

V15

Vermessung und Untersuchung von Silizium-Streifensensoren

Marius Hötting
Marius.Hoetting@udo.edu

Hubertus Kaiser
Hubertus.Kaiser@udo.edu

Durchführung: 06.01.2019

Abgabe: 21.01.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Ziel des Versuches	3
1.2	Halbleiter	3
1.3	p- und n- Halbleiter	3
1.4	Der pn- Übergang	4
1.5	Pedestals und Noise	5
2	Fehlerrechnung	6
3	Versuchsaufbau	7
3.1	Die Detekoreinheit	7
3.2	Der Halbleitersensor	7
4	Durchführung	9
5	Auswertung	10
5.1	Strom-Spannungs-Kennlinie	10
5.2	Pedestal und Noise	11
5.3	Kalibrationsmessung	14
5.4	Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers	16
5.5	Charge Collection Efficiency des Lasers	17
5.6	Charge Collection Efficiency der Sr-Quelle	18
5.7	Großer Quellenscan	19
6	Diskussion	22
6.1	Depletionsspannung	22
6.2	Abmessung des Sensors und Kenngrößen des Lasers	22
6.3	Mittlere Energiedeposition	23
	Literatur	24

1 Theorie

1.1 Ziel des Versuches

Es sollen die Eigenschaften und die Funktionsweisen eines Silizium-Halbleiterdetektors mit diversen Aufgabenteilen genauer untersucht werden.

1.2 Halbleiter

Zuerst wird kurz auf die wichtigen Eigenschaften des Halbleiters eingegangen, da dieser der wichtigste Bestandteil des Detektors ist.

Halbleiter sind Festkörper deren elektrische Leiteigenschaften zwischen elektrischen Leitern und Nichtleitern liegen. Die Leiteigenschaften eines Materials wird mit Hilfe des Bändermodells erklärt.

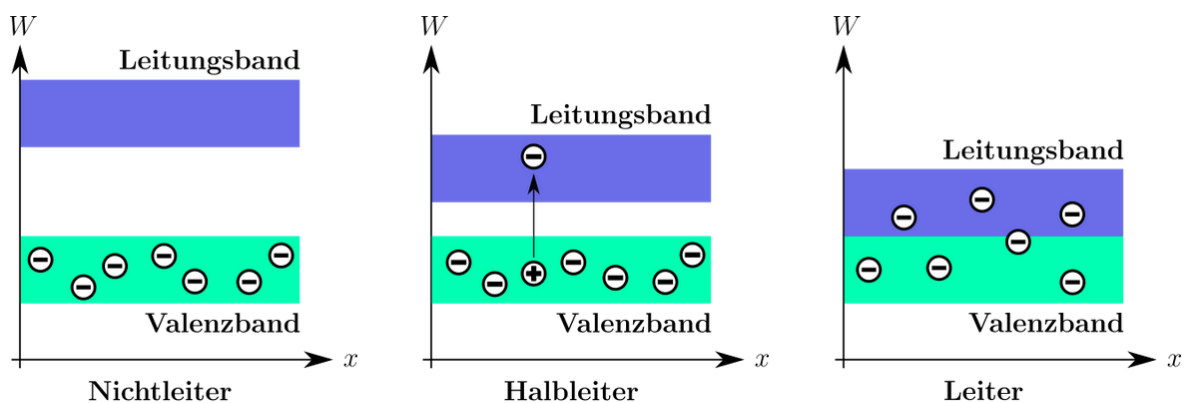


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Bändermodells

Das Bändermodell unterteilt die Leitfähigkeit eines Materials in 3 Gruppen: Leiter, Halbleiter und Isolatoren. Der Unterschied besteht in der Größe der Bandlücke zwischen Leitungsband und Valenzband. Ist die Bandlücke groß, so befinden sich keine Elektronen im Leitungsband und das Material ist ein Isolator. Überlappen die Bänder, so spricht man von einem Leiter. Bei Halbleitern liegt die Bandlücke im Bereich $0,1\text{eV} < E < 3\text{eV}$. Bei Temperaturen von über 0 K kommt es zu Anregung von Elektronen und der Halbleiter besitzt leitende Eigenschaften. Des Weiteren werden Halbleiter in Element,- Verbindungs,- und organische Halbleiter unterteilt. Innerhalb des Versuches wird jedoch nur Silizium, also ein Elementhalbleiter, verwendet. Um die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu erhöhen können Fremdatome eingebracht werden, diesen Vorgang nennt man Dotierung.

1.3 p- und n- Halbleiter

Der Elementhalbleiter Silizium gehört der vierten Hauptgruppe an und besitzt somit vier Valenzelektronen. Zur Dotierung von Silizium eignen sich Atome mit drei oder fünf Valenzelektronen. Dabei wird je nach Art der Dotierung zwischen p-Typ (Dotierung mit Fremdatomen der dritten Hauptgruppe) und n-Typ (fünfte Hauptgruppe) unterschieden.

Bei p-Typ Halbleitern wird ein Fremdatom der dritten Hauptgruppe eingefügt, typische Dotierungsverhältnisse sind 10^{4-7} Si-Atome zu einem Fremdatom. Durch die Dotierung fehlt ein Elektron in den kovalenten Bindungen, es entsteht ein bewegliches Loch. Das Loch kann durch Elektroneneinfang wieder gefüllt werden, deswegen werden solche Fremdatome auch als Akzeptoren bezeichnet.

Die n-Typ Halbleiter zeichnen sich durch eine Dotierung mit Elementen der fünften Hauptgruppe aus. Bei einer solchen Dotierung entsteht ein Elektronenüberschuss und pro dotiertes Fremdatom kommt es zu einem zusätzlichen Leitungselektron. Aufgrund der Abgabe des Leitungselektron an das Gitter spricht man hier von einem Donator.

1.4 Der pn- Übergang

Bei einem pn-Übergang werden ein n- und ein p- dotierter Halbleiter verbunden. Da die p-Seite einen Überschuss an Löchern und die n-dotierte Seite einen Überschuss an Leitungselektronen hat kommt es in der Mitte zur Rekombination. Es bildet sich ein Bereich in dem wenig Ladungsträger vorhanden sind. Dieser Bereich wird Sperrschicht oder Depletionszone genannt. Ihre Dicke $d(U)$ hängt von der dielektrischen Konstante des Halbleiters ab und kann mit Hilfe der vorangelegten Spannung U reguliert werden,

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon(U_D + U)}{eN_{\text{eff}}}}. \quad (1)$$

Des Weiteren hängt die Dicke von der Diffusionsspannung U_D im dynamischen Gleichgewicht, der Elementarladung e und von der Anzahl der effektiven Ladungsträgerdichte ab. Die effektive Ladungsträgerdichte ist ein Verhältnis der Dotierungskonzentrationen von Donatoren und Akzeptoren:

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A}$$

Um die später mit der Diode, welche aus einem pn-Übergang besteht, möglichst gute Messungen zu erzielen ist es notwendig die Depletionszone über den gesamten Kristall auszubreiten. Dazu wird eine zusätzliche Spannung U_{dep} angelegt. Diese ist im Allgemeinen jedoch so klein ($U \ll U_D$), dass der Ausdruck (1) sich vereinfachen lässt zu:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon U}{eN_{\text{eff}}}}. \quad (2)$$

Setzt man in diese Gleichung die Spannung U_{dep} ein, so lässt sie sich umformen zu

$$U_{\text{dep}} = \frac{q}{2\epsilon} N_{\text{eff}} D^2, \quad (3)$$

da bei Spannungen die $U > U_{\text{dep}}$ die Dicke der Depletionszone der Sensordicke entspricht. Für Spannungen von $U < U_{\text{dep}}$ gilt die Näherung:

$$d(U) = D \sqrt{\frac{U}{U_{\text{dep}}}} \quad (4)$$

1.5 Pedestals und Noise

Wie bei jeder elektronischen Messung haben wir Störsignale, die die Messung verschlechtern. Diese Störsignale lassen sich nicht verhindern und werden *Noise* genannt. In diesem Unterkapitel wird darauf eingegangen wie man das Rauschen minimieren kann. Dazu betrachten wir zuerst das Signal, welches zum Beispiel auf einem Streifen (i) eines Silizium-Detektors gemessen wird. Die gemessenen Counts für ein Signal k werden $ADC(i, k)$ Counts bezeichnet.

$$ADC(i, k) = P(i, k) + D(k) + \text{Signal}(i, k) \quad (5)$$

Betrachtet man nun den Mittelwert der ADC Counts eines Streifen ohne externes $\text{Signal}(i, k)$, so wird dieses als Pedestal bezeichnet. Es beschreibt also das Grundrauschen eines Streifen ohne Messungen von externen Signalen. Er ergibt sich als:

$$P(i) = \frac{1}{N} \sum_i^N ADC(i, k). \quad (6)$$

Wobei N die Anzahl der durchgeführten Messungen ist. Bei einer Messung eines Signals kommt es neben dem schon oben diskutierten *Noise* noch zu einer Weiteren Störquelle, dem *Common Mode Shift*. Bei einem Detektor mit 128 Streifen lässt sich der *Common Mode Shift* $D(k)$ wie folgt ermitteln:

$$D(k) = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (ADC(i, k) - P(i)). \quad (7)$$

Das *Noise* der einzelnen Streifen kann über den *RMS* (root mean square) der ADC Counts nach Abzug der Pedestals und des Common Mode Shifts bestimmt werden.

$$\text{Noise} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (ADC(i, k) - P(i) - D(k))^2}. \quad (8)$$

2 Fehlerrechnung

Dieses Kapitel listet kurz und bündig die benötigten und aus den Methoden der Statistik bekannten Formeln für die Fehlerrechnung auf. Die Schätzung der Standardabweichung ist

$$\Delta X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} . \quad (9)$$

Der Mittelwert ist

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (10)$$

Der Fehler des Mittelwertes ist

$$\Delta \bar{X} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} . \quad (11)$$

Für fehlerbehaftete Größen, die auch in folgenden Formeln verwendet werden, muss die Fehlerfortpflanzung nach Gauß berücksichtigt werden.

