

Lehrstuhlversuch

Vermessung und Untersuchung von Silizium-Streifensensoren

mit dem Educational Alibava System



Entwickelt von
Nora Held und Falko Barth
bearbeitet von
Felix Wizemann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel des Versuches	1
1.2	Vorbemerkung	1
2	Der ATLAS-Detektor	2
3	Halbleiter	3
3.1	Allgemeines über Halbleiter	3
3.2	p- und n-Typ Halbleiter	5
3.3	Der pn-Übergang	6
4	Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung	9
4.1	Der beta-Zerfall	9
4.2	Wechselwirkung von Elektronen mit Materie	10
4.3	Energiespektrum im Silizium-Sensor	11
4.4	Pedestals und Noise	12
5	Versuchsaufbau	13
5.1	Detektoreinheit	14
5.2	Kontrolleinheit	17
5.3	Software zur Datenaufnahme	18
5.4	Versuchsaufbau für Quellenmessungen	19
5.5	Diodentrigger	20
6	Messaufgaben	22
6.1	Vorbereitende Aufgaben	22
6.2	Messung einer Strom-Spannungs-Kennlinie	22
6.3	Pedestals und Noise	22
6.4	Kalibrationsmessungen	22
6.5	Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers	23
6.6	Bestimmung der Charge Collection Efficiency	23
6.7	Großer Quellenscan	24
7	Hilfe zur Durchführung der Messaufgaben	24
	Literaturverzeichnis	32

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuches

Mit diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Silizium-Halbleiterdetektors verständlich gemacht und dessen Eigenschaften in mehreren Versuchsaufgaben untersucht und erfasst werden. Der Kern dieses Versuches ist die Funktionalität eines Siliziumstreifensensors zu untersuchen.

Dabei ist die Funktionsweise des Halbleiter-Sensors, der Ausleseelektronik und die Aufbereitung der aufgenommenen Daten zentral.

Die gewonnenen Daten und deren Verarbeitung sollen einen Eindruck darüber geben, wie der Nachweis von Teilchenspuren in großen Experimenten wie dem ATLAS-Detektor am LHC¹ von statten geht.

1.2 Vorbemerkung

Das benutzte System der Firma Alibava Systems² trägt den Namen **Educational Alibava System (EASy)**. Es ist durch seine Einfachheit in der Handhabung der Apparatur und der Software zur Datenaufnahme speziell für Studenten entwickelt worden. Zwar sind die Möglichkeiten dieses Systems geringer als bei Auslesesystemen für die Forschung und Entwicklung von und mit Silizium-Streifensensoren jedoch erlaubt dieses System Messaufgaben einfach und sicher durchzuführen.

Gegenstand dieses Versuches ist sowohl eine genaue Charakterisierung des Streifensensors als auch die Messung mit einer Strontium-90 Quelle. Diese emittiert radioaktive Strahlung in Form von β^- -Strahlung. Sie ist durch den Versuchsaufbau hinreichend abgeschirmt.

In der Versuchsanleitung sind bewusst Fachbegriffe aus dem Englischen übernommen und nicht übersetzt worden. Der Versuch soll einen Einblick in die Themen bieten, mit denen sich der Lehrstuhl E IV der Technischen Universität Dortmund beschäftigt. Dazu gehört die Übernahme der gängigen Fachbegriffe.

Die hauptsächlich benutzte Grundlage der Versuchsanleitung ist das Buch *”Einführung in die Festkörperphysik”* von Charles Kittel. Für eine weitere Vertiefung des Wissens wird die Lektüre des Kapitels *”Halbleiter”* empfohlen.

¹LHC = **L**arge **H**adron **C**ollider (dt. Großer Hadronen Speicherring)

²Entstanden aus der langjährigen Kollaboration zwischen dem IMB-CNM in Barcelona, dem IFIC in Valencia und der University of Liverpool

2 Der ATLAS-Detektor

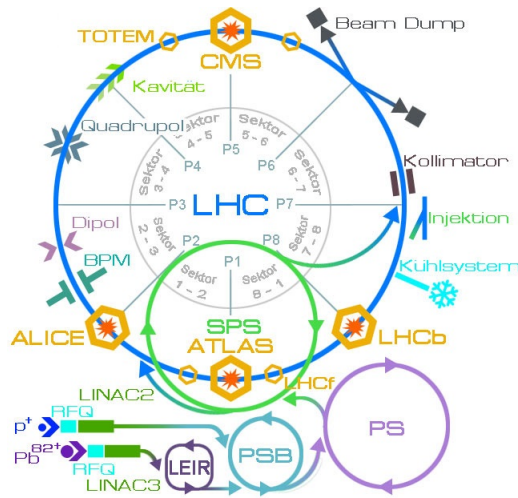


Abb. 2.1: Experimente des LHC. (CERN)

stand ursprünglich für **A Toroidal LHC Apparatus**, wird jedoch zunehmend als Eigenna-
me [CER16] benutzt.

Der ATLAS Detektor ist zylindrisch um das Strahlrohr aufgebaut, in welchem die Teil-
chen kollidieren. Er ist in mehreren Schichten aufgebaut. Direkt am Strahlrohr sitzt der
sogenannte *Inner Tracker*, der derzeit (2016) aus dem *Pixeldetektor* (Pixel), dem *Silizium-
Streifendetektor* (SCT³) und dem *Übergangsstrahlungsspurdetektor* (TRT⁴) besteht.

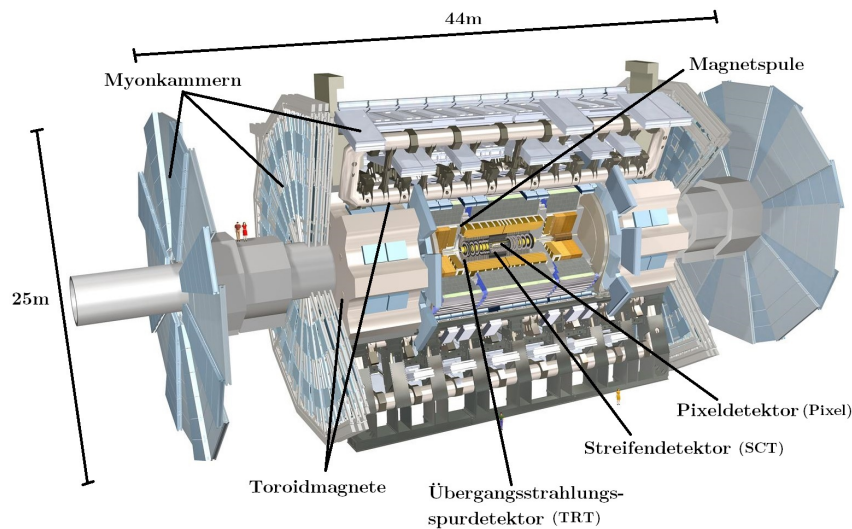


Abb. 2.2: Schematische Zeichnung des ATLAS Detektors. ([Peq08], bearbeitet)

