

Versuch A003 - Eigenschaften optischer CCDs

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle[†], Valentin Ertl[‡]

10. Juni 2025

Kurzfassung

In diesem Versuch wird eine CCD-Kamera verwendet, wobei der Schwerpunkt auf der Kalibrierung und Korrektur der Daten liegt. Das ursprüngliche Bild wird schrittweise mittels verschiedener Kalibrierungs- und Korrekturtechniken wie Bias-, Flatfield- und Dunkelstromaufnahmen bearbeitet. Anhand dieser Kalibrierungen und Korrekturen konnten Charakteristiken der CCD-Kamera ermittelt werden, wie der Gain-Faktor, das Ausleserauschen, die Full-Well-Kapazität und die Bandlücke von Silizium.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

[†]arik.buerkle@student.uibk.ac.at

[‡]valentin.ertl@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	2
2.1	Halbleiter und Photodiode	2
2.2	Charge Coupled Device (CCD)	2
3	Versuchsaufbau und -durchführung	4
3.1	Versuchsaufbau	4
3.2	Versuchsdurchführung	4
4	Experimentelle Ergebnisse	7
4.1	Aufgabe 0	7
4.2	Aufgabe 1	7
4.3	Aufgabe 2	7
4.4	Aufgabe 3	7
4.5	Aufgabe 4	8
4.6	Aufgabe 5	9
4.7	Aufgabe 6	11
4.8	Aufgabe 7	11
4.9	Aufgabe 8	13
5	Diskussion	14

1 Einleitung

Stellen Sie sich vor, Sie könnten das schwache Licht entfernter Galaxien einfangen, die feinen Details winziger Zellen sichtbar machen oder mit einem einzigen Klick das perfekte Bild festhalten. Diese beeindruckenden Fähigkeiten verdanken wir einer bemerkenswerten Technologie: den 1969 von W. S. Boyle und G. E. Smith erfundenen optischen CCDs (Charge-Coupled Devices) [1]. CCDs haben die Art und Weise, wie wir die Welt sehen und erforschen, revolutioniert und eröffnen uns jeden Tag neue Horizonte. Optische CCDs sind eine Schlüsseltechnologie in der modernen Bildgebung und Fotografie. Sie spielen eine entscheidende Rolle in einer Vielzahl von Anwendungen, von der Astronomie über die medizinische Bildgebung bis hin zur digitalen Fotografie und Videografie. Diese Halbleiterbauelemente nutzen den photoelektrischen Effekt, bei dem Photonen auf ein Halbleitermaterial treffen und Elektronen aus ihren Atomen herauslösen. Diese freigesetzten Elektronen werden in sogenannten Pixeln gesammelt. Die Menge der gesammelten Ladung ist proportional zur Lichtintensität, die auf den Pixel fällt, wodurch ein latentes Bild entsteht. Nach der Belichtung werden die gesammelten Ladungen durch eine Serie von elektrostatischen Potentialen in einem Schieberegister verschoben. Diese Potentiale werden durch anliegende Spannungen erzeugt, die sequentiell angelegt werden, um die Ladungen Pixel für Pixel zum Ausleseverstärker zu transportieren. Hier wird die Ladung in eine Spannung umgewandelt, die dann digitalisiert wird, um das endgültige Bild zu erzeugen. CCDs bieten mehrere Vorteile, die sie besonders wertvoll für wissenschaftliche Anwendungen machen. Ihre hohe Quanteneffizienz bedeutet, dass sie einen großen Anteil des einfallenden Lichts detektieren können, was besonders in der Astronomie wichtig ist, wo oft nur sehr schwaches Licht von fernen Himmelsobjekten eingefangen wird. Außerdem bieten CCDs eine hohe lineare Dynamik, was bedeutet, dass sie in der Lage sind, sowohl sehr helle als auch sehr schwache Signale genau zu messen. Dies ist besonders vorteilhaft in der Spektroskopie und anderen wissenschaftlichen Messungen, die eine präzise Quantifizierung der Lichtintensität erfordern [1]. CCDs haben nicht nur die Wissenschaft, sondern auch unser tägliches Leben revolutioniert. In der Astronomie ermöglichen sie es uns, Bilder von Sternen und Galaxien zu erstellen, die Milliarden von Lichtjahren entfernt sind. In der Medizin liefern sie präzise und detaillierte Bilder, die Ärzten helfen, Diagnosen zu stellen und Leben zu retten. Und in der Welt der Fotografie haben sie die analoge Ära hinter sich gelassen und uns in eine digitale Zukunft geführt, in der jeder Moment mit unglaublicher Klarheit festgehalten werden kann.[2]

2 Theorie

Um eine CCD-Kamera zu verstehen, muss man sich zunächst mit der Funktionsweise eines CCDs beschäftigen. In diesem Kapitel wird daher zunächst die Funktionsweise eines Halbleiters erläutert und anschließend das Konzept eines CCDs beschrieben.

2.1 Halbleiter und Photodiode

Der Aufbau eines Halbleiters wurde bereits in vielen Experimenten ausführlich erklärt. Kurz zusammengefasst besteht ein Halbleiter aus einem vollständig besetzten Band (Valenzband) und einem leeren Band (Leitungsband). Der Energieunterschied zwischen den Bändern ist sehr gering, sodass Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband springen können. Diesen Effekt macht man sich bei einer Photodiode zunutze. Durch p- und n-Dotierung (Einfügung von Elementen mit höherer und niedrigerer Elektronenzahl) wird der Übergang zwischen den Bändern in einem bestimmten Bereich verringert, wie in Abbildung 1 dargestellt. Dadurch können Photonen, die auf die Diode treffen, ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband verschieben. Dies erzeugt einen Stromfluss, der detektiert werden kann. Die Diode ermöglicht es somit, Photonen über einen Stromfluss zu detektieren.

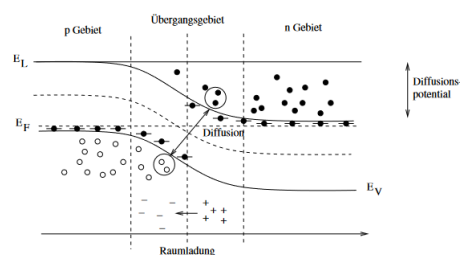


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bandlücke eines pn-Übergangs mit dem Übergang vom Valenzband zum Leitungsband im Dunkelzustand.[3]

2.2 Charge Coupled Device (CCD)

Um ein zweidimensionales Bild von Licht zu erzeugen, kann man mehrere dieser Photodioden in einem zweidimensionalen Array anordnen. Jede Photodiode fungiert dabei als Detektor, also als Pixel. Um das Bild digital zu rekonstruieren, muss die entstehende Ladung jeder Photodiode zugeordnet werden können.