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot (\Delta X_i)^2} \quad (12)$$

Bei der linearen Regressionsrechnung sind die Parameter m und b der Ausgleichsgerade $y = mx + b$ wie folgt gegeben:

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} . \quad (13)$$

Dabei sind x_i und y_i linear abhängige Messgrößen. Der Fehler dieser Parameter wiederum errechnet sich aus

$$\sigma_m^2 = \frac{\sigma^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad \sigma_b^2 = \frac{\sigma^2 \bar{x}^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} . \quad (14)$$

Relative Abweichungen einer Messgröße x gegenüber Literaturwerten x_{Lit} werden nach der Vorschrift

$$R_x = \frac{x - x_{\text{Lit}}}{x_{\text{Lit}}} \quad (15)$$

berechnet.

3 Versuchsaufbau

Für die Messung wird ein Alibava EASy Detektorsystem verwendet. Es besteht aus einer Detektoreinheit, einer Kontrolleinheit und einem Computer.

3.1 Die Detektoreinheit

Als Detektoreinheit wird ein Halbleitersensor mit entsprechender Ausleseelektronik verwendet. Der Siliziumsensor ist in 128 Streifen unterteilt, jeder ist über ein Wirebond mit dem Auslesechip (BEETLE) verbunden. Der BEETLE Chip dient zur Verstärkung des eingehenden Ladungssignals. Es werden nur Signale an den Computer weitergeleitet, wenn der Trigger und die Kontrolleinheit in Koinzidenz sind.

3.2 Der Halbleitersensor

Eine schematische Darstellung des verwendeten Sensors ist in Abbildung 2 dargestellt.

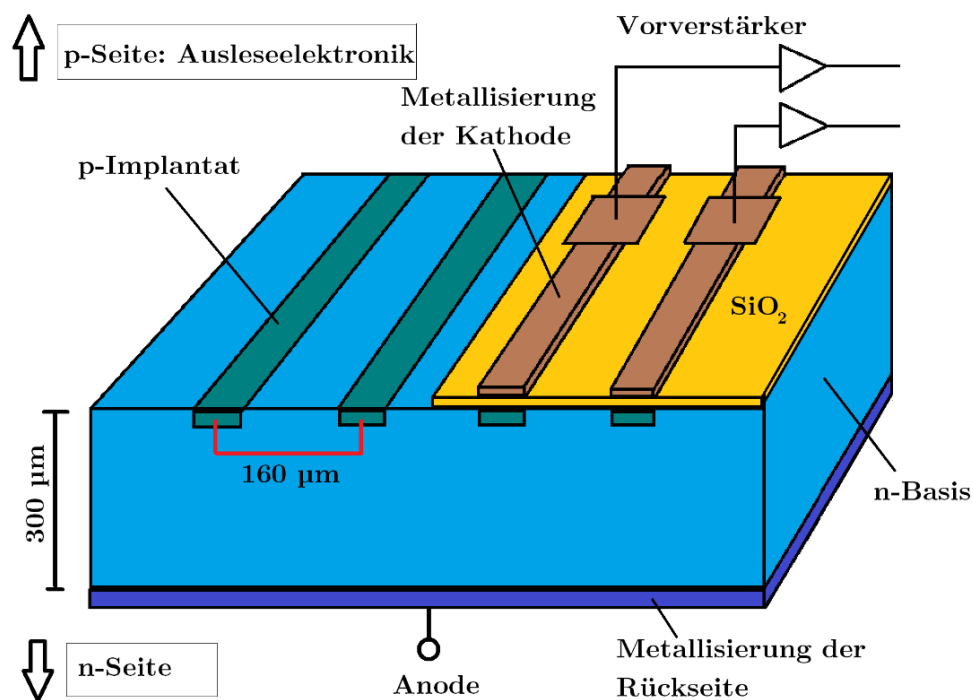


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Bändermodells

Der pn-Übergang wird hier durch eine n-dotierte Bodenplatte mit einzelnen p-Implantaten realisiert. Die n-dotierte Siliziumschicht hat eine Dicke von 300 μm, die p-Implantate sind von einander isoliert um eine genaue Ortsauflösung zu ermöglichen. Des Weiteren sind die Implantate kapazitiv mit einer Elektrode aus Aluminium gekoppelt, was über ein ohmschen Kontakt ausgelesen werden kann.

Der Sensor muss für die Messung voll depletiert sein, da sonst Elektron-Loch-Paare außerhalb der Depletionszone rekombinieren. Die Effizienz der Ladungssammlung CCE , steigt mit der Dicke

der Depletionszone, bis die Depletionsspannung erreicht ist. Im Versuch soll die CCE mit Hilfe eines Laser untersucht werden. Hierfür ist die Eindringtiefe des Laser in Silizium a relevant. Der Zusammenhang ist gegeben durch:

$$CCE(U) = \frac{1 - \exp(\frac{-d_c(U)}{a})}{1 - \exp(\frac{-D}{a})} \quad (16)$$

Die Eindringtiefe eines Laser der Wellenlänge von 960 nm hat eine Eindringtiefe von $\approx 74 \mu\text{m}$, wobei dieser Wert vom Material und der Wellenlänge abhängt.

4 Durchführung

- Es wird eine Strom-Spannungs-Kennlinie in 10 V Schritten aufgenommen. Mittels dieser Werte kann die Depletionsspannung abgeschätzt werden, welche für die weiteren Aufgabenteile von Bedeutung ist.
- Für eine Untersuchung des Pedestals und Noise wird ein *Pedestal Run* durchgeführt. Mit den aufgenommenen Werten werden Noise, Pedestals und Common Mode graphisch dargestellt.
- Es wird eine Kalibrationmessung durchgeführt um die ADC Counts in deponierte Energie umzurechnen. Dazu wird eine Kalibrationsmessung in fünf verschiedenen Channels durchgeführt und miteinander vermessen.
- Zur Vermessung des Streifensensors wird ein Laser verwendet. Er wird mit Hilfe einer Mikrometer-Schraube in $10\mu m$ Schritten über den Sensor gefahren und es wird jeweils die Signale der einzelnen Channel gemessen, um daraus die Breite eines Sensorstreifens zu bestimmen.
- Eine Bestimmung der Charge Collection Efficiency wird mit Hilfe des Lasers und unter Verwendung einer β^- -Quelle durchgeführt.
- Zuletzt wird eine Messung von 1000000 Events durchgeführt und das Energiespektrum des Scans untersucht.

5 Auswertung

Sämtliche im Folgenden durchgeführten Ausgleichsrechnungen werden mit der *curve fit* Funktion aus dem für *Python* geschriebenen Package *NumPy*[1] durchgeführt. Fehlerrechnungen werden mit dem für *Python* geschriebenen Package *Uncertainties*[2] ausgeführt.

Die Auswertung der verschiedenen Messungen folgt in der Reihenfolge wie sie auch aufgenommen wurden (siehe [3]). Einige der Datensätze wurde von der System-Software *EASy* in dem Format *.h5* gespeichert. Mit einem vom Praktikumsbetreuer zur Verfügung gestellten Python-Skript, wurde eine Vorauswertung durchgeführt und die für die Auswertung relevanten Daten in dem Format *.txt* gespeichert.

5.1 Strom-Spannungs-Kennlinie

In Abbildung 3 ist die IV-Kurve des Silizium-Streifen-Sensors dargestellt. Bei kleinen Spannung ist ein Anstieg des Leckstroms zu beobachten, gefolgt von einem Plateau. Der Übergang in dieses Plateau ist bei $V = 70\text{ V}$ erreicht. Aus diesem Grund wird dieser Wert als Abschätzung für die Depletionsspannung U_{dep} verwendet. Für alle folgenden Messungen wird die Spannung $U = 90\text{ V}$ verwendet, da somit sichergestellt ist, dass die Sensor voll depletiert ist.