³Semiconductor Tracker

⁴Transition Radiation Tracker

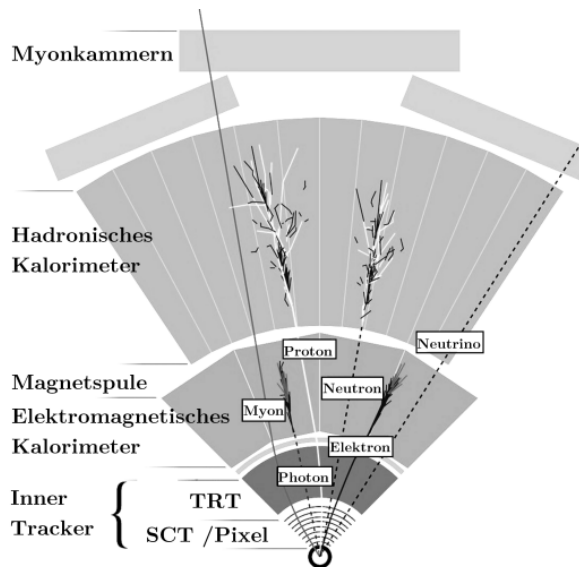


Abb. 2.3: Querschnitt des ATLAS Experiments und schematische Darstellung der Teilchenspuren. ([PS13], bearbeitet)

Verlauf einiger Teilchenspuren im ATLAS.

Der Pixeldetektor unterscheidet sich vom Streifendetektor durch eine höhere Strukturierung und besitzt damit auch eine höhere Ortsauflösung. Die einzelnen Pixelsensoren sind in der Herstellung wesentlich teurer als die Streifensensoren, sodass nur die innersten Lagen direkt am Strahlrohr aus ihnen bestehen.

Der Inner Tracker ist von einer Magnetspule umgeben. Geladene Teilchen werden so durch die Lorentzkraft von ihren Bahnen abgelenkt. Aus der Bahn, die aus den Messergebnissen des Inner Tracker errechnet werden kann, werden Masse und Ladung der Teilchen berechnet. Abbildung 2.3 zeigt den

Der Streifendetektor

Die zweit innerste Schicht des ATLAS-Detektors ist der Silizium-Streifendetektor. Er schließt direkt an den Pixeldetektor an und besteht aus vier Doppellagen Silizium Streifensensoren, die gegeneinander um $40\ \mu\text{rad}$ verdreht sind. Der dadurch entstehende Überlapp dient der Verdichtung des Detektionsraumes. Die Sensoren haben eine Auflösung von $16\ \mu\text{m}$ radial zum Strahl und $580\ \mu\text{m}$ in Strahlrichtung [CER16].

Insgesamt besteht der Streifendetektor aus 4088 einzelnen Modulen, von denen jedes Modul 768 Streifen enthält. Die im Versuch untersuchte Apparatur der Firma Alibava Systems beinhaltet einen Sensor, der 128 einzelne Streifen besitzt [Ali15]. Der Umgang mit dessen Datenmenge lässt die Dimension der verarbeiteten Daten des ATLAS-Experiments erahnen.

3 Halbleiter

3.1 Allgemeines über Halbleiter

Als Halbleiter wird ein Material bezeichnet, dessen Eigenschaften zwischen denen eines *Leiters* und denen eines *Isolators* liegen. Sie besitzen spezifische Widerstände zwischen $10^{-6}\ \Omega\text{m}$ und $10^{13}\ \Omega\text{m}$ [Kit02]. Zu unterscheiden sind drei Gruppen: die *Elementhalbleiter*

wie Germanium, Silizium und Selen, die *Verbindungshalbleiter* wie Galliumarsenid und die *organischen Halbleiter*, die aus Kohlenstoffverbindungen bestehen [Kuc11].

Das elektrische Verhalten der Halbleiter wird durch die Größe ihrer Bandlücke charakterisiert⁵, die als Energieabstand E_g zwischen Leitungs- und Valenzband definiert ist (vgl. Abbildung 3.1). Bei einem Leiter überlappen die Bänder, sodass sich genügend freie Ladungsträger im Festkörper befinden. Von einem Isolator spricht man ab einer Bandlücke von 4 eV. Hier ist die aufzuwendende Energie zu groß, als dass Elektronen das Valenzband verlassen könnten. Ein Halbleiter hat weder eine so große Bandlücke wie ein Isolator, noch überlappen die Bänder wie bei einem Leiter [Kit02].

Gegenstand dieser Untersuchung ist ein Silizium-Kristall. Silizium ist mit vier Elektronen im Valenzband und einer Bandlücke von 1,107 eV [Kuc11] ein typischer Elementhalbleiter. Die Atome ordnen sich in einer Diamantgitterstruktur [Kit02] an, bei der sie jeweils vier nächste Nachbarn haben. Jedes der vier Valenzelektronen trägt zu der Bindung der vier Nachbarn bei.

Bei einer Temperatur von 0 K hat der Elementhalbleiter keine elektrische Leitfähigkeit. Durch thermische Anregungen können Elektronen die kovalenten Bindungen verlassen, und ins Leitungsband springen. Sie hinterlassen den positiv geladenen Atomrumpf. Dieses entstandene "Loch" wird auch als *Defektelektron* bezeichnet und das entstandene Elektron-Loch-Paar als *Exziton* [Kit02]. Das Elektron ist ohne äußere

Krafteinwirkung an das Coulombfeld des Atomrumpfes gebunden, sodass es wieder zur Rekombination kommt. Wird jedoch ein elektrisches Feld angelegt, wandern die Elektronen zur Anode, während die Löcher in die entgegengesetzte Richtung bewegen.

Bei diesem Prozess spricht man von Eigenleitung. Silizium in seiner reinen Form hat eine Ladungsträgerdichte von $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Um die Leitfähigkeit eines Halbleiterkristalls weiter zu erhöhen, kann die Bandlücke durch gezieltes Einbringen von Fremdatomen verkleinert werden. Dieser Vorgang wird *Dotierung*⁶ genannt. Durch die Einbringung der Störstellen erhöht sich die Ladungsträgerdichte, was zu einer Verbesserung der Leitfähigkeit führt.