Die Werte an jedem Pixel werden ausgelesen, indem die entstehende Ladung zunächst in einem Potentialtopf gespeichert wird. Zum Auslesen der gespeicherten Ladung werden die Ladungen mittels eines Pulssignals von Topf zu Topf verschoben. Zwischen den einzelnen Pixeln befinden sich dabei zwei weitere Töpfe, die eine Verschiebung durch den Puls ermöglichen, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Durch die zeitliche Abhängigkeit der ankommenden Signale kann das CCD jedem Pixel in der Reihe einen Wert zuordnen. Erweitert man nun die eindimensionale Reihe in eine zweidimensionale Anordnung durch Stapeln mehrerer Reihen und durch zeitlich versetztes Auslesen jeder

Reihe, entsteht eine zweidimensionale Aufnahme des Lichtes.

In der Ausleseelektronik wird das Signal der Photoelektronen zunächst verstärkt und anschließend in ein Analog-Digital-Signal (ADU) konvertiert.

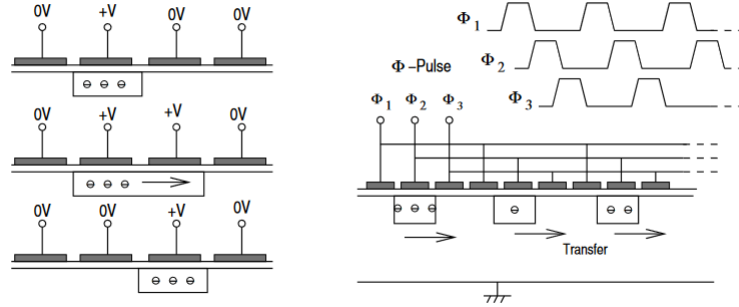


Abbildung 2: Der schematische Aufbau eines CCDs illustriert die Ansammlung von Elektronen und deren Auslesung mittels Spannungspulsen zur Verschiebung der Elektronen. [1]

Das Signal der Kamera beschreibt nicht die Anzahl der gemessenen Elektronen, sondern ist in ADU (Analog-Digital Units) angegeben. Mittels des Gain-Faktors kann der mittlere Elektronenwert berechnet werden.

$$N^e = gN^{ADU} \quad \sigma^e = g\sigma^{ADU} \quad (1)$$

Der Mittelwert der ADU gibt Auskunft über die Anzahl der Elektronen. Diese ist jedoch durch eine statistische Verteilung charakterisiert, wodurch der Mittelwert mit einem Fehler behaftet ist.

$$\sigma^e = \sqrt{N^e}. \quad (2)$$

Dazu kommen noch weitere Fehler, die über eine Kalibrierung der Kamera ermittelt werden können. Die erste Fehlerquelle entsteht beim Auslesen der Pixel, da einige Pixel besser ausgelesen werden als andere, und wird als Bias bezeichnet. Dadurch entsteht ein gewisser Offset in der Auslesung, der als Biasstruktur bekannt ist. Durch Messungen ohne Belichtungszeit und mit geschlossenem Verschluss kann der Bias bestimmt werden.

Die zweite Fehlerquelle ist der Dunkelstrom, der durch thermische Ionisation von Elektronen entsteht. Durch Kühlung der Kamera kann diese Fehlerquelle minimiert werden, da bei niedrigen Temperaturen die thermische Energie der Elektronen seltener der Bandlücke entspricht. Zur Messung des Dunkelstroms werden Dark Frames erstellt, indem die Kamera bei geschlossenem Verschluss lange belichtet wird, um möglichst viele thermische Anregungsprozesse aufzunehmen. Die letzte Fehlerquelle ist die unterschiedliche Empfindlichkeit der einzelnen Pixel auf Licht, was zu einer unterschiedlichen Umwandlungsrate von Photonen führt. Die Kalibrierungsmessung ist die Flat-Field-Messung, bei der die Kamera mit einer Flat-Field-Lampe beleuchtet wird, die alle Pixel mit der gleichen Intensität anstrahlt.

Der Gesamtfehler der Messung ist damit

$$\sigma_{total}^{ADU} = g^{-2}[(\sigma^e)^2 + (\sigma_{bias}^e)^2 + (\sigma_d^e)^2 + (\sigma_{FF}^e)^2]. \quad (3)$$

Dabei ist σ_{bias}^e der Fehler durch den Bias der Kamera, σ_d^e der Fehler durch den Dunkel Strom und σ_{FF}^e der Fehler der Flat field messung.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die folgenden Textabschnitte veranschaulichen den Versuchsaufbau und erläutern die genaue Datenaufzeichnung und Durchführung des Experiments.

3.1 Versuchsaufbau

Der fertige Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 zu sehen. Zuerst musste das Stativ so aufgestellt werden, dass es möglichst stabil steht, wenn der CCD auf ihm montiert wird. Anschließend haben wir das Objektiv, zuerst auf den CCD geschraubt und dann beide Elemente gemeinsam auf dem Stativ fixiert. Es ist wichtig, dass das Konstrukt sicher steht um Schäden, welche teuer werden können, zu vermeiden. In der Mitte von Abbildung 3 ist die Flat-Field-Lampe zu sehen, welche über ihre gesamte Fläche eine nahezu homogene Lichtintensität ausstrahlt. Diese Lampe wird für die Aufnahme der Flatfield-Frames benötigt und wie in Abbildung 3 (rechts) oben auf das Objektiv draufgelegt. Später wird auch eine Glühlampe verwendet, welche vor dem CCD mit dem Objektiv platziert wurde um den sogenannten "BloomingEffekt zu veranschaulichen. Dazu aber später mehr in 3.2. Zu guter Letzt muss man dann noch alles mit dem Stromnetz verbinden bzw. an den Computer anschließen, um die aufgenommenen Daten dort mit der Software „SIPS“ auswerten zu können. Sobald der CCD ans Stromnetz angeschlossen ist beginnt seine Kühlung zu laufen und kühlt den CCD mit der Zeit auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es ist wichtig, dass sich die Temperatur des CCDs immer erst eingependelt hat bis man mit der ersten Messung startet. Nachdem der Versuchsaufbau, wie eben beschrieben, exakt aufgebaut wurde, kann man mit der Durchführung des Versuchs beginnen. Logischerweise sollte bei der kompletten Versuchsdurchführung bzw. bei der Aufnahme der verschiedenen Daten der Praktikumsraum so dunkel wie möglich sein und datenverfälschende Lichtquellen vermieden werden.