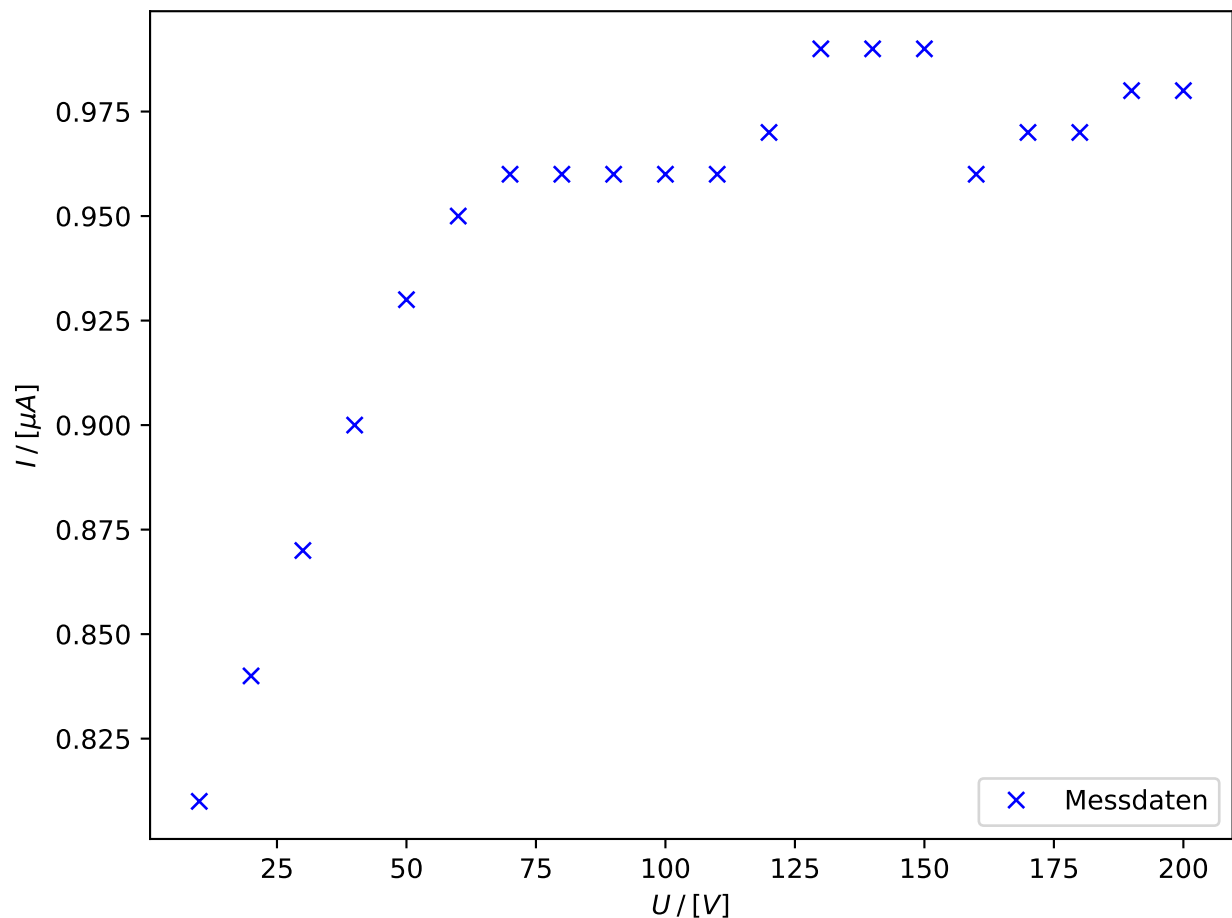


Abbildung 3: Messung des Leckstroms in Abhängigkeit der Spannung.

5.2 Pedestal und Noise

Für eine Übersicht sind in Abbildung 4 die ADC-Counts in Abhängigkeit der Events und der Channel dargestellt. In dieser Darstellung sind die ADC-Counts ein Maß für den Offset ohne Signal.

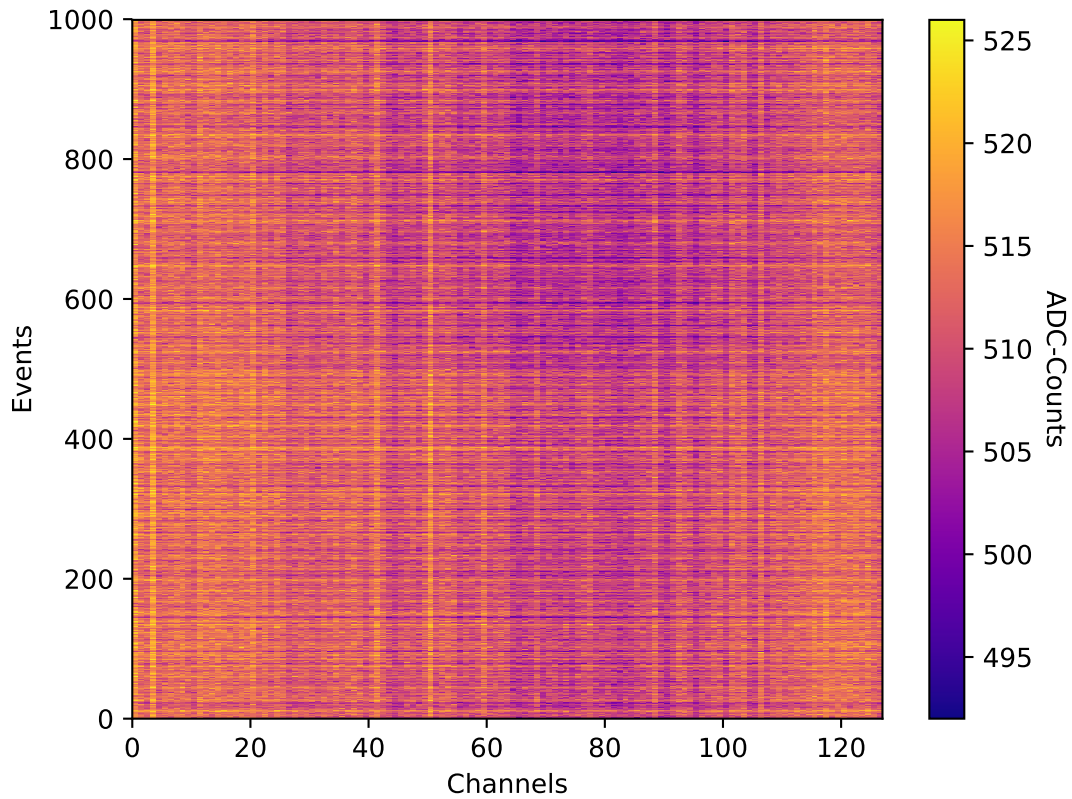


Abbildung 4: ADC-Counts in Abhängigkeit der Events und der Channel.

Es zeigt sich, dass die Channel im Intervall $[65,90]$ ein geringeren Offset als an den Rändern des Sensors aufweisen. Aus diesem Datensatz wird nach Gleichung (6) das Pedestal und nach Gleichung (7) der Common-Mode-Shift bestimmt. Da nach [3] der Common-Mode-Shift um Null Gaußverteilt ist, werden die Messwerte in Bins der Länge 0.25 unterteilt. In Abbildung 5 sind die Pedestals und in Abbildung 6 der Common-Mode-Shift dargestellt.

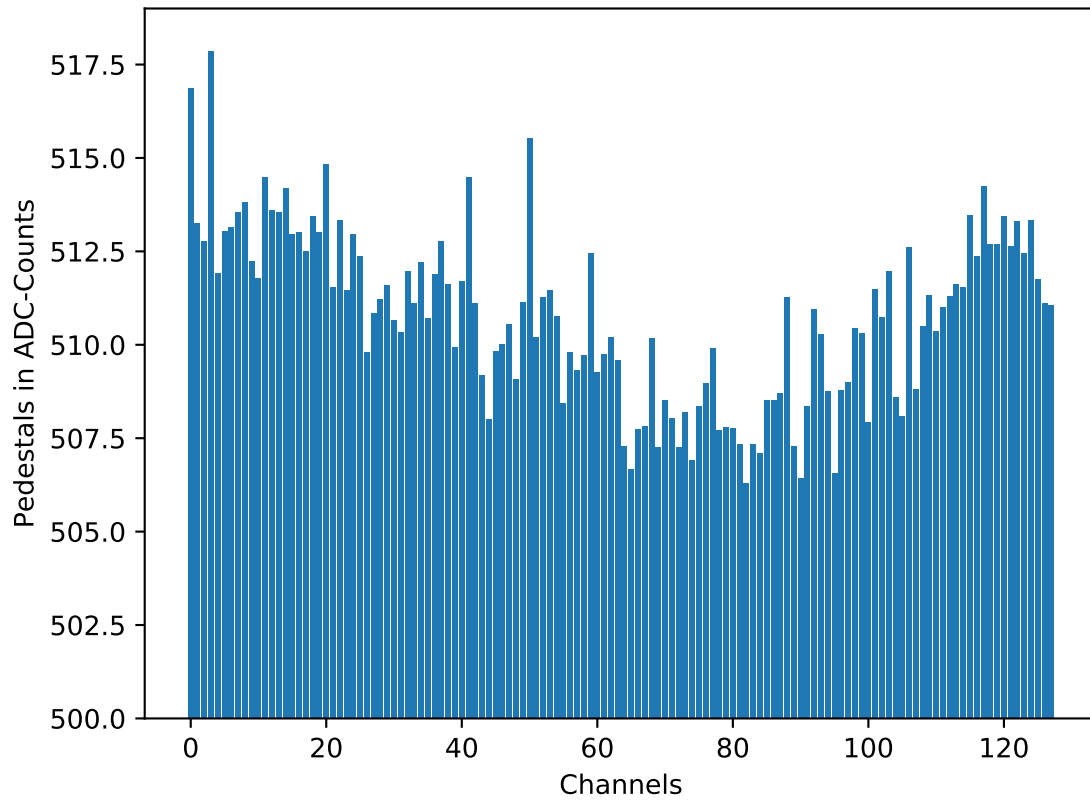


Abbildung 5: Pedestals.