Abb. 3.1: Bandschema eines Elementhalbleiters wie Silizium. Durch Zufuhr von Energie $\geq E_g$ werden Elektronen ins Leitungsband angeregt (nach [Kit02]).

⁵Für weitere Informationen siehe Kittel, Kapitel Bändermodell.

⁶lat. dotare = ausstatten

3.2 p- und n-Typ Halbleiter

Da Silizium vier Elektronen im Valenzband besitzt, sind geeignete Störatome solche, die entweder drei oder fünf Valenzelektronen besitzen [Kit02]. Es wird, je nach Art der Dotierung, zwischen einem n-typ und einem p-typ Halbleiter unterschieden. Für weitere Erläuterungen zu Dotieren von Halbleitern kann Frank Thuselts Buch "Physik der Halbleiterelemente" [Thu11] studiert werden.

n-Typ Halbleiter

Bei dieser Art der Dotierung wird ein Gitteratom des Silizium-Kristalls gegen ein Fremdatom ausgetauscht, welches ein Elektron mehr im Valenzband besitzt als Silizium. Abbildung 3.2 zeigt dies schematisch in zwei Dimensionen. Als Beispiel wurde hier die Dotierung mit Arsen gewählt. Arsen hat fünf Elektronen in der Valenzschale, sodass eins der Elektronen für die Bindung im Gitter überflüssig ist. Dieses könnte sich frei im Gitter bewegen, wenn es nicht an das Coulombfeld des Atomrumpfes gebunden wäre. Durch ein externes Feld, wie es in Abschnitt 3.3 angelegt wird, können diese Elektronen zur Leitung beitragen. Man spricht daher bei Arsen, welches in Silizium dotiert wird, von einem *Donator*⁷.

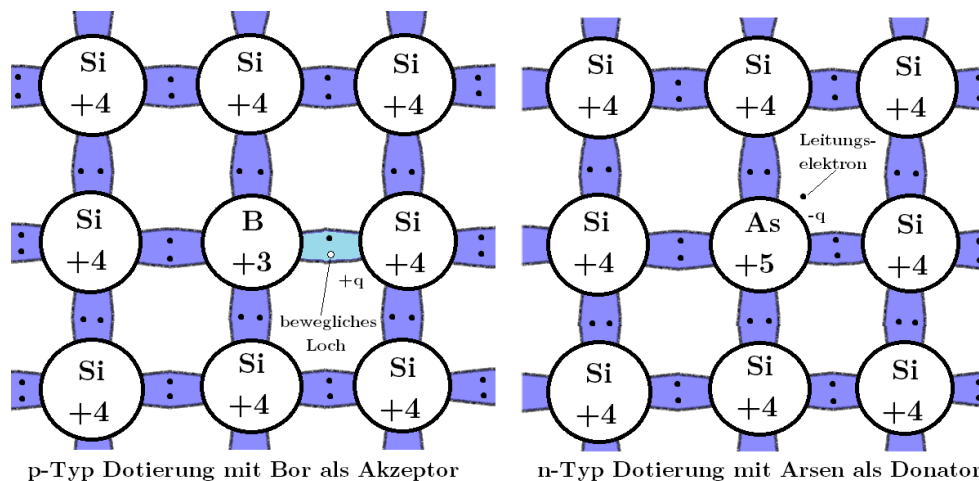


Abb. 3.2: Schematische Darstellung einer n- und p-typ Dotierung in zwei Dimensionen. (ähnlich [Ali15])

p-Typ Halbleiter

Bei einem p-typ Halbleiter wird der Silizium-Kristall mit einem Element dotiert, welches weniger als vier Elektronen in der Valenzschale besitzt. Abbildung 3.2 zeigt dies für das Beispiel Bor. Das Bor ersetzt im Kristallgitter ein Siliziumatom. Da es sich um ein Typ III Element handelt, sind nur die drei Elektronen in der Valenzschale an der Bindung zu den

⁷lat. donare = schenken

vier Nachbaratomen beteiligt. Die Verbindung ist zwar elektrisch neutral, jedoch fehlt in der Gitterstruktur ein bindendes Elektron in einer der kovalenten Bindungen. Das fehlende Elektron wird als *Defektelektron* oder auch umgangssprachlicher *Loch* bezeichnet. Durch Elektroneneinfang kann dieses Loch gefüllt werden, daher wird ein Typ III Fremdatom in einem Silizium-Kristall auch als Akzeptor⁸ bezeichnet. Bei der p-Typ Dotierung trägt das Fremdatom, welches als Akzeptor fungiert, durch den Einfang eines Elektrons zur Ladungsleitung bei. Die Ladungsträger sind in diesem Falle die Löcher, die von Bindung zu Bindung "springen".

In beiden Fällen wird der Stromfluss durch Diffusion und Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger bestimmt. Dabei können Löcher und Elektronen physikalisch gleich behandelt und die Löcher als positiv geladene Ladungsträger betrachtet werden.

Bei angelegtem elektrischen Feld E ergeben sich die Geschwindigkeiten v_e und v_l der Ladungsträger zu [Ali15]:

$$\begin{aligned} v_e &= \mu_e E \\ v_l &= \mu_l E \end{aligned} \quad (1)$$

Die Beweglichkeit μ_l der Löcher ist im Vergleich zur Beweglichkeit μ_e der Elektronen etwas geringer, dieses lässt sich jedoch für den gegebenen Zweck vernachlässigen.

Die Diffusion Φ , die weiterhin zur Eigenschaft der Leitfähigkeit beiträgt, lässt sich mittels Formel (2) beschreiben, wobei k_B die Boltzmannkonstante ist, T die Temperatur und q die Elementarladung [Ali15].

$$\Phi = \frac{k_B T}{q} \mu \quad (2)$$

Reines Silizium hat Mobilitäten von: [Kuc11]

$$\begin{aligned} \mu_e &= 1400 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ \mu_l &= 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \end{aligned} \quad (3)$$

3.3 Der pn-Übergang

In der Halbleitertechnik ist eines der einfachsten Bauelemente die Diode. Bei der Diode wird eine p-dotierte Halbleiterschicht mit einer n-dotierten verbunden, welches als *pn-Übergang* bezeichnet wird. Im Folgenden wird verkürzend von p- und n-Seite gesprochen. Die Diode fungiert oft als Gleichrichter, um Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, da sie den Strom nur in eine Richtung leitet [Hil14].