3.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung des Experiments kann in einzelne Schritte unterteilt werden. Der erste Schritt ist die Einstellung des Objektivs mit optimalen Fokus, Zoom und Blende. Da diese Einstellungen bei uns jedoch schon optimal vorlagen und wir bereits wussten, dass die Größe der Eintrittspupille minimal gewählt werden musste, da es sonst immer direkt zur Überbelichtung kommen würde, konnten wir diesen Schritt überspringen. Unser erster Schritt war die Aufnahme einer Bias-Frame Serie von mindestens 23 Bias-Frames. Dazu hielten wir den Verschluss des Objektivs geschlossen, um keinen Lichteinfall zu haben. Mit der kürzest möglichen Belichtungszeit von 0,1 s und ohne Lichteinfall nahmen wir dann die Bias-Serie auf. Die ersten drei Aufnahmen haben wir dabei immer ignoriert, da der Bias erst nach ein paar Aufnahmen stabile Werte annimmt. Ziel war es



Abbildung 3: Versuchsaufbau: der montierte CCD auf dem Stativ (links), die Flat-Field-Lampe (mitte) und der gesamte Versuchsaufbau mit dem montierten Objektiv am CCD (rechts). Bildquelle: [1]

dann, aus den statistischen Eigenschaften das Ausleserauschen und den mittleren $\langle \text{bias} \rangle$ zu bestimmen. Dazu wurden immer die äußersten 50 Zeilen und Spalten des CCDs ausgeschlossen. Die Datenauswertung wird detailliert in 4 erläutert. Im nächsten Schritt galt es dann, den Gain Faktors g und der Linearität des CCDs zu bestimmen. Dazu musste mit der Flat-Field-Lampe, welche wie in Abbildung 3 (rechts) auf das Objektiv gelegt wurde, jeweils ein Flatfield mit einer Belichtungszeit von jeweils einer Sekunde einmal für den grünen und einmal für den blauen Farbfilter aufgenommen werden. Die Lampe wurde dabei für den grünen Farbfilter mit 8 Volt und für den blauen Farbfilter mit 9 Volt betrieben. Die Farbfilter wurden jeweils zwischen Objektiv und Flat-Field-Lampe eingeschoben. Zur Bestimmung der Linearität des CCDs mussten wir dann jeweils zwei Serien mit unterschiedlich langen Belichtungszeiten für die beiden Farbfilter aufnehmen. Beim beiden Farbfiltern haben wir die Serie mit einer Aufnahme mit einer Belichtungszeit von 0,5 s begonnen. Dann mussten wir jeweils die Belichtungszeit ermitteln, ab der die jeweiligen Aufnahmen mit den verschiedenen Filtern überbelichtet waren. Bei dem blauen Filter kam es zu einer Überbelichtung ab ca. einer Belichtungszeit von und bei dem grünen ab ca. In der Nähe des Starts der Serien (0,5 s) bzw. des Endes der Serien (bzw.) haben wir die Schrittgröße der Belichtungszeiten gering gehalten, während wir in der Mitte der Serien die Schrittgröße eher größer gewählt haben, da wir dort im Plot aufgrund der Linearität des CCDs eine Gerade erwarten, welche nicht so viele Datenpunkte benötigt. Zwischen der blauen und der grünen Serie haben wir nochmals 8 Bias aufgenommen, um die Stabilität des Systems zu kontrollieren. Die ersten drei wurden dabei wieder verworfen. Als nächstes war es unser Ziel, das sogenannte „Blooming“ zu demonstrieren. Hierzu benötigten wir die Glühlampe, vor deren Front wir in einem Abstand von ca. einem halben Meter unseren CCD mit dem Objektiv platzierten. Die Blende des Objektivs muss dabei so weit wie möglich geschlossen bleiben. Außerdem mussten die Bereiche, welche die Lampe außerhalb der Blende beleuchtet, weitestgehend abgeschattet werden, um dort später keine Überbelichtungen zu erhalten. Dann haben wir ein Bild mit einer geringen Belichtungszeit von aufgenommen und eines mit einer längeren Belichtungszeit von nahe der Überbelichtung. In der letzten Aufgabe dieses Versuches sollen wir die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms genauer untersuchen. Dazu haben wir für verschiedene Temperaturen jeweils 8 Bias-Frames aufgenommen, wobei wir die ersten drei wieder ignoriert haben, und mindestens drei Dark-Frames.

Begonnen haben wir bei den eingestellten $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für Temperaturen kleiner $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ haben wir eine Belichtungszeit von 180 Sekunden verwendet, für Temperaturen kleiner $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Belichtungszeit von 120 Sekunden und für höhere Temperaturen eine Belichtungszeit von 60 Sekunden. Zu beachten war hierbei, dass sich nicht nur die Temperatur erst auf einen konstanten Wert einpendeln muss, sondern der ganze elektronische Regelkreis, weshalb wir zwischen jeder Messung immer etwas warten mussten. Aus diesem Teil des Versuchs lässt sich dann in [4](#) die Bandlücke bestimmen.

4 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die aufgenommenen Daten dargestellt und ausgewertet. Im ersten Teil erfolgt die Analyse der Struktur von HOPG, wobei die Abstände zwischen den Atomen bestimmt und eine Stufe zwischen den Schichten betrachtet werden. Im zweiten Teil werden Titan-Nanopartikel untersucht und deren Größe wird bestimmt.

4.1 Aufgabe 0

Obwohl die mittlere Energie nicht ausreicht, um die Barriere von 1,115 eV zu überwinden, können Elektronen durch thermische Anregung dennoch in das Leitungsband springen. Da die thermische Energie der Elektronen Boltzmann-verteilt ist, besitzen nicht alle Elektronen die gleiche Energie. Daher gibt es bei Raumtemperatur einige Elektronen, die genug Energie haben, um die Barriere zu überwinden. Dies führt zum Dunkelstrom, der temperaturabhängig ist.

4.2 Aufgabe 1

Wenn sich Staubkörner auf der Linse befinden, wird nicht das gesamte Licht direkt blockiert. Aufgrund ihrer feinen Struktur können sich die Staubkörner um das Licht herum beugen. Gleichzeitig erscheinen die Staubkörner auf der Kamera als sechseckige Formen, da die Blende diese geometrische Form hat.

