet in Aufgabe 2).

Literatur

- [1] Veronika Schaffenroth, Stefan Kimeswenger, Norbert Przybilla. *Versuch A003 Eigenschaften optischer CCDs*. Universität Innsbruck, Innsbruck, AT, 2023.
- [2] KODAK. „KAF -1603E/ME, 585 - 7 22-438 5“. In: 19 (). Online; accessed at 24. 05. 2024. URL: <https://www.datasheets360.com/pdf/7148940108719137862>.
- [3] Wikipedia. *Blooming* — *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 22. Mai 2024]. 2021. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Blooming&oldid=216760871>.
- [4] *Bandlücke*. Online; aufgerufen am 24. 05. 2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bandl%C3%BCcke>.

Erklärung

Hiermit versichern wir, dass der vorliegende Bericht selbständig verfasst wurde und alle notwendigen Quellen und Referenzen angegeben sind.



.....
Alexander Helbok

27. Mai 2024

.....
Date



.....
Jakob Hugo Höck

27. Mai 2024

.....
Date



.....
Max Koppelstätter

27. Mai 2024

.....
Date