Die Eigenschaft des pn-Übergangs einer einfachen Diode ist auch elementar für Halbleiter-

⁸lat. acceptare = annehmen

Teilchendetektoren wie dem Pixel- und Streifendetektor des ATLAS-Experiments.

Durch den pn-Übergang kommt es zunächst zu einer Ladungsträgerdiffusion zwischen den Schichten, da die n-Seite einen Überschuss an Elektronen hat und die p-Seite einen Überschuss an Löchern. Die Elektronen der n-Seite rekombinieren mit den Löchern der p-Seite. Dadurch wird die n-Seite leicht positiv geladen und die p-Seite leicht negativ. Es stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Diffusion und entgegengesetztem elektrischem Drift ein. Der Potentialunterschied in diesem Gleichgewicht ist materialabhängig und wird mit U_D für Diffusionsspannung bezeichnet.

Legt man ein elektrisches Feld an, indem man den Pluspol an die p-Seite anschließt, vergrößert sich der Potentialunterschied, und die Elektronen beginnen, von der n-Seite weiter in die über die p-Seite in den Pluspol zu fließen. Daher wird diese Spannungsrichtung auch Durchlassrichtung genannt.

Für die Detektion von Teilchen ist dies nicht brauchbar. Hier wird ein positives Potential an die n-Seite angelegt und ein negatives an die p-Seite. Die Elektronen der negativ geladenen Kathode rekombinieren mit den Löchern der p-Seite und die Leitungselektronen der n-Seite driften zur positiv geladenen Anode. So kommt es am pn-Übergang zu einer Ladungsträgerverarmung, da alle freien Ladungsträger durch das äußere Feld entzogen wurden. Diese Zone wird als *Sperrschicht* oder auch *Depletionszone* bezeichnet. Ihre Dicke $d(U)$ hängt gemäß Formel (4) von der angelegten Vorspannung U ab.

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_D + U)}{qN_{\text{eff}}}} \quad (4)$$

Wobei ε die dielektrische Konstante von Silizium ist, U_D die beschriebene Diffusionsspannung im dynamischen Gleichgewicht, q die Elementarladung und N_{eff} die effektive Ladungsträgerdichte des Kristalls, die durch Formel (5) beschrieben wird. N_D und N_A sind die jeweiligen Dotierungskonzentrationen von Donatoren und Akzeptoren.

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \quad (5)$$

Ist die Depletionszone über den gesamten Kristall ausgebreitet, spricht man von voller Depletion und der dazu nötigen *Depletionsspannung* U_{dep} .

Typischerweise ist $U \gg U_D$, sodass die Diffusionsspannung vernachlässigt werden kann. Daraus ergibt sich durch Umstellen von Formel (4) die Abschätzung:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon U}{qN_{\text{eff}}}} \quad (6)$$

Und da die Dicke der Depletionszone ihr Maximum bei U_{dep} erreicht, folgt nach Umstellen von Formel (6)

$$U_{dep} \approx \frac{q}{2\varepsilon} N_{eff} D^2 \quad (7)$$

mit der Sensordicke D . Liegt die angelegte Spannung U unter der Depletionsspannung U_{Dep} , ist nur ein Bruchteil des pn-Überganges depletiert. Die Dicke d_c der Depletionszone lässt sich nähern mit:

$$d_c(U) = D \sqrt{\frac{U}{U_{dep}}} \quad \text{für } U < U_{dep} \quad (8)$$

$$d_c(U) = D \quad \text{für } U \geq U_{dep} \quad .$$

Die Energiedeposition eines ionisierenden Teilchens ist erst im vollen Ausmaß zu erfassen, wenn der Sensor voll depletiert ist und somit erzeugte Elektronen-Loch Paare nicht direkt rekombinieren.

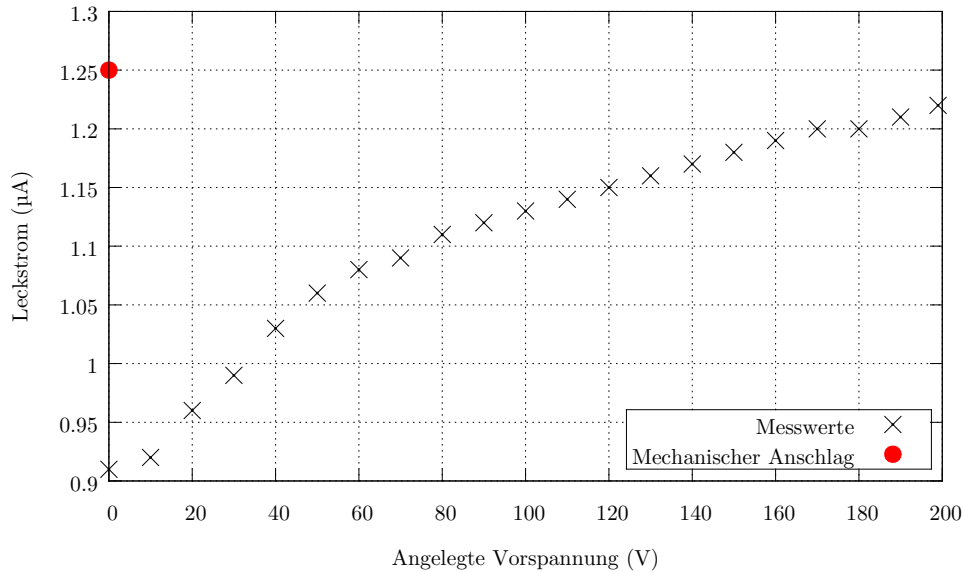


Abb. 3.3: Strom-Spannungs-Kennlinie des Educational Alibava Systems. Aus der Abflachung der Kurve bei 60V lässt sich die Depletionsspannung U_{dep} abschätzen. Zu beachten ist, dass der Einstellknopf für die Vorspannung nicht auf den mechanischen Anschlag gedreht wird, da hier die Spannung minimal in Durchlassrichtung angelegt wird, was zu dem rot markierten Wert führt.

Im Idealfall fließt in dieser Situation kein Strom durch den Halbleiter, da dieser keine freien Ladungsträger besitzt. In der Realität kommt es jedoch durch thermische Anregung zur Entstehung von Exzitonen, welche dann durch die angelegte Vorspannung an der Rekombination gehindert und zu den Polen geleitet werden, was als *Leckstrom* bezeichnet wird. Da mit steigender Spannung das Potential an den Polen steigt und dem Kristall somit mehr Energie zugeführt wird, steigt der Leckstrom mit der angelegten Vorspannung an.