4.3 Aufgabe 2

Nachdem der Sensor auf -20°C abgekühlt wurde, wurden 23 Bias Frames aufgenommen. Die ersten drei wurden verworfen, da sie thermisch angereicherte Ladungen enthielten. In allen folgenden Bias Frame Aufnahmen wurden ebenfalls die ersten drei Bilder verworfen. Zur weiteren Auswertung der Bias Frames wurden die äußeren 50 Pixel der Bilder gekürzt, da in diesem Bereich die Kamera weniger empfindlich ist. Nach der Auswertung ergab sich ein mittlerer Bias von $\bar{b}_0^{ADU} = 543(2) \text{ ADU}$. Dieser Wert kann von allen Pixeln abgezogen werden, wonach sich ein Bias Fehler von $\sigma_{bias}^{ADU} = 5,94 \text{ ADU}$ ergibt.

4.4 Aufgabe 3

Als nächstes wurde der Gain-Faktor g der Kamera schnell bestimmt. Dazu wurde die Blende weiterhin auf ihrer kleinen Größe gehalten und die Kamera mit einer Flat-Field-Lampe angestrahlt. Farbfilterfolien (grün und blau) wurden zwischen die Lampe und die Kamera gelegt, um ausschließlich grünes oder blaues Licht zu betrachten. Die Lampen wurden mit einer Spannung von $U = 9,0(1) \text{ V}$ für den blauen Filter und $U = 8,0(1) \text{ V}$ für den grünen Filter betrieben. Die Belichtungszeit betrug 1 s.

Zur Auswertung der Messreihe wurden jeweils vor der Messung für jede Farbfolie 8 Bias Frames aufgenommen, die für die Aufgaben 3, 4 und 5 genutzt wurden. Dementsprechend wurden die Daten für die Aufgaben für jede Folie direkt hintereinander aufgenommen.

Von den Gleichungen in 1 und 2 erhält man den Gain-Faktor.

$$g = \frac{N^{ADU}}{(\sigma^{ADU})^2}. \quad (4)$$

Nach der Aufnahme der Daten (siehe Abbildungen 4 und 5) wurde ein Bereich mit möglichst homogener Beleuchtung ausgewählt, um statistische Fehler durch Equipment, Schmutz und hochenergetische Strahlung zu vermeiden. Nach dem Abzug wurde eine mittlere Pixelsättigung von $N^{ADU}_{blau} = 1566$ ADU mit einer Standardabweichung von $\sigma^{ADU}_{blau} = 28,5$ ADU für den blauen Filter gemessen. Für den grünen Filter wurden $N^{ADU}_{gruen} = 2696$ ADU mit $\sigma^{ADU}_{gruen} = 36,8$ ADU gemessen. Daraus ergibt sich ein Gain von $g_{blau} = 1,92$ e/ADU für den blauen Filter und $g_{gruen} = 1,99$ e/ADU für den grünen Filter. Es konnte kein statistischer Fehler für die Messung berechnet werden, da nur ein Datensatz ausgewertet wurde.

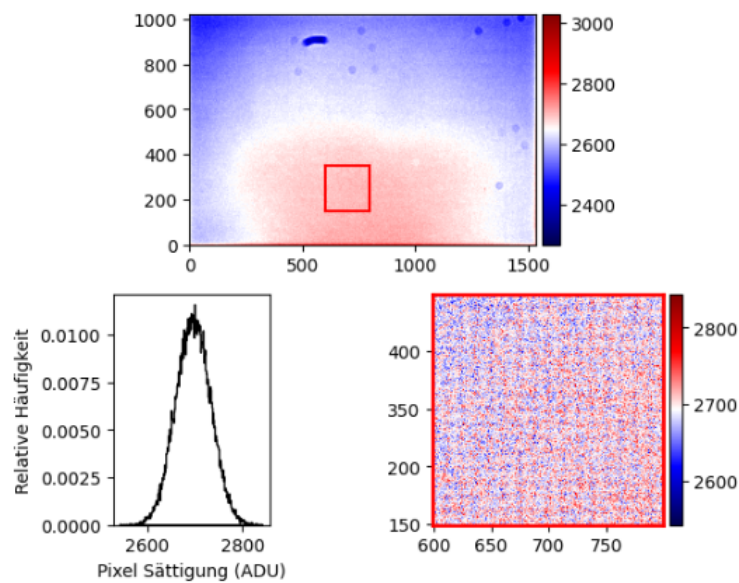


Abbildung 4: Die Abbildung oben zeigt das gesamte Flatfield-Frame des CCDs, das für die Messung mit der grünen Folie verwendet wurde. Der rot markierte Bildausschnitt (200×200 Pixel) ist unten rechts vergrößert dargestellt. Unten links ist die Pixelsättigung dieses Bildausschnitts in einem Histogramm dargestellt.

4.5 Aufgabe 4

Nach der Berechnung des Gain-Faktors wurde untersucht, wie sich die Intensität bei unterschiedlichen Belichtungszeiten verhält. Die Belichtungszeit wurde von 0,5s bis zur Übersättigung erhöht: bis 28s für den grünen Filter und 44s für den blauen Filter. Am Anfang und Ende der Aufnahmereihe wurden kürzere Schritte gemacht, da dort ein nichtlineares Verhalten beobachtet wurde. Bei den mittleren Belichtungszeiten wurden größere Schritte gemacht. In Abbildung 6 ist das Wachstum der Intensität mit der Belichtungszeit N^{ADU}/t_{exp} aufgetragen, wobei dieses zum Mittelwert N^{ADU}_{mean} normiert wurde. Zur Auswertung wurde dasselbe Quadrat wie in Aufgabe 3 verwendet. Zu erkennen ist, dass sowohl beim grünen Filter als auch beim blauen Filter in der Mitte der Kurve eine konstante Steigung vorhanden ist. Für kurze Belichtungszeiten ist das