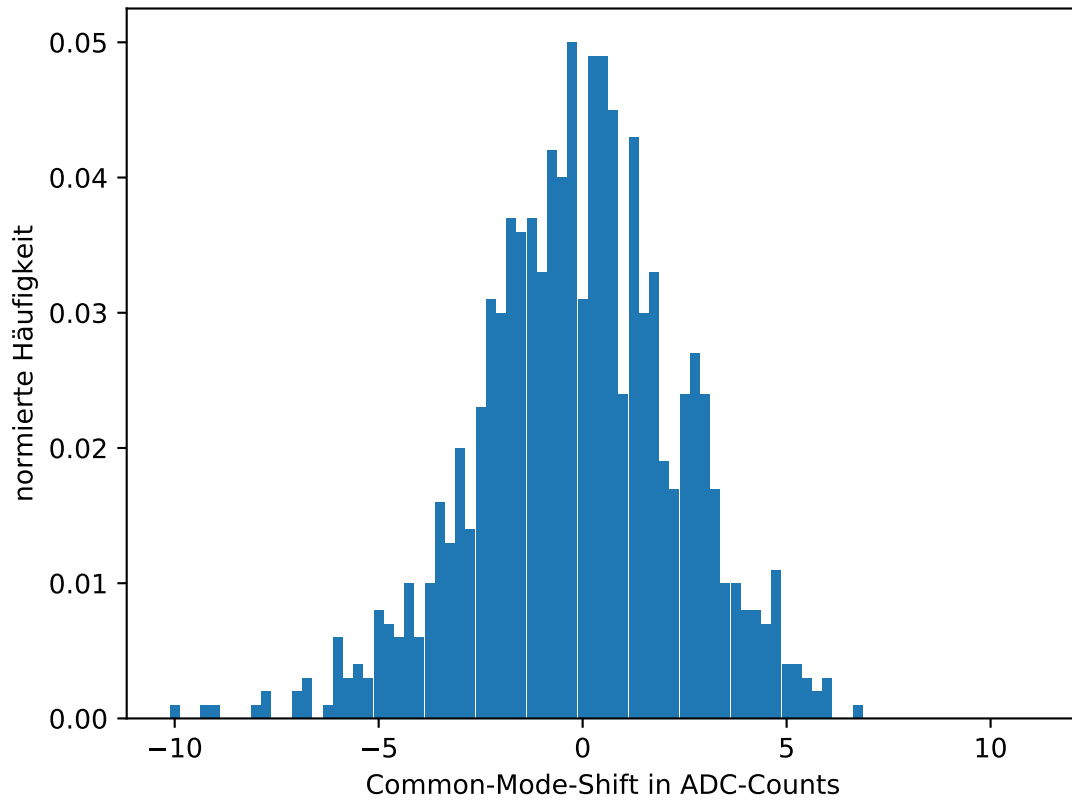


Abbildung 6: Common-Mode-Shift.

Aus den zuvor beschriebenen Größen wird unter Verwendung von Gleichung (8) die Noise bestimmt, in Abbildung 7 ist diese dargestellt.

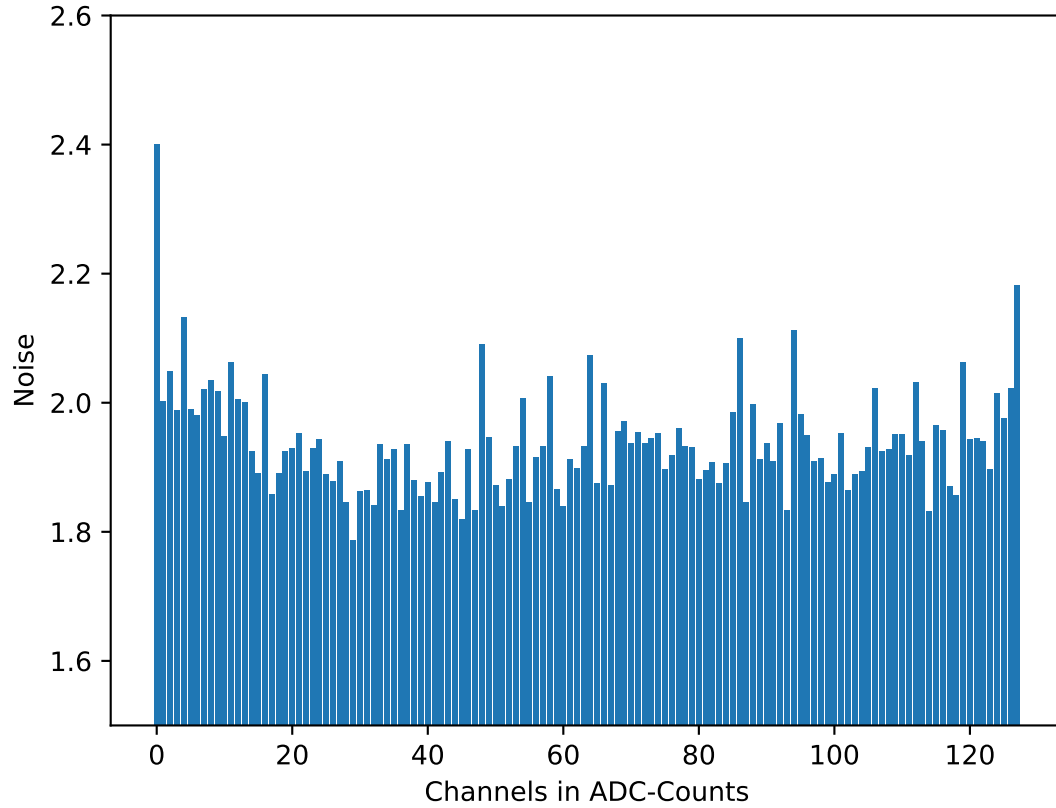


Abbildung 7: Noise.

5.3 Kalibrationsmessung

Für fünf verschiedene Channel ist eine Kalibrationsmessung mit einem definierten Signal vorgenommen worden. In Abbildung 8 sind die Messwerte für alle fünf Channel bei 90 V und für Channel 10 bei 0 V aufgetragen. Zusätzlich ist in Abbildung 8b eine Detailansicht dargestellt.

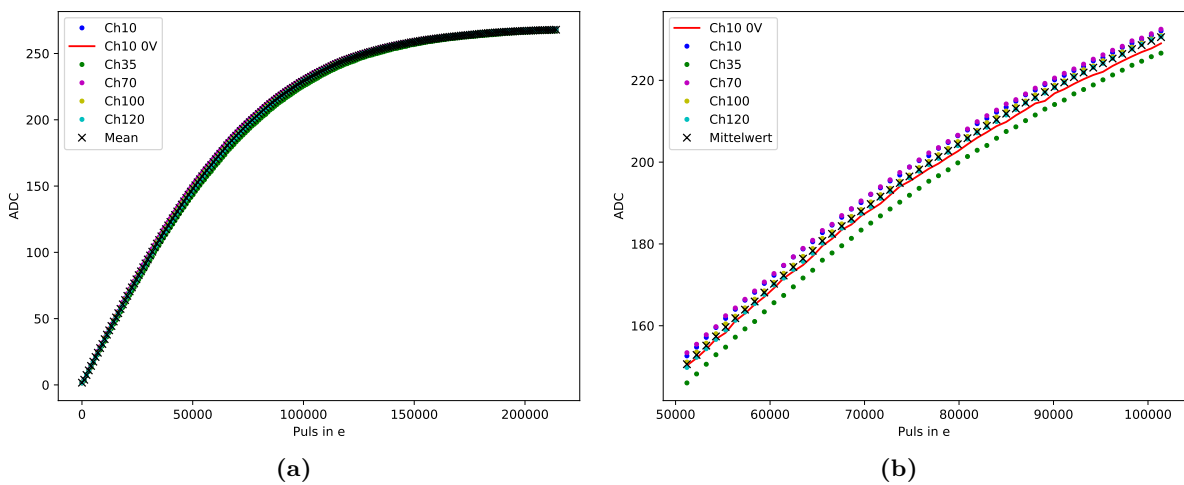


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen dem Signal (ADC) und den Pulsen.

Um in späteren Kapiteln die Signale in deponierte Ladung umrechnen zu können wird mit Hilfe eines Polynoms vierter Ordnung ein mathematischer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen gesucht. Die verwendende Fitfunktion lautet:

$$Puls(ADC) = a \cdot ADC^4 + b \cdot ADC^3 + c \cdot ADC^2 + d \cdot ADC + e \quad (17)$$

Unter Verwendung dieser Funktion fällt in Abbildung 9 auf, dass für den fast linearen Anstieg bei kleinen Signalen die Koeffizienten der Terme höherer Ordnung relativ klein sein müssen, jedoch um den annähernd exponentiellen Anstieg beschreiben zu können, werden große Koeffizienten vor den höheren Ordnung benötigt. Da dies einen Widerspruch dargestellt, wird die Ausgleichsfunktion nur mit den Daten im Intervall $[0,250]$ bestimmt. Diese Begrenzung ist auch physikalisch vertretbar, da ab dieser Grenze die Anzahl der Einträge zu vernachlässigen ist. In Abbildung 9 wird diese Grenze graphisch deutlich gemacht, ab der die Ausgleichsrechnung eine große Abweichung zu dem Verlauf der Messwerte aufzeigt.