Misst man den Leckstrom in Abhängigkeit zur angelegten Spannung, ergibt sich typischerweise eine Kurve wie in Abbildung 3.3. Anhand dieser Messung lässt sich abschätzen, bei welcher Spannung der Kristall voll depletiert ist, da der Leckstrom zunächst stark mit der angelegten Vorspannung steigt und nach Erreichen der Depletionsspannung bis hin zur Durchbruchspannung nur noch linear zunimmt.

4 Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung

Durch das EASy ist es möglich ionisierende Teilchen zu detektieren und ihre Ladungsdeposition zu erfassen. Damit das Spektrum analysiert und interpretiert werden kann, helfen die nachstehenden theoretischen Aspekte.

4.1 Der beta-Zerfall

Ionisierende Teilchen, die in radioaktiven Zerfällen entstehen, sind zum Beispiel α - und β -Teilchen, sowie γ -Strahlung und resultieren aus dem Zerfall eines instabilen Atomkerns. Die Zerfallsrate und die damit verbundene Emission von Teilchen wird durch die Aktivität und die Halbwertszeit bestimmt. Die Aktivität ist in Gleichung 9 definiert und besitzt die Dimension $Bq = [\frac{1}{s}]$ [Bet96].

$$A = \lambda N = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

N_0 gibt die Zahl der Kerne bei Beobachtungsbeginn des Zerfalls an. λ ist die sogenannte Zerfallskonstante.

Die zu verwendende ^{90}Sr Quelle gehört zu den reinen β -Strahlern [Leo87], bei denen ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird [Bet96].

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (10)$$

Ein typisches Energiespektrum eines β -Emitters ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es ist annähernd eine Gauß-Verteilung zu erkennen, da die frei werdende Energie zufällig auf das Elektron und das Antineutrino verteilt wird. Die emittierten β^- -Teilchen der ^{90}Sr Quelle sind Elektronen mit einer kinetischen Energie, die maximal 0,546 MeV beträgt [Leo87]. Die Zerfallsgleichung von ^{90}Sr ist wie folgt [Rau].



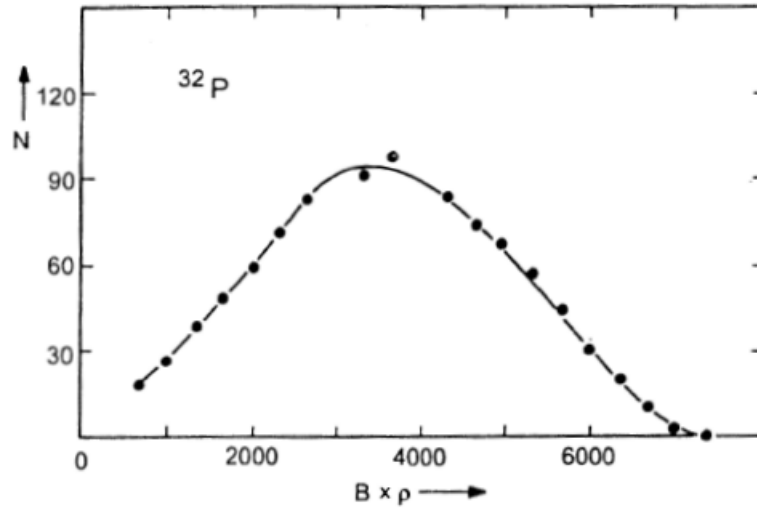


Abb. 4.1: „Elektronenspektrum eines β -Zerfalls, gemessen mit einem Magnetspektrometer“ [Bet96].

Auch der Zerfall von Yttrium in Zirkonium ist ein nahezu reiner β^- -Zerfall mit einer Emissionsenergie 2,28 MeV.

4.2 Wechselwirkung von Elektronen mit Materie

Sofern sich Elektronen mit einer kinetischen Energie $E_{\text{kin}} > 0$ nicht im Vakuum befinden, treten Wechselwirkungen mit der Materie auf, die sie umgibt. Die auftretenden Wechselwirkungen sind hauptsächlich der elastische und der inelastische Stoß. Die elastischen Stöße sorgen dafür, dass die Elektronen am Nuklid gestreut werden. Das Auslösen von Hüllenelektronen der Atome der Materie entsteht durch die inelastischen Stöße der Elektronen mit Materie. [Leo87]

Weil die kinetische Energie der emittierten Elektronen der ^{90}Sr Quelle i. A. nicht groß genug ist, wird die Bremsstrahlung, der inelastische Stoß mit den Atomkernen und die Cherenkov Strahlung nicht näher betrachtet.

Für den Nachweis der Elektronen, die durch Materie fliegen, gibt es verschiedene Methoden. In dem Versuch wird dazu der Halbleiter Silizium benutzt.

Der Nachweis von Elektronen, die durch Silizium-Sensoren fliegen, geschieht über die Ionisation der Atome im Kristallgitter. Die Energie, die das Elektron dabei im Schnitt pro Strecke verliert, wird für Elektronen durch die modifizierte Bethe-Bloch-Gleichung bestimmt [Leo87].

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a m_e c \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{\tau^2(\tau + 2)}{2(I/m_e c^2)^2} \right) + F(\tau) - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (12)$$

Dabei hat τ die Einheit $m_e c^2$ und entspricht der kinetischen Energie. Für Gleichung 12 ist $F(\tau)$ und τ wie folgt bestimmt.

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\frac{\tau^2}{8} - (2r_e + 1)\ln 2}{(\tau + 1)^2} \quad \text{mit} \quad \tau = \gamma - 1 \quad (13)$$

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über alle notwendigen Konstanten und Symbole.

Der durchschnittliche Energieverlust, der aus der Bethe-Bloch-Formel ermittelbar ist, ent-

Tabelle 4.1: Konstanten und Formeln der modifizierten Bethe-Bloch-Gleichung.

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
r_e	klassischer e^- Radius: $2,817 \cdot 10^{-13}$ cm	ρ	Dichte des Absorbermaterials
m_e	Elektronenmasse: $9,108 \cdot 10^{-28}$ g	β	$\frac{v}{c}$ des einfallenden Teilchens
N_a	Avogadro Konstante: $6,022 \cdot 10^{23}$ mol $^{-1}$	γ	$1/\sqrt{1 - \beta^2}$
I	durchschnittliches Anregungspotential: 173 eV	δ	Dichtekorrektur
Z	Protonenzahl	C	Hüllenkorrektur: -4,44
A	Nuklidanzahl	$2\pi N_a m_e c$	0,1535 MeV cm 2 /g

spricht der Energie eines ionisierenden Elektrons. Daraus folgt dann, dass der theoretische Wert für die durchschnittliche Energiedisposition eines ionisierenden Elektrons der maximalen Energie des Primärzerfalls in reinem Silizium bei 3,88 MeV/cm liegt.