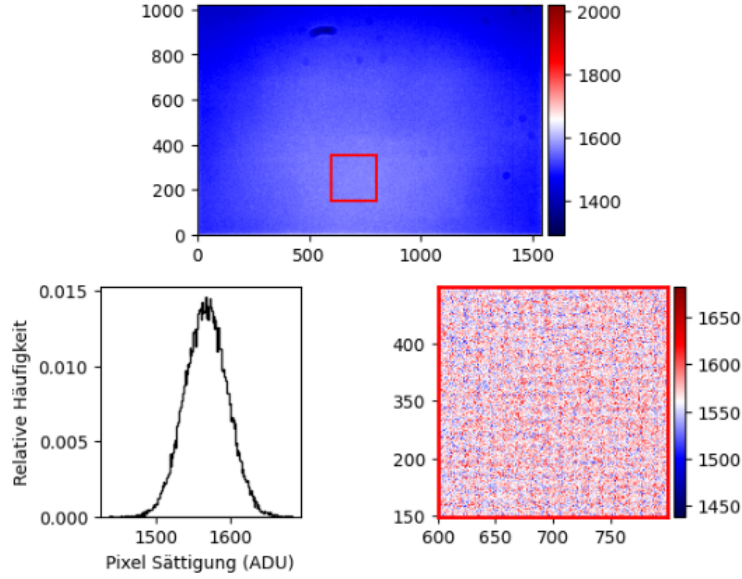


Abbildung 5: Die Abbildung oben zeigt das gesamte Flatfield-Frame des CCDs, das für die Messung mit der blauen Folie verwendet wurde. Der rot markierte Bildausschnitt (200×200 Pixel) ist unten rechts vergrößert dargestellt. Unten links ist die Pixelsättigung dieses Bildausschnitts in einem Histogramm dargestellt.

Wachstum größer als das mittlere Wachstum, und für lange Belichtungszeiten ist es kleiner als das mittlere Wachstum.

Das nichtlineare Wachstum kann durch die Funktionsweise des CCD erklärt werden. Der Verschluss der CCD-Kamera schließt sich, um die Belichtung zu stoppen. Dieser Schließprozess erfolgt räumlich und kann daher nicht instantan geschehen. Dies führt dazu, dass etwas länger belichtet wird als angegeben, was gerade bei kurzen Belichtungszeiten eine größere Auswirkung hat. Bei sehr langen Belichtungszeiten kommt es zu einer Übersättigung: Die Pixel können nicht mehr Elektronen speichern. Dieser Bereich wurde zwar hier nicht erreicht, doch tritt bereits vorher eine Sättigung ein, da die Potenzialtöpfe der Pixel nahezu voll sind und somit nur noch mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit ein Elektron speichern können.

Der Dunkelstrom kann bei diesen Aufnahmen vernachlässigt werden, da er, wie in Abschnitt 4.9 bestimmt, deutlich kleiner ist als der Strom durch die Belichtung.

4.6 Aufgabe 5

Aus den aufgenommenen Daten für Aufgabe 4 kann nun ein Vergleich zwischen der mittleren Intensität und dem Fehler wie in Aufgabe 3 durchgeführt werden. Dabei spielen jedoch noch weitere Fehler eine Rolle, wodurch sich das Verhältnis ändert.

$$(\sigma^{ADU})^2 = k_\lambda^2 (N^{ADU})^2 + \frac{N^{ADU}}{g} + c \quad (5)$$

wobei k_λ eine Konstante ist, die von der Wellenlänge des Lichts abhängt, und c der Offset durch den Bias ist. Durch das Anpassen einer Parabel an die Datensätze erhält man offene Parabeln, die in Abbildung 7 dargestellt sind. Daraus lässt sich ein genauerer Gain-Faktor von $g_{gruen} = 2,15(7)$ e/ADU und $g_{blau} = 2,33(3)$ e/ADU bestimmen. Durch Festlegen des Parameters