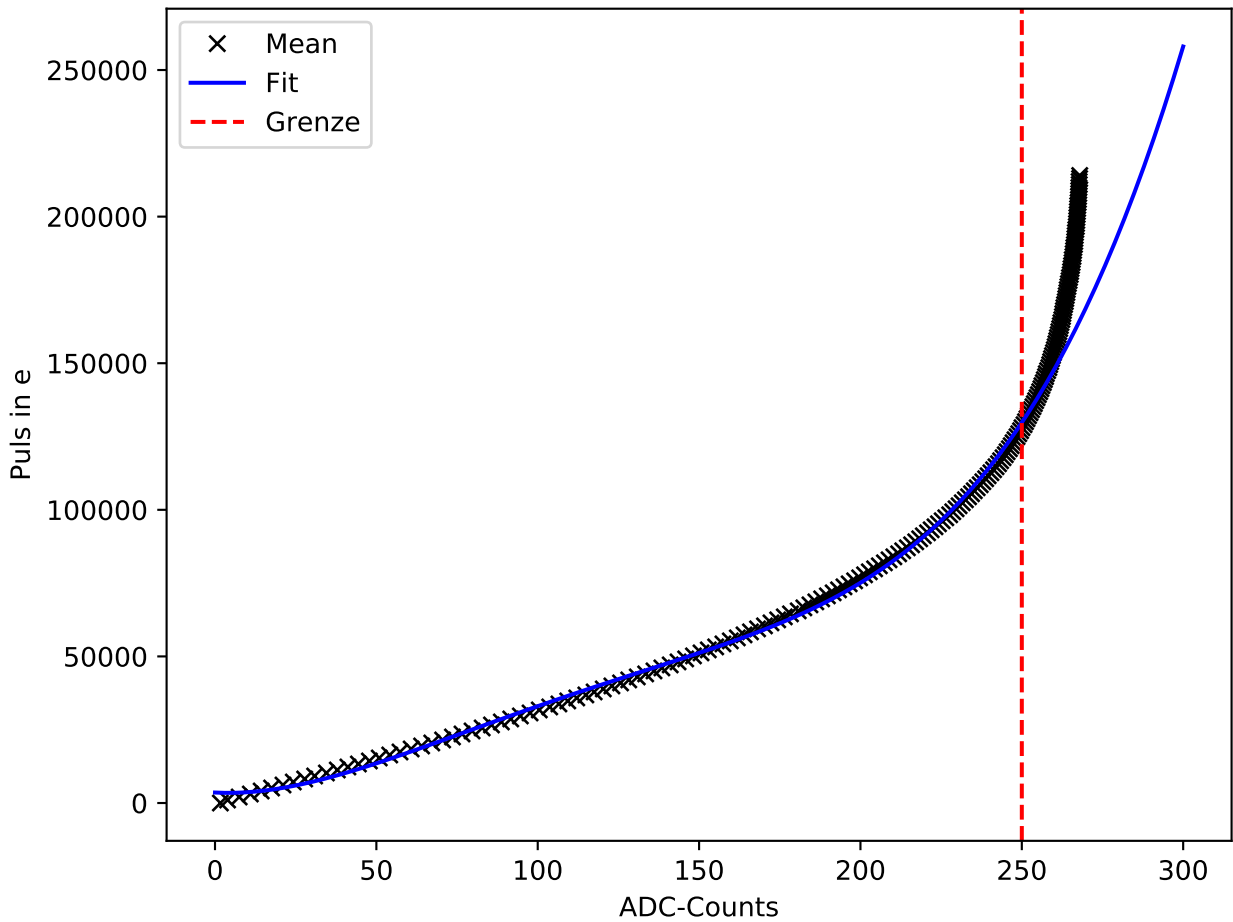


Abbildung 9: Ausgleichsrechnung mit den Messdaten im Intervall $[0,250]$.

Die Fitparameter lauten:

$$a = (0,000\,119 \pm 0,000\,007) \text{ e} \quad (18)$$

$$b = (-0,050 \pm 0,004) \text{ e} \quad (19)$$

$$c = (7,4 \pm 0,7) \text{ e} \quad (20)$$

$$d = (-58 \pm 48) \text{ e} \quad (21)$$

$$e = (3574 \pm 975) \text{ e} \quad (22)$$

5.4 Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers

Wie in Kapitel 4 beschrieben, werden der Sensor mittels Laser vermessen. Die Messdaten sind in Abbildung 10a für den kompletten Sensor und in 10b für die betroffenen Streifen dargestellt.

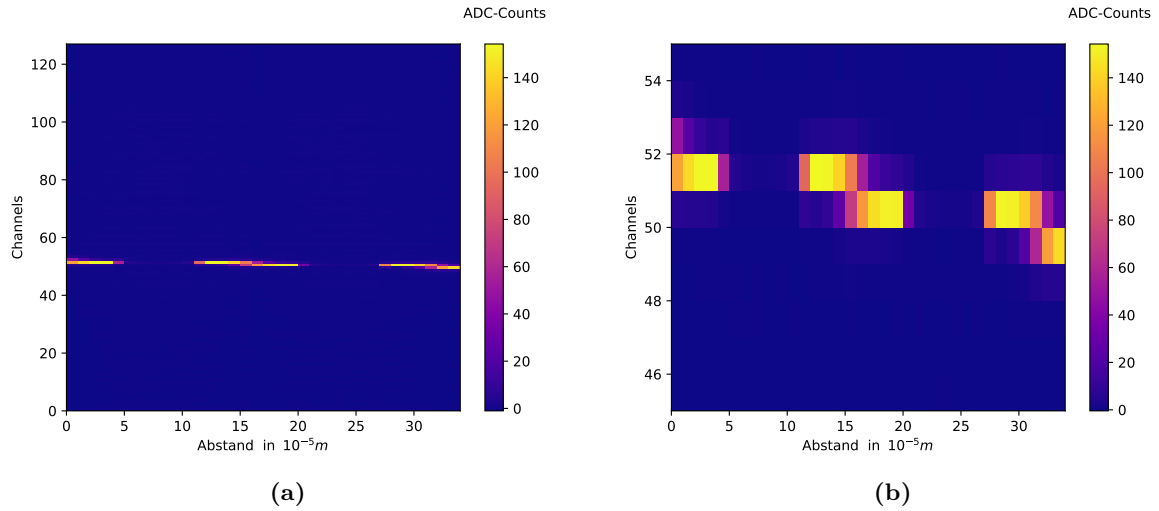


Abbildung 10: Signal (ADC) in Abhängigkeit des Position auf dem Sensor und des Channels.

Für die Abschätzung der Streifenbreite, des Abstands der Streifen und der Größe des Laserspots, ist in Abbildung 11 für die Channel 50, 51 und 52 das Signal (ADC) gegen den Abstand aufgetragen.