4.3 Energiespektrum im Silizium-Sensor

Das Energiespektrum, das sich für einen β -Emitter ausbildet, ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Für Siliziumsensoren, die zu dünn sind um die Elektronen zu stoppen, ist als Folge des zentralen Grenzwertsatzes bei einer hinreichenden Dicke eine Gaußverteilung als Spektrum der deponierten Energie zu erwarten [Leo87].

In dünneren Sensoren, wie dem Silizium-Streifensensor in diesem Versuch mit einer Dicke von 300 μ m gibt es jedoch nicht ausreichend viele Wechselwirkungen mit den Elektronen der Atomhüllen um den zentralen Grenzwertsatz anzuwenden. Somit lässt sich das Spektrum der deponierten Energie nicht ausreichend durch eine Gauß-Verteilung approximieren. Zusätzlich werden in dünnen Sensoren nicht alle Sekundärelektronen wieder abgebremst und somit wird nicht die komplette vom Elektron abgegebene Energie absorbiert.

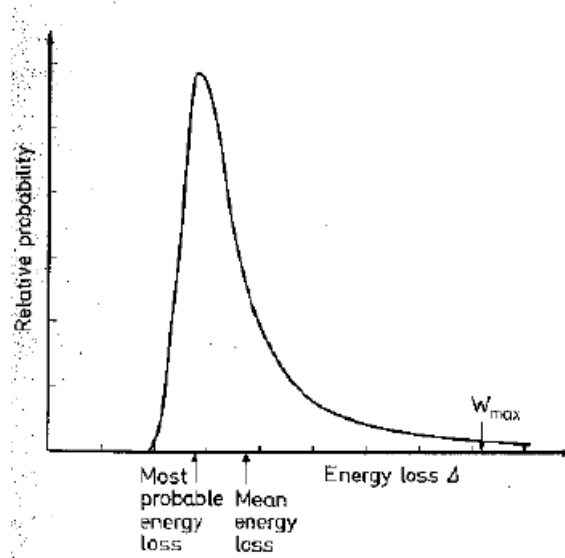


Abb. 4.2: Typisches Spektrum einer Energiedisposition eines Elektrons in einem dünnen Sensor [Leo87].

Dies sorgt dafür, dass die Energieverteilung asymmetrisch wird und einer Landau-Verteilung gleicht [Ali15].

Abbildung 4.2 zeigt eine für Elektronen typische Verteilung in dünnen Silizium-Sensoren. In dünnen Silizium-Sensoren ist zudem zu beachten, dass das Emissionsspektrum der β -Quelle breiter als die Landau-Verteilung. Deswegen beschreibt die Faltung einer Gauß-Verteilung mit einer Landau-Verteilung das Spektrum am genauesten [Sch14].

Zu beachten ist, dass die Ladungsdeposition stets in ADC-Charges bzw. Counts angegeben wird. Die Umrechnung von ADC-Charges in Energien in Einheiten von keV ist polynomiell anzunähern und mit der Energie zur Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares zu gewichten. Die Kalibrierung des Systems ermöglicht die Umrechnung von ADC Signalen in erzeugte Elektron-Loch Paare. Zusammen mit dem Wissen, dass 3,6 eV zur Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares in Silizium benötigt werden [Ali15], kann nun die deponierte Energie bestimmt werden.

4.4 Pedestals und Noise

Durch den Sensor selbst, die Ausleseelektronik, auf die in Abschnitt 5 weiter eingegangen wird, entstehen Störsignale, die die eigentlich relevanten Signale stören. Diese Signale werden Rauschen, im Englischen *Noise*, genannt. Es ist zwar nicht möglich das Rauschen gänzlich zu eliminieren, aber es ist möglich es auf ein Minimum zu reduzieren [Fra03].

Der gemessene $\text{ADC}(i, k)$ Count, der für ein Signal k bei einem Streifen i entsteht, ist in

Gleichung 14 dargestellt.

$$\text{ADC}(i, k) = P(i, k) + D(k) + \text{Signal}(i, k) \quad (14)$$

Der Mittelwert der ADC Counts für einen Streifen ohne externes Signal(i, k) wird *Pedestal* $P(i)$ genannt und berechnet sich aus N Events wie folgt:

$$P(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{ADC}(i, k). \quad (15)$$

Jeder der 128 Kanäle hat ein Pedestal Offset von 500 ADC Counts. Der Wert ist von der durchschnittlichen Spannbreite der ADC Counts abgeleitet [Ali15].

Der *Common Mode Shift* $D(k)$ beschreibt eine globale, alle Streifen betreffende, Störung während eines Events. Es wird wie folgt ermittelt:

$$D(k) = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (\text{ADC}(i, k) - P(i)). \quad (16)$$

Der Common Mode Shift über alle Streifen wird auch als *Common Noise* bezeichnet [Ali15] und ist i. A. Gauß-verteilt um 0 [Fra03].

Die Noise der einzelnen Streifen wird ermittelt, in dem der RMS⁹ der ADC counts nach Abzug der Pedestal und des Common Mode Shifts bestimmt wird:

$$\text{Noise}(i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\text{ADC}(i, k) - P(i) - D(k))^2}. \quad (17)$$

Für Messungen, bei denen ein echtes Signal erwartet wird muss ein zweiter Durchlauf dieser Berechnungen durchgeführt werden, bei dem Signale, die mehrere Standardabweichungen oberhalb des Noise Levels liegen, aussortiert werden.

5 Versuchsaufbau

Das Alibava EASy ist ein Halbleiter Detektorsystem bestehend aus drei Komponenten: der Kontrolleinheit, der Detektoreinheit und schließlich dem Computer, über den die Datenaufnahme gesteuert wird. Die Software zur Steuerung des Systems kann sowohl über Konsole als auch über die Alibava-gui¹⁰ erfolgen.