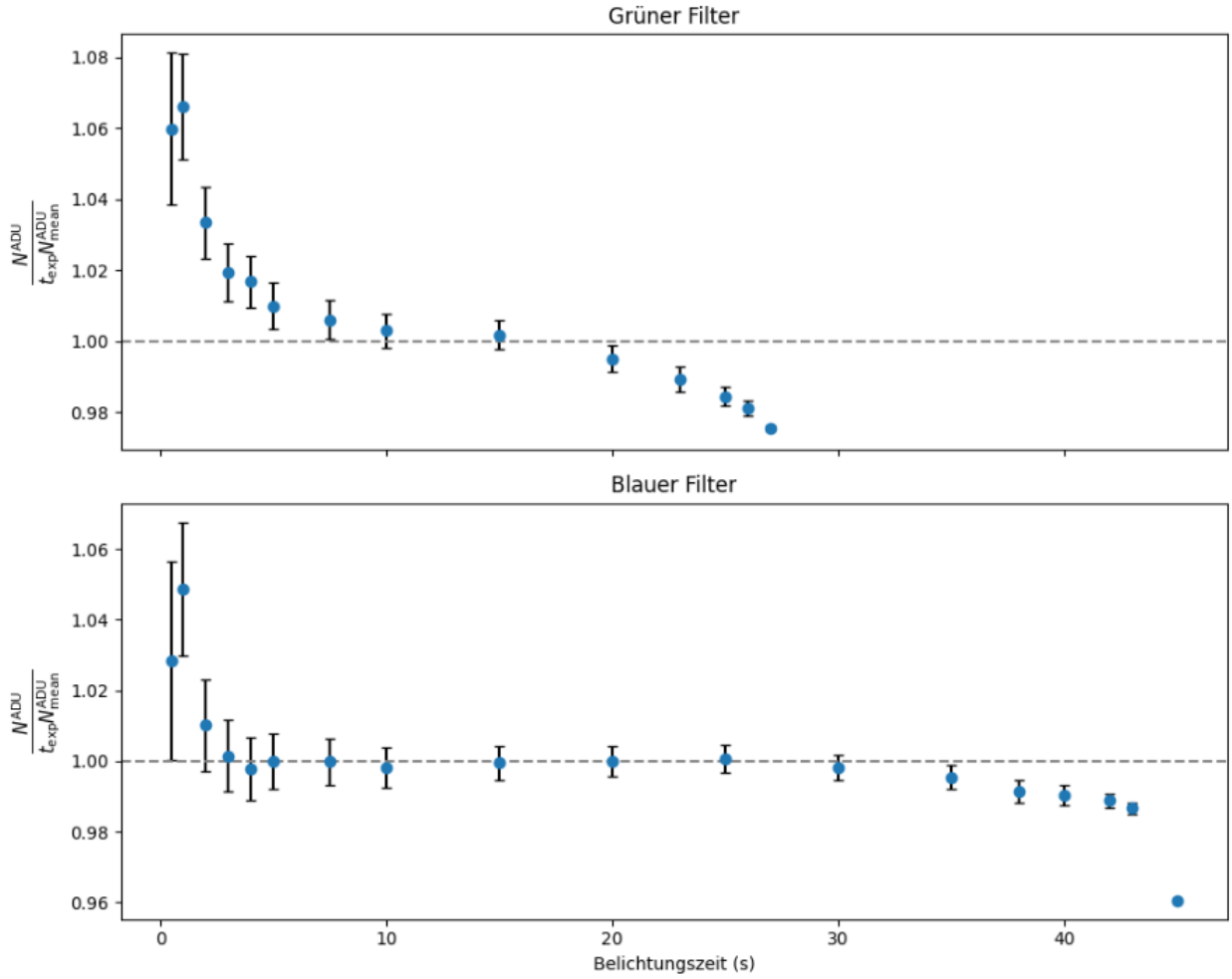


Abbildung 6: Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen N^{ADU}/t_{exp} und der Belichtungszeit t_{exp} für beide Farbmessungen. Die y-Achse ist zusätzlich durch den Mittelwert N_{mean}^{ADU} des linearen Bereichs normiert. Dieser Mittelwert wird durch die gestrichelte Linie bei dem Wert 1 dargestellt, was sich durch die Normierung ergibt.

c auf die Bias-Standardabweichung kann man Parabeln mit einer Variablen weniger anpassen, siehe Abbildung 8. Dazu wurde ein Gain von $g_{gruen} = 2,16(2) \text{ e/ADU}$ und $g_{blau} = 2,24(2) \text{ e/ADU}$ bestimmt. Beide Gain-Werte weichen von dem in Aufgabe 3 bestimmten Wert ab. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass der Wert in Aufgabe 3 nur mit einem Messpunkt bestimmt wurde und daher dort der Fehler fehlt. Theoretisch könnte diese Messung auch ohne einen Bias-Fehler durchgeführt werden, indem man den Offset auf null setzt. Der Bias-Fehler ist besonders bei langen Belichtungszeiten nicht sehr ausschlaggebend, da der Fehler vom Flat-Field dominiert wird und somit vernachlässigbar ist.

Eine weitere interessante Eigenschaft, die man in der Kurve erkennen kann, ist ein starker Abfall bei hohen Belichtungszeiten, wenn die Sättigung eintritt. Daraus kann man die Full-Well-Capacity gut abschätzen, indem man die Intensität betrachtet, bei der der erste Punkt von der Parabel abweicht. Diese liegt bei etwa $N^{ADU} = 5,61(2) \cdot 10^4 \text{ ADU}$ und beschreibt die volle Auslastung. Vom Hersteller wurde angegeben, dass diese in einer Größenordnung von 10^4 liegt, was mit unserem Wert übereinstimmt.

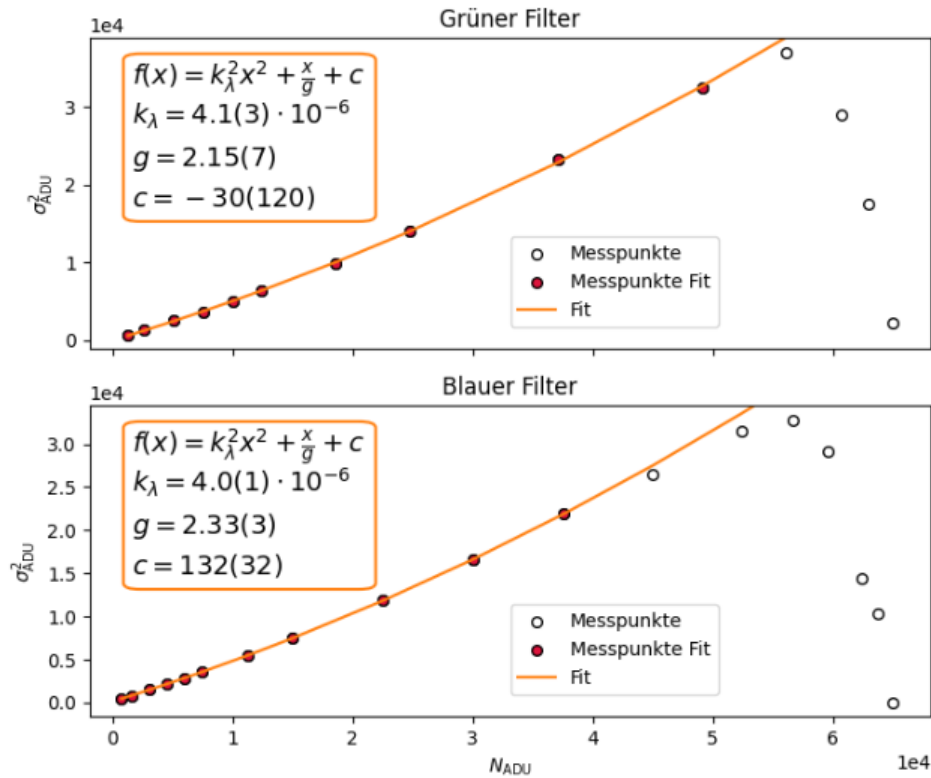


Abbildung 7: Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der quadrierten Standardabweichung σ_{ADU}^2 des Signals und der Signalstärke N_{ADU} für beide Farbmessungen. Beide Größen sind in Einheiten von ADU dargestellt. Darüber hinaus wurde eine Fitfunktion in Form einer Parabel an die Daten angepasst, welche in der Legende (oben links) näher beschrieben wird. Die für die Fitfunktion verwendeten Datenpunkte sind rot markiert.

4.7 Aufgabe 6

Um das Ausleserauschen der CCD-Kamera von der ADU-Einheit in ein echtes Elektronenrauschen umzuwandeln, muss dieses Rauschen mittels des Gain-Faktors in eine Elektronenzahl umgerechnet werden, siehe Gleichung 1. Dazu verwenden wir den in Aufgabe 2 bestimmten Fehler von $\sigma_{bias}^{ADU} = 5,94 \text{ ADU}$ und einen mittleren Gain-Wert von $\bar{g} = 2,24(4) \text{ e/ADU}$ und erhalten ein Elektronenrauschen von $\sigma_{bias}^e = 13,28(22) \text{ e}$. Dieser Wert weicht von der Angabe des Herstellers von 15 Elektronen ab, doch ist dies nicht überraschend, da die vom Hersteller gewählte Toleranz nicht überschritten werden darf und eine kleinere Toleranz für den Verkauf durchaus akzeptabel ist.