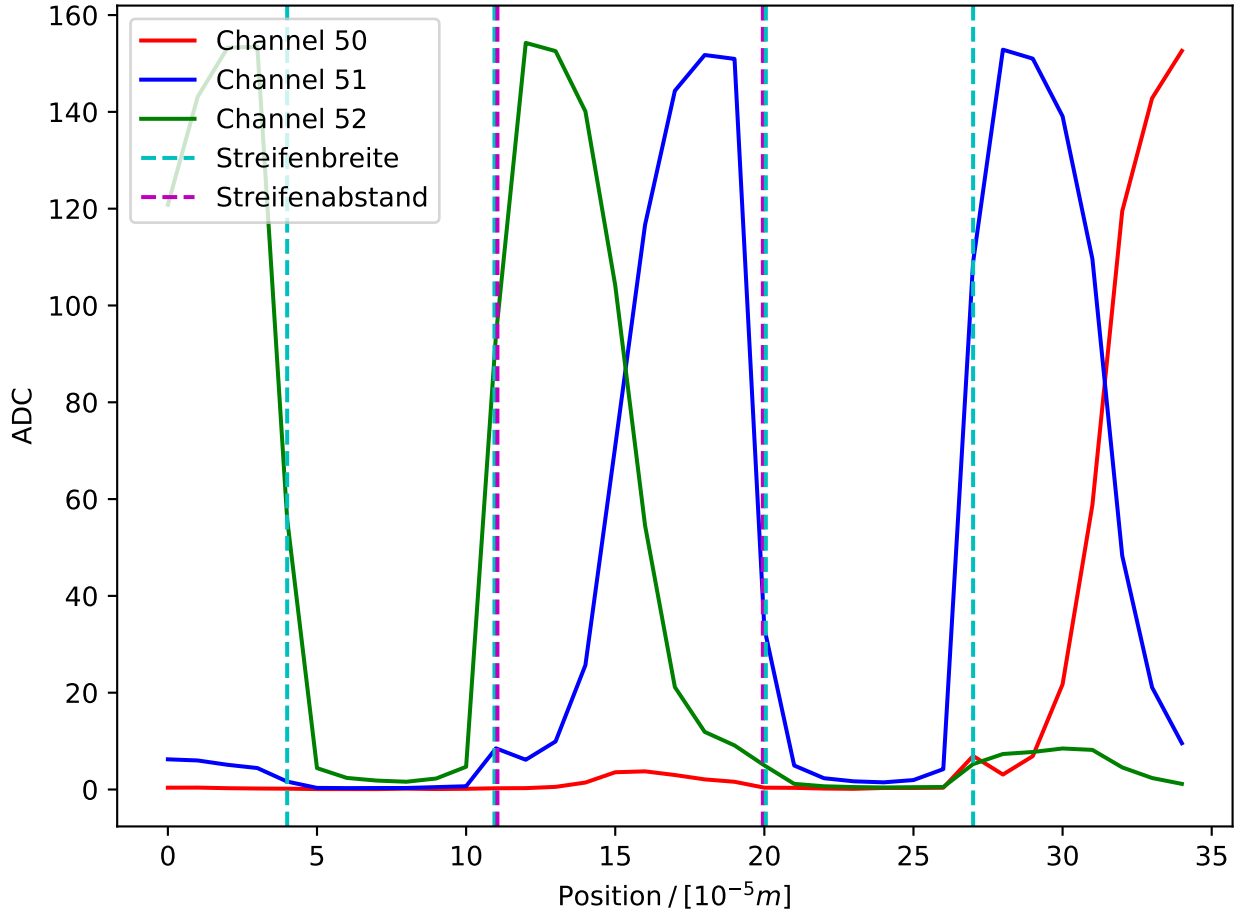


Abbildung 11: Darstellung des Signals der Channel 50, 51 und 52.

Der plötzliche Einbruch des Signals lässt darauf schließen, dass der Laser sich über einem Streifen befindet, da das Aluminium den Strahl komplett reflektiert. Maximal wird das Signal, wenn der Laserspot sich exakt neben dem Streifen und der Hälfte des Abstand der Streifen untereinander befindet (siehe Abbildung 11, z.B. bei Abstand $120\text{ }\mu\text{m}$). Genau zwischen den Streifen wird das durch den Laser verursachte Signal zwischen den beiden nächsten Streifen aufgeteilt (siehe Abbildung 11, z.B. bei Abstand $150\text{ }\mu\text{m}$). Die Spotgröße des Lasers kann abgeschätzt werden, indem der Abstand zwischen den Positionen vermessen wird, bei denen das Signal wieder beginnt anzusteigen und bei dem es maximal ist. Mit Hilfe von Abbildung 11 können die Größen nun wie folgt abgeschätzt werden:

$$\text{Breite} = (70 \pm 10)\text{ }\mu\text{m} \quad (23)$$

$$\text{Abstand} = (90 \pm 10)\text{ }\mu\text{m} \quad (24)$$

$$\text{Spotdurchmesser} = (20 \pm 10)\text{ }\mu\text{m} \quad (25)$$

Aufgrund einer Schrittweite von $10\text{ }\mu\text{m}$ ist dieser Wert als abgeschätzte Unsicherheit angegeben.

5.5 Charge Collection Efficiency des Lasers

In Abbildung 12 ist die Effizienz des Sensors gegen die Spannung aufgetragen. Da für diese Messung der Laserspot neben Channel 50 platziert worden ist, ist das Signal in diesem Channel maximal und wir deshalb zur Bestimmung der Charge Collection Efficiency (CCE) verwendet.

Ebenfalls wie die IV-Kurve aus Kapitel 5.1, geht die CCE ab der Depletionsspannung in ein Plateau über. Da ab dieser Spannung sich die Größe der Depletionszone nicht mehr verändert, kann auch die Effizienz nicht mehr steigen. Mit Hilfe von Gleichung 16 und unter Berücksichtigung von Gleichung 4 ergibt sich die in Abbildung 12 eingezeichnete Ausgleichsrechnung.

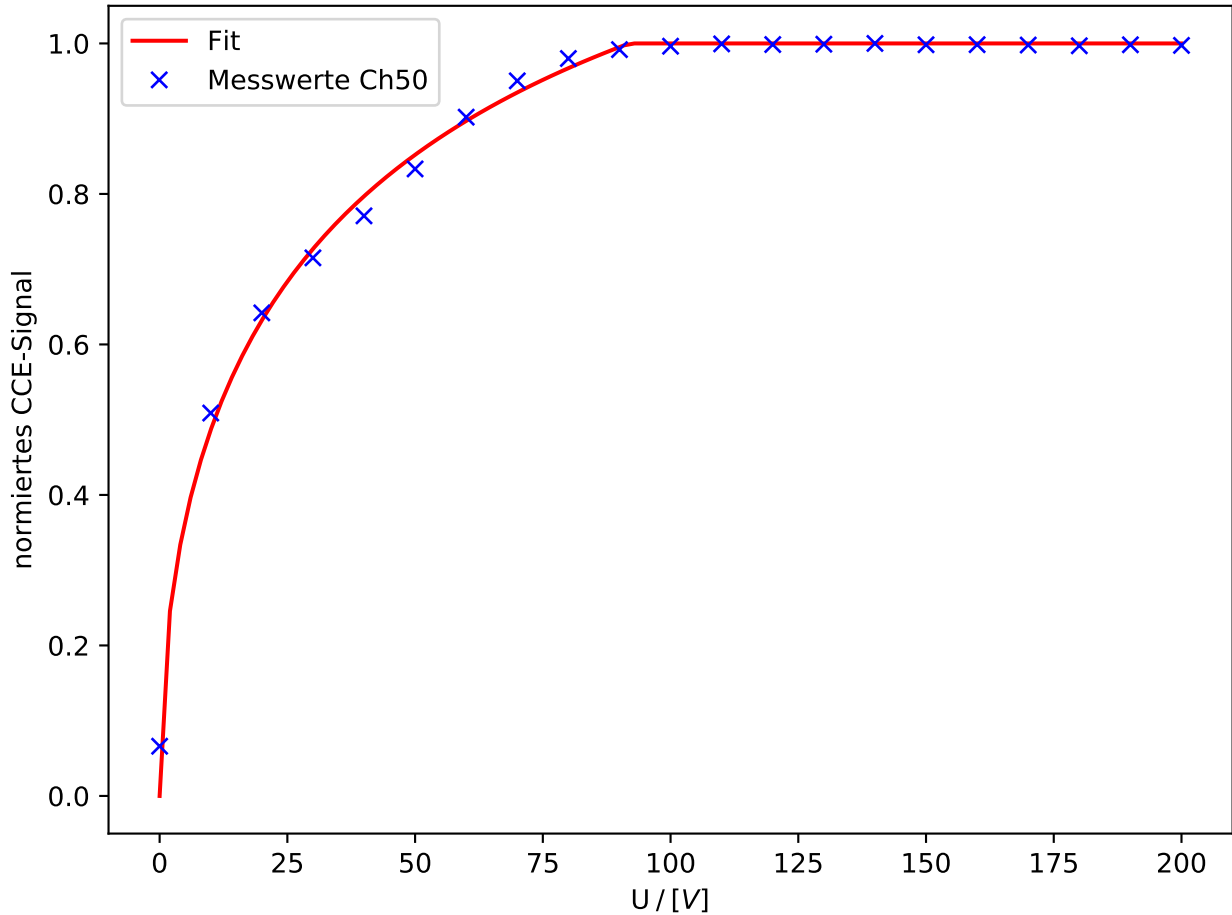


Abbildung 12: Charge Collection Efficiency für Channel 50 in Abhängigkeit der Spannung.

Die Fitparameter lauten:

$$U_{dep} = (92 \pm 5) \text{ V} \quad (26)$$

$$a = (221 \pm 24) \mu\text{m} \quad (27)$$

5.6 Charge Collection Efficiency der Sr-Quelle

Für eine analoge Darstellung zu Abbildung 12 ist in Abbildung 13 die normierte mittlere CCE der β -Quelle gegen die Spannung aufgetragen. Auch hier ist wieder bei höheren Spannung die Ausbildung eines Plateaus zu beobachten.