⁹Root-Mean-Square

¹⁰gui = graphical user interface (dt. Grafische Benutzeroberfläche)

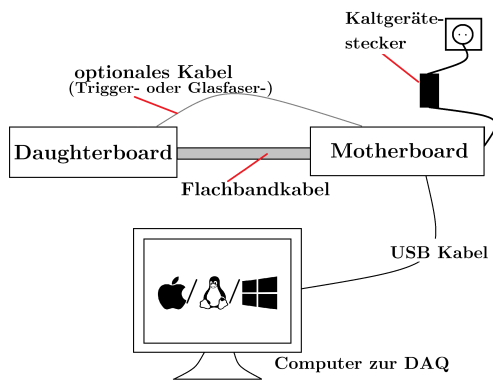


Abb. 5.1: Schaltplan zum Aufbau von Alibaba EASy. (Auszüge aus iconarchive.com)

Detektor- und Kontrolleinheit werden zunächst über ein Flachbandkabel verbunden, welches den Detektor mit Spannung versorgt und die gemessenen Daten an die Kontrolleinheit zur Verrechnung überträgt. Für weitere Versuchsreihen sind zusätzlich das Triggerkabel oder das Glasfaserkabel notwendig.

Nachdem das Flachbandkabel zwischen Detektor und Kontrolleinheit verbunden ist, wird letztere mittels eines USB Kabels an den Computer angeschlossen. Erst dann ist die Kontrolleinheit über den Kaltgerätestecker mit Strom zu versorgen und anschließend die Software zu starten.

Ist die Kontrolleinheit mit Strom versorgt, **bevor** die anderen Kabel angeschlossen werden, so wird das System eventuell nicht korrekt mit dem Computer initialisiert.

5.1 Detektoreinheit

In der Detektoreinheit befindet sich der Halbleitersensor und die zugehörige Ausleseelektronik.

Es handelt sich um eine p-in-n Implantation, wie sie genauer in Kapitel 3 der Anleitung beschrieben wird. Der Halbleitersensor ist vergleichbar mit denen des ATLAS-Experiments und in 128 Silizium Streifensensoren unterteilt. Der verwendete Auslesechip (BEETLE) ist über Wirebonds mit den Streifensensoren verbunden. Der BEETLE Chip findet Verwendung im LHCb Experiment. Der Beetlechip sorgt dafür, dass auch schwache Signale in der Ausleseelektronik erkannt werden können. Eingehende Ladungssignale werden verstärkt, in Spannungssignale umgewandelt und anschließend in einer Pipeline vorgehalten. Bei einem eingehenden Trigger fragt nun die Kontrolleinheit das Signal des Alibava Chips ab und erhält das älteste Element der Pipeline. Falls kein Triggersignal kommt werden die gespeicherten Signal verworfen. In der Kontrolleinheit wird das Signal nun digitalisiert und in sogenannte *ADC Counts* umgewandelt.

Um effizient zu messen, muss der Sensor voll depletiert sein. Für in die Alibava verwendeten Streifensensoren liegt die Depletionsspannung U_{dep} typischerweise in einem Bereich von: [Ali15]

$$U_{dep} \approx 60 - 80 \text{ V} \quad (18)$$

Die angelegte Spannung kann an der Kontrolleinheit eingestellt werden. Es ist ausschließlich ein Betrieb in Sperrichtung möglich.

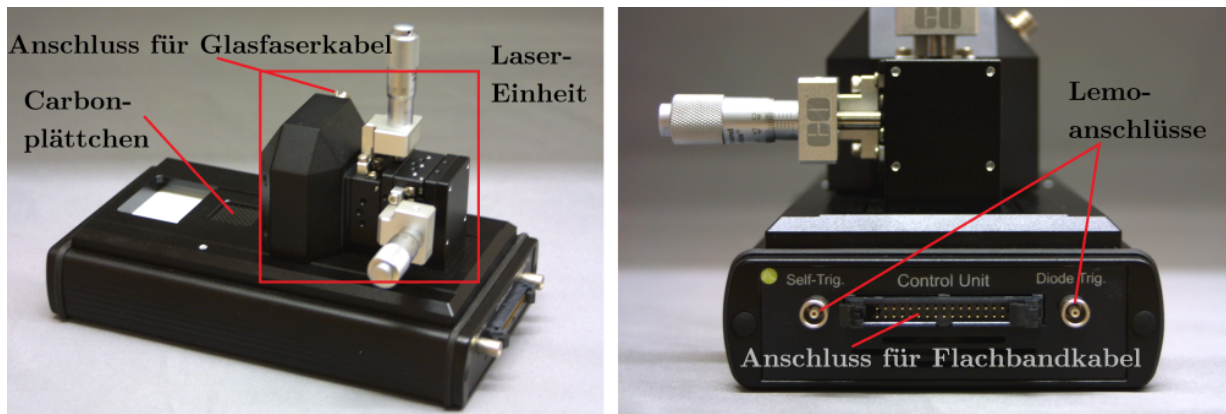


Abb. 5.2: Detektorreinheit in Aufsicht und Vorderansicht.

Alle Daten, die der BEETLE ausliest, werden über das Flachbandkabel an die Kontrolleinheit gesendet und können anschließend über Alibava-gui abgerufen werden. Auf der Oberseite der Detektoreinheit befindet sich eine verschiebbare Plattform, die das Lasersystem und ein Carbonplättchen enthält. Diese hat zwei unterschiedliche Positionen, die im folgenden mit (L) für die Lasermessung und (Q) für die Quellenmessung bezeichnet werden. In Abbildung 5.2 ist die Einheit in Q Stellung dargestellt. Eine Detektion ist nur in der korrekten Stellung möglich.

Der Halbleitersensor

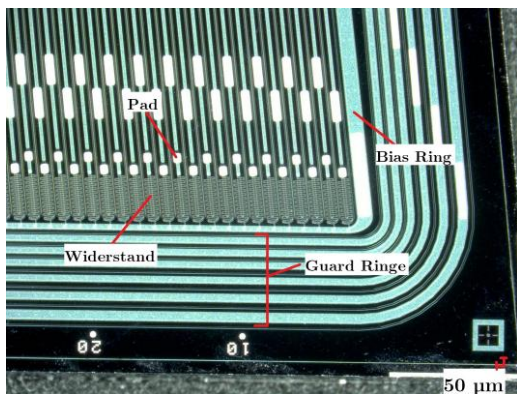


Abb. 5.3: Makroskopische Aufnahme eines Streifensensors (Foto: J. Lönker).

Die Streifensensoren sind, im Gegensatz zur Basis, gegeneinander isoliert, was eine Lokalisierung der deponierten Ladung im Detektor ermöglicht.