4.8 Aufgabe 7

In diesem Teil des Versuches beschäftigen wir uns mit dem Blooming-Effekt bei einer CCD-Kamera. Dazu wird die Kamera in einem Abstand von $0,5(1) \text{ m}$ vor eine helle punktförmige Lichtquelle platziert. Es werden zwei Bilder aufgenommen, einmal mit einer Belichtungszeit von $t = 0,1 \text{ s}$ und einmal mit $t = 12 \text{ s}$. Diese sind in Abbildung 9 dargestellt. Im ersten Bild ist das Licht der punktförmigen Lichtquelle deutlich erkennbar. Im zweiten Bild ist zu sehen, dass das Signal der Lichtquelle entlang einer senkrechten Linie ausgebreitet ist. Dieses Phänomen wird

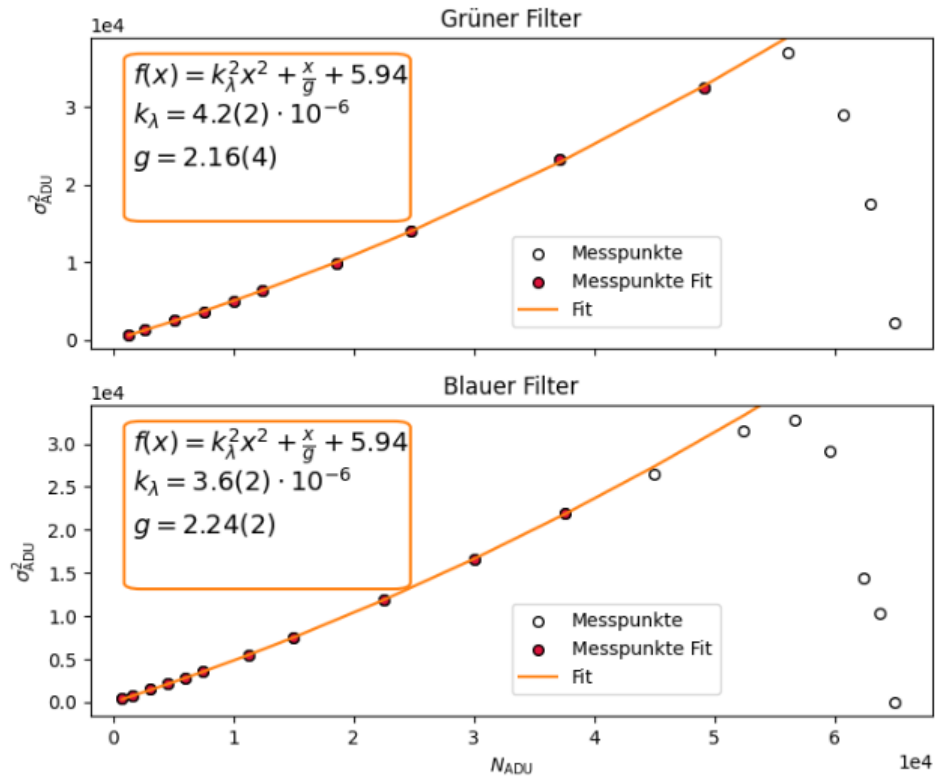


Abbildung 8: Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der quadrierten Standardabweichung σ_{ADU}^2 des Signals und der Signalstärke N_{ADU} für beide Farbmessungen. Beide Größen sind in Einheiten von ADU angegeben. Darüber hinaus wurde eine Fitfunktion in Form einer Parabel an die Daten angepasst, die in der Legende (oben links) näher beschrieben wird. Bei diesem Diagramm wurde der Offset c der Parabel nicht gefittet, sondern durch das Ausleserauschen $\sigma_{ron,1}^{ADU} = 5,94$ ADU festgelegt. Die für die Fitfunktion verwendeten Datenpunkte sind rot markiert.

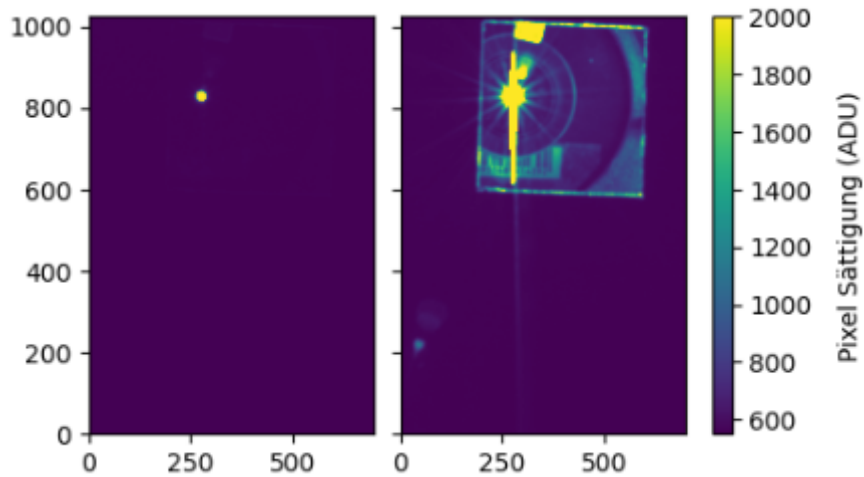


Abbildung 9: Dargestellt sind zwei Aufnahmen die mit verschiedenen Belichtungszeiten aufgenommen wurden. Die linke Aufnahme hat eine Belichtungszeit von 0,1 s, während die rechte eine Belichtungszeit von 12 s aufweist. Das Blooming erscheint hierbei in der echten Aufnahme als vertikaler, vollständig gesättigter Streifen.

als Blooming bezeichnet und entsteht, wenn die einzelnen Pixel des CCDs nur eine begrenzte Menge an Elektronen halten können. Wird diese Menge stark überschritten, können Elektronen in benachbarten Pixeln angesammelt werden. Da der CCD die Pixel zeilenweise ausliest und diese nur zeilenweise verbunden sind, entsteht ein senkrechter Streifen.

Die Asymmetrie des Streifens kommt durch die Auslese-Richtung des CCDs zustande, wobei der Elektronenfluss in dieser Richtung zur Beschleunigung der Auslesegeschwindigkeit gefördert wird. Zudem können weitere ringförmige Signale und leichtere Linien beobachtet werden, die durch die Form und Größe der Blende verursacht werden.