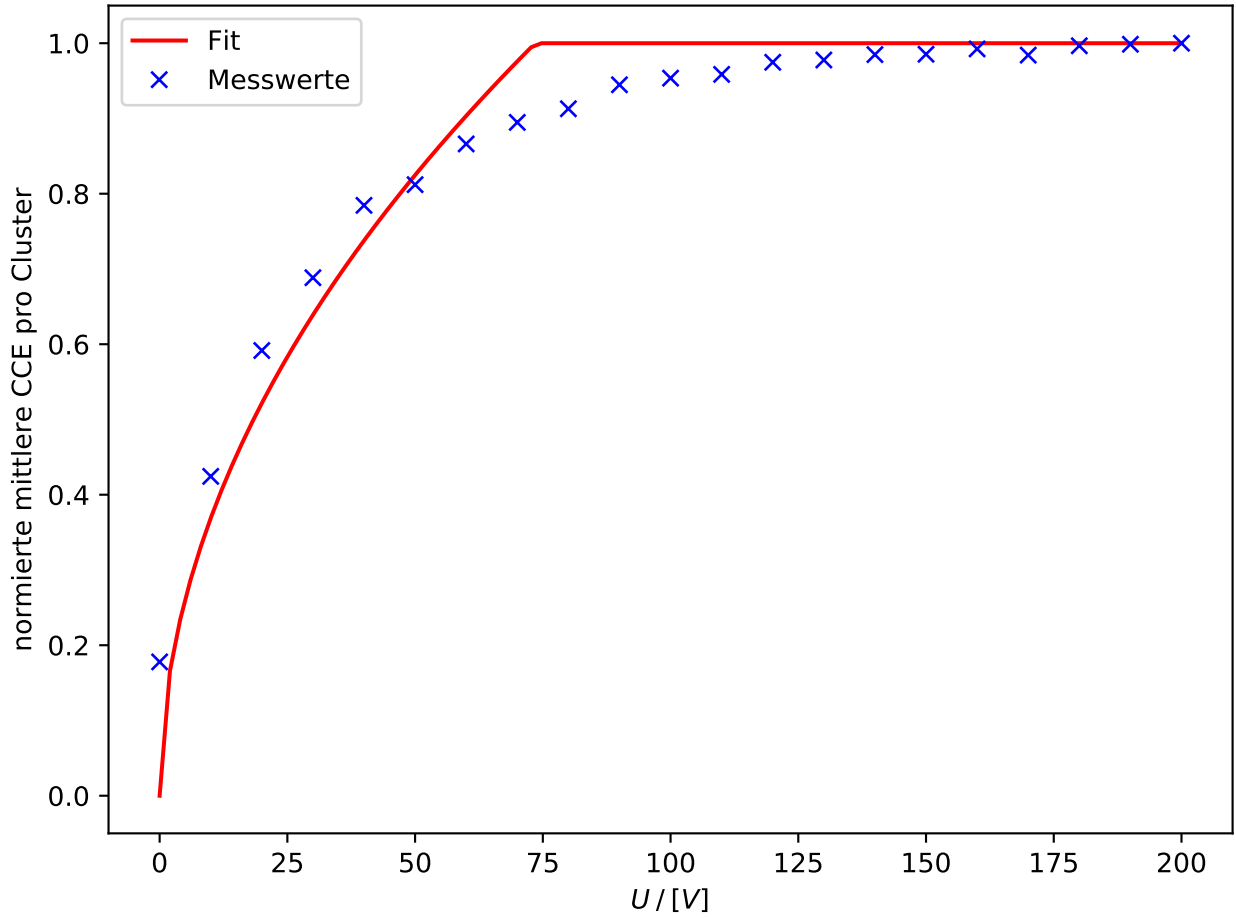


Abbildung 13: Charge Collection Efficiency der β -Quelle in Abhängigkeit der Spannung.

Die Ausgleichsrechnung mit der Funktion

$$CCE_{Quelle} = \frac{d_c(U)}{D}, \quad (28)$$

wobei D die Dicke des Sensors beschreibt, ergibt eine Depletionsspannung von $U_{dep} = (74 \pm 4)$ V.

5.7 Großer Quellenscan

Für den großen Quellenscan, bei dem 1000000 Events abgewartet werden, wird in Abbildung 14a die normierte Häufigkeit der Anzahl der Channel pro Cluster und in Abbildung 14b die normierte Häufigkeit der Anzahl der Cluster pro Event dargestellt.

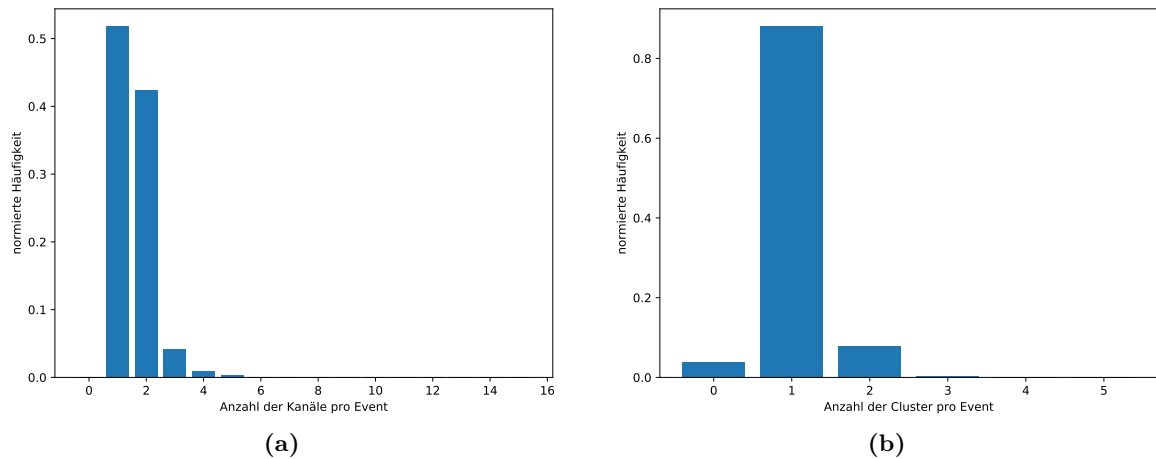


Abbildung 14: Normierte Häufigkeit der Channel bzw. Cluster pro Event. Es sind nur die Channel bzw. Cluster dargestellt, die einen Eintrag ungleich Null aufweisen.

Aus den Abbildung folgt, dass im wesentlichen nur ein bis zwei Streifen, also Channel, ein einzelnes Event registrieren. Des weiteren bildet sich in den meisten Fällen nur ein Cluster pro Event. In Abbildung 15 ist die normierte Trefferrate eines Channels über den Zeitraum von 1Mio. Events dargestellt.

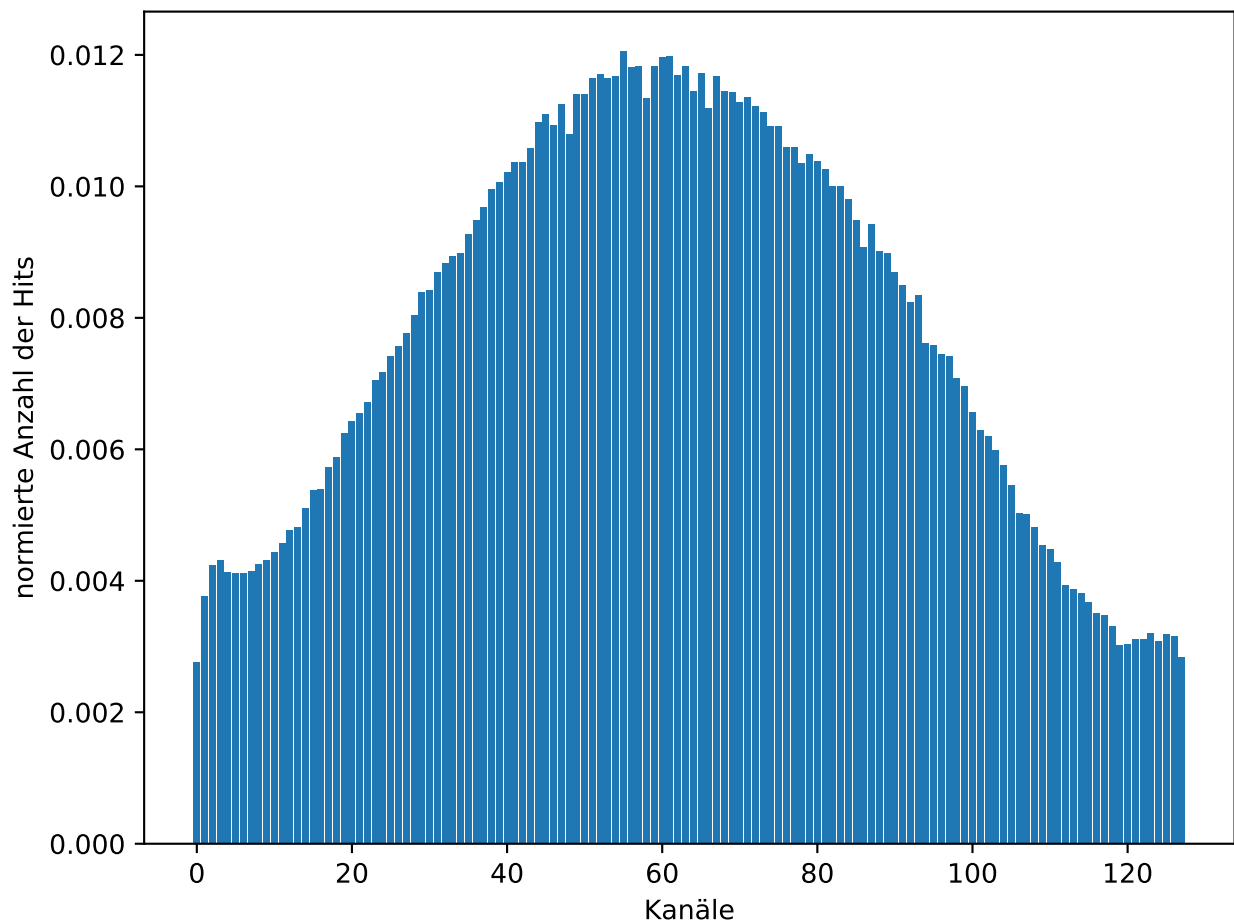


Abbildung 15: Trefferrate pro Channel.