4.9 Aufgabe 8

Zum Abschluss wurde die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms der CCD-Kamera untersucht. Hierbei wurde die Temperatur des CCD-Chips schrittweise um 8 K erhöht, bis eine Endtemperatur von 20 °C erreicht wurde. Für jede Temperatur wurden jeweils drei Aufnahmen mit geschlossenem Verschluss und langer Belichtungszeit gemacht: 3 min bei −20 °C und −12 °C, 2 min bei −4 °C und 4 °C, sowie 1 min bei 12 °C und 20 °C. Vor jeder Aufnahme wurden 8 Bias Frames aufgenommen, um die Bildrauschung zu berücksichtigen.

Der Dunkelstrom in der Kamera ist mit

$$I = c \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (6)$$

von der Temperatur abhängig. Dabei ist E_g die Bandlücke des Materials und c eine Konstante. Um den Dunkelstrom auszuwerten, wurden die im Aufnahmezeitraum geflossenen Elektronen betrachtet. Dazu musste zunächst das Signal mittels des Gains in die Einheit Elektronen umgewandelt werden, und durch $I = Q/t$ konnte der Strom bestimmt werden. Durch Logarithmieren des Stroms und Umstellen kann ein linearer Zusammenhang in Abhängigkeit von T geschaffen werden. Dieser ist in Abbildung 10 dargestellt. Anhand der Steigung kann man nun die Bandlücke von $E_g = 1,1(2)$ eV bestimmen. Dabei sind die letzten beiden gemessenen Punkte nicht mehr auf der Geraden, da dort die Bandlücke praktisch nicht überwunden wird. Aus der Literatur ergibt sich ein Wert von 1,12 eV für Silizium bei einer Temperatur von 300 K [4]. Damit stimmt die von uns gemessene Bandlücke mit der aus der Literatur überein.

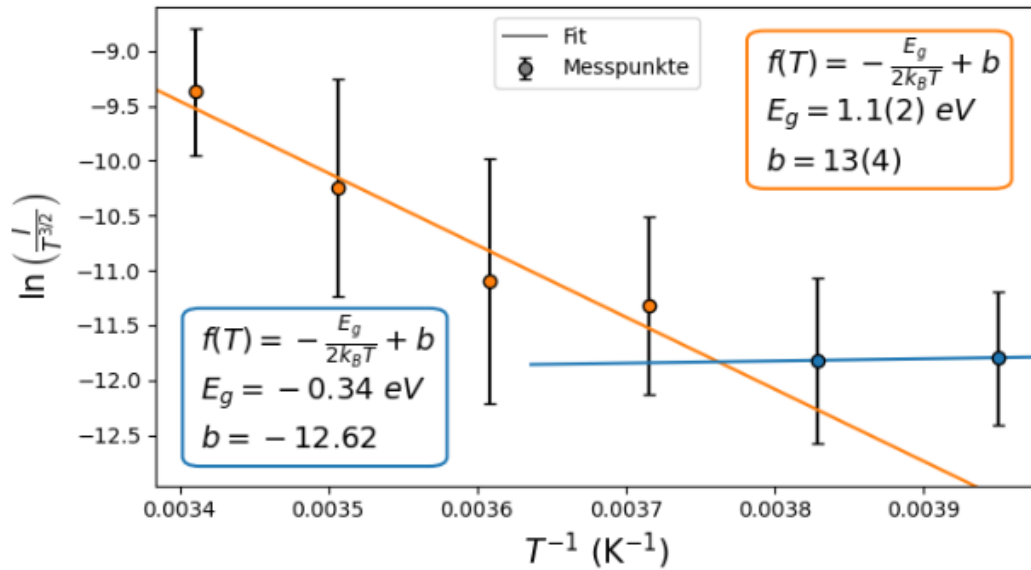


Abbildung 10: Das Diagramm zeigt den Dunkelstrom in logarithmischer Darstellung, normiert durch $T^{3/2}$, in Abhängigkeit von der inversen Temperatur. Die Daten sind in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt, die jeweils separate Fit-Kurven besitzen. Die Fitfunktionen sind in der Legende dargestellt.

5 Diskussion

In diesem Versuch wurde die Funktionsweise und Kalibrierung eines CCD-Sensors demonstriert. Dazu wurde zuerst eine Bias korrektur durchgeführt wo ein Bias fehler von 5,95 ADU bestimmt werden konnte. Der Gain-Faktor des CCD wurde sowohl durch die statistische Streuung bei Flatfield-Aufnahmen als auch durch einen Parabelfit zu $\bar{g} = 2,24(4) \text{ e/ADU}$ genauer bestimmt. Daraus konnte der Bias Fehler in anzahl an Elektronen von 13,28(22) e welcher mit den Angaben des Herstellers überein stimmt, sowie die maximale füllung von $5,61(2) \cdot 10^4 \text{ ADU}$. Des Weiteren konnte der Blooming-Effekt gezeigt und erklärt werden, der einen Sättigungseffekt bei CCD-Sensoren darstellt. Abschließend wurde die Bandlücke des CCD-Sensors zu $E_g = 1,1(2) \text{ eV}$ bestimmt, welche mit dem Literaturwert für die Bandlücke von Silizium übereinstimmt.

Literatur

- [1] U. Innsbruck. *Fortgeschritten-Praktikum 1: Versuch A003 Eigenschaften optischer CCDs*. Skript; Status SS2023. Abgerufen am 09.06.24.
- [2] Wikipedia. *CCD-Sensor*. Online; Status 27.05.24. Abgerufen am 09.06.2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>.
- [3] U. Innsbruck. *FP1 Versuch I001: Rastertunnelmikroskop (STM)*. Skript; Status SS2024. Abgerufen am 31.05.24.
- [4] Wikipedia. *Bandlücke*. Online; Status 24.06.23. Abgerufen am 13.06.2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bandl%C3%BCcke>.

Erklärung

Hiermit bestätigen wir, dass der vorliegende Bericht unabhängig verfasst wurde und dass alle erforderlichen Quellen und Referenzen angegeben wurden.

Arik Bürkle
Student 1

02.06.2024
Datum

Robin Hoffmann
Student 2

02.06.2024
Datum



Valentin Ertl
Student 3

02.06.2024
Datum

Arbeitsaufwand

Arik Bürkle

Vorbereitung:4h

Versuch:3h

Bericht:11h

Robin Hoffmann

Vorbereitung:3h

Versuch:3h

Bericht:11h

Valentin Ertl

Vorbereitung:4h

Versuch:3h

Bericht:8h