Es ist zu erkennen, dass die Probe mittig über dem Sensor positioniert worden ist, da sich das Maximum bei Channel 65 ausbildet. Die Streifen am Rand des Sensor weisen jedoch auf kein gaußartiges Verhalten hin. Die Anzahl der Hits steigt zum Rand hin wieder und könnten eventuell auf lange Sicht eine Plateau bilden. Da die Differenz zwischen Maximum und Hit an den Rändern sich nur um einen Faktor von etwa 0.25 unterscheidet, ist nicht davon auszugehen, dass die Hits am Rand vom Noise überlagert sind.

In Abbildung 16 ist das Energiespektrum der Quellenmessung dargestellt.

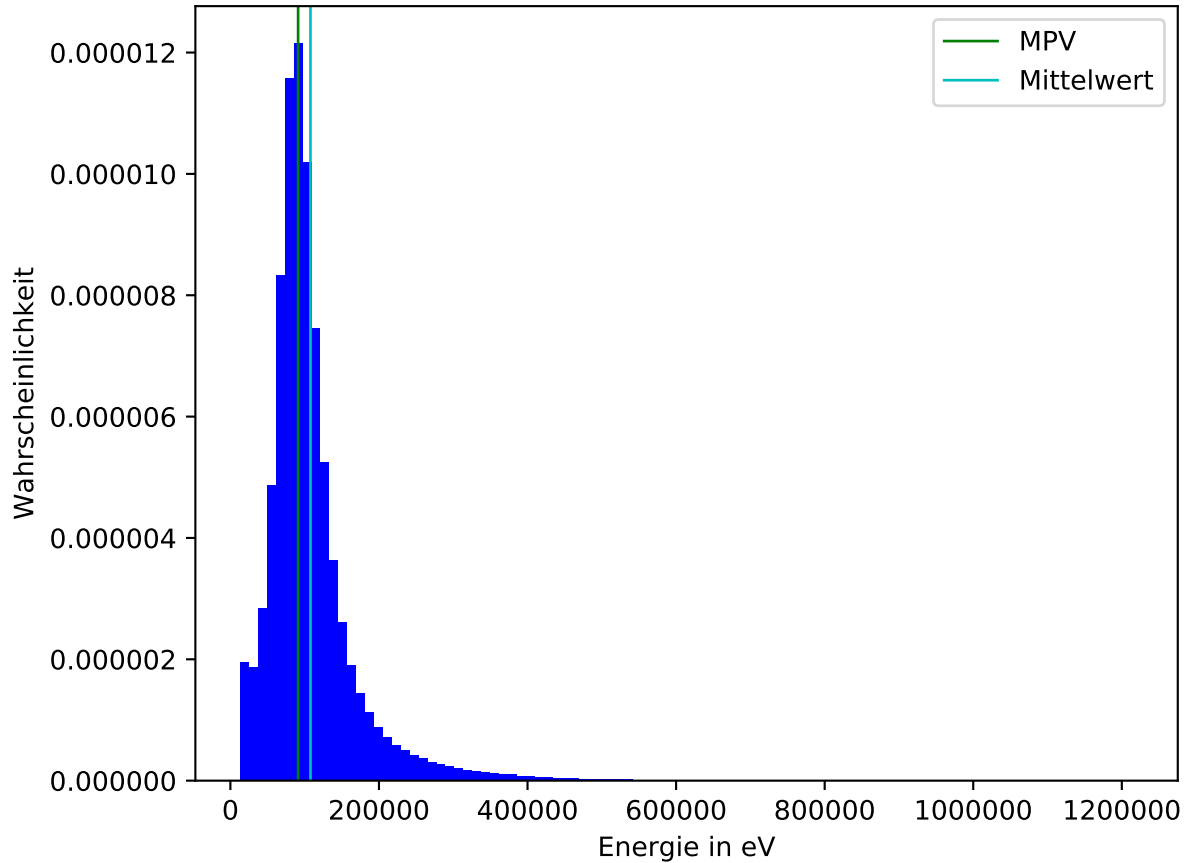


Abbildung 16: Energiespektrum unterteilt in 100 Bins.

Hierfür werden die ACD-Counts mit der Ausgleichsfunktion in Kapitel 6.2 in Pulse umgerechnet. Danach erfolgt die schlussendliche Umrechnung in das Energiespektrum, mit dem Wissen, dass die Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares in Silizium eine Energie von 3,6 eV benötigt. Eingezeichnet sind in der Abbildung die mittlere Energie ($\bar{E} = (108 \pm 62) \text{ keV}$) und die wahrscheinlichste Energie ($MPV = 91,1 \text{ keV}$).

6 Diskussion

6.1 Depletionsspannung

In diesem Versuch wurde auf drei verschiedene Weisen die Depletionsspannung U_{dep} bestimmt. Zuerst konnte durch die IV-Kurve eine grobe Abschätzung gewonnen werden und anschließend aussagekräftigere Ergebnisse durch die CCE des Lasers und der β -Quelle gemessen werden. Die Ergebnisse werden im Folgenden verglichen.

$$U_{dep,IV-Kurve} \sim 70 \text{ V} \quad (29)$$

$$U_{dep,Laser} = (92 \pm 5) \text{ V} \quad (30)$$

$$U_{dep,\beta-Quelle} = (74 \pm 4) \text{ V} \quad (31)$$

Obwohl die Ausgleichsrechnung in Abbildung 12 und 13 sehr gut die Messerergebnisse widerspiegeln, besteht trotzdem ein großer Unterschied in den Ergebnissen untereinander. Für den Sensor liegt nach [3] die Depletionsspannung im Bereich von 60 – 80 V. Da mit der IV-Kurve nur eine Abschätzung getroffen wurde, kann somit keine exakte Aussage über die Depletionsspannung getätigt werden. Es ist anzunehmen, dass sich die tatsächliche Depletionsspannung zwischen den beiden Ergebnissen befindet, die mit Hilfe des Lasers und der Quelle ermittelt wurden. Für eine genaue Messung und ein verlässliches Ergebnis sollte eine CV-Messung durchgeführt werden.

6.2 Abmessung des Sensors und Kenngrößen des Lasers

Mit Hilfe von Abbildung 11 ist die Streifenbreite, der Streifenabstand und die Spotgröße des Lasers abgeschätzt worden. Diese Abschätzung ergab:

$$\text{Breite} = 70 \text{ }\mu\text{m} \quad (32)$$

$$\text{Abstand} = 90 \text{ }\mu\text{m} \quad (33)$$

$$\text{Spotdurchmesser} = 20 \text{ }\mu\text{m} \quad (34)$$

Nach [3] weist der Sensor einen Pitch von 160 μm auf. Um einen Vergleich ziehen zu können, wird der Pitch aus den berechneten Werten ermittelt. Da der Pitch den Abstand zwischen zwei Streifen beschreibt, ausgehend von der Mitte jedes Streifens, ist der Pitch durch Addition der Breite und dem Abstand zu bestimmen. Der berechnete Pitch stimmt mit dem aus [3] überein, wobei zu betonen ist, dass Anhand von Abbildung 11 die Breite und der Abstand nur abgeschätzt werden können. Genauere Ergebnisse können durch ein kleinschrittigeres Vorgehen erreicht werden.

Die Spotgröße des Lasers ist nach [3] mit 20 μm angegeben, wodurch auch hier der abgeschätzte Wert übereinstimmt.

In Kapitel 4 ist die Eindringtiefe mit Hilfe der CCE bestimmt worden. Die Literatur([3]) gibt an, dass bei einer Wellenlänge von $\lambda = 920 \text{ nm}$ bzw. $\lambda = 1073 \text{ nm}$ eine Eindringtiefe von $a = 74 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. $a = 380 \text{ }\mu\text{m}$ besteht. Der genaue Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Eindringtiefe ist nicht bekannt, da sich der gemessene Wert ($a = (221 \pm 24) \text{ }\mu\text{m}$) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 960 \text{ nm}$ des verwendeten Lasers, jedoch zwischen den beiden angegebenen Parametern befindet, wird er als plausibel angenommen.

6.3 Mittlere Energiedeposition

Für einen theoretischen Vergleichswert, wird der in [3] berechnete mittlere Energieverlust pro Strecke, der mit Hilfe der Bethe-Blochgleichung berechnet worden ist, verwendet. Multipliziert mit der Dicke des Sensors, errechnet sich aus dem Energieverlust pro Strecke, die mittlere Energiedeposition im Sensor von $\bar{E}_{theo} = 116,4 \text{ keV}$. Der gemessene Wert von $\bar{E}_{exp} = (108 \pm 62) \text{ keV}$ ergibt somit eine Abweichung vom Mittelwert von 7,39 %. Es ist plausibel, dass der experimentell bestimmte Wert unterhalb des theoretischen Werts liegt, da der Signal-to-Noise-cut zu Signal aus den Cluster entfernt und somit eine verminderte Datengrundlage vorliegt.

Literatur

- [1] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [2] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [3] *TU Dortmund - Fachbereich Physik : Fortgeschrittenenpraktikum Anleitung zu Versuch Nr. 15*. http://129.217.224.2/HOMEPAGE/Anleitung_FPBSc.html. Mai 2017.