Weiterhin sind sie von einer Silizium-Oxidschicht überdeckt, was verhindert, dass der Leckstrom direkt in die Ausleseelektronik fließt. Die p-dotierten Implantate sind kapazi-

Der in Alibava EASy verbaute Sensor funktioniert nach dem in Abschnitt 3 erläuterten Prinzip eines Halbleiterdetektors.

Die Basis besteht aus einer 300 µm dicken, n-dotierter Siliziumschicht, welche auf der Unterseite von einer Metallisierung bedeckt wird¹¹. Zur Spannungsversorgung ist sie mit einem niedrigen ohmschen Widerstand verbunden. In die n-dotierte Basis sind auf der Oberseite 128 p-dotierte Implantate eingelassen. Diese sind lang und schmal, woraus sich ihr Name "Streifen" ableitet.

¹¹Anmerkung: Hier wird die n^+ Schicht auf der Rückseite des Sensors vernachlässigt. Diese ist wichtig, um die Funktion dessen auch bei Strahlenbelastung zu erhalten. Siehe hierfür [Har09] und [CER16].

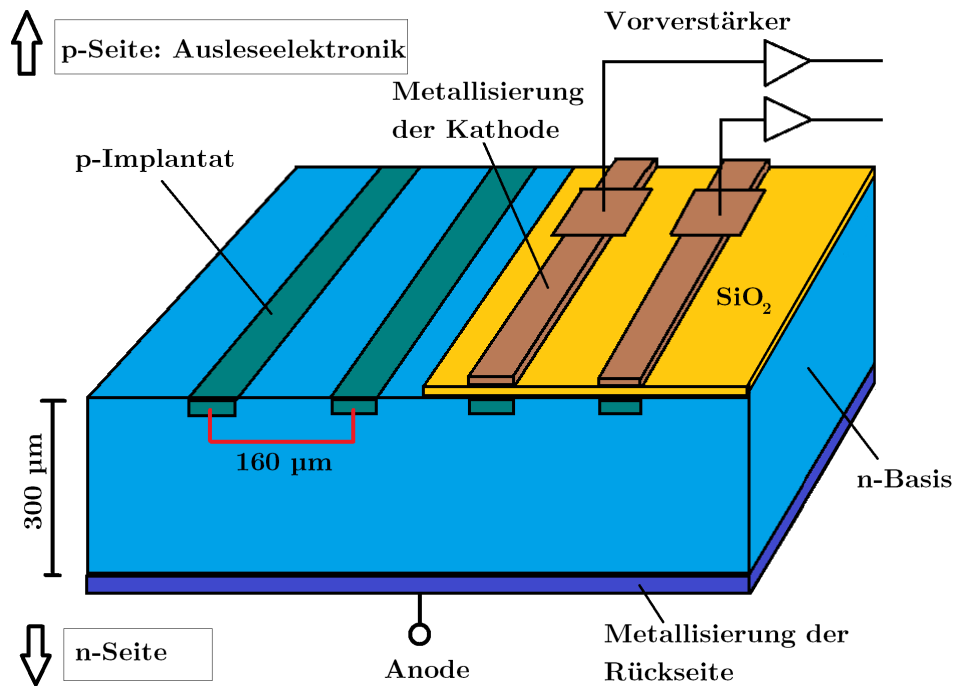


Abb. 5.4: Schematisches Schrägbild des im EASy verbauten Sensors. Die n-Seite wird nur über einen Anschluss mit Spannung versorgt, während die Elektroden auf der p-Seite einzeln ausgelesen werden können (nach [Ali15])

tiv mit einer auf der Silizium-Oxidschicht liegenden Elektrode aus Aluminium gekoppelt, welche über einen ohmschen Kontakt ausgelesen wird. Ein makroskopisches Bild eines Streifendetektors ist in Abbildung 5.3 zu erkennen [Ali15].

Der Bias Ring dient der Versorgung der Streifen mit Spannung, während die Guard Ringe dafür sorgen, dass die Ladung nicht unkontrolliert über den Sensor hinaus in die Elektronik fließt [CER16].

Abbildung 5.4 zeigt ein schematisches Schrägbild. Die Basis ist nur über einen Kontakt mit Spannung versorgt, die 128 Streifen können jedoch einzeln vom BEETLE ausgelesen werden, woraus sich die Ortsauflösung des Detektors ergibt.

Bei dem p-in-n Sensor wird ein negatives Potential an die Aluminiumelektroden über den p-Implantaten angelegt, um eine Spannung in Sperrrichtung zu gewährleisten (Vgl. Abschnitt 3). Ist der Sensor nicht voll depletiert, rekombinieren die Elektron-Loch-Paare außerhalb der Depletionszone wieder, da sie nicht durch das elektrische Feld getrennt werden. Die Effizienz der Messung steigt mit der Dicke der Depletionszone, bis sie bei U_{dep} ihr Maximum erreicht. Wird eine Spannung $U > U_{dep}$ angelegt, steigert dies nicht die Effizienz, da die Depletionszone sich nicht über den Sensor ausbreiten kann.

Mittels des eingebauten Lasers kann die Effizienz der Ladungssammlung, kurz CCE^{12} , abgeschätzt werden. Aus diesen Überlegungen ergibt sich mittels Formel (8) folgender Zusammenhang für die Effizienz des Detektors:

$$CCE(U) = \frac{1 - \exp\left(\frac{-d_c(U)}{a}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-D}{a}\right)} \quad (19)$$

mit der Dicke der Depletionszone d_c gemäß Gleichung (8), einer Sensordicke von $D = 300\mu\text{m}$ und einer mittleren Eindringtiefe von Laser in Silizium a . Diese hängt von der Wellenlänge des Lasers ab und hat beispielsweise für 960nm einen Wert von $74\mu\text{m}$ und für 1073 nm einen Wert von $380\mu\text{m}$ [Lid96].

Der Laser

Der im System verbaute Laser dient der Vermessung und Untersuchung der eingebauten Streifensensoren. Er wird in der Kontrolleinheit erzeugt und über ein Glasfaserkabel an die Detektoreinheit geleitet. Die Plattform muss somit auf (L)-Stellung stehen.

Der Laser hat eine Wellenlänge von 980 nm, einen Durchmesser von ca. $20\mu\text{m}$ auf dem Sensor und eine Spitzenleistung von 0,6 mW bei einer Pulslänge von 5 ns [Ali15].

An der Lasereinheit befinden sich zwei Mikrometerschrauben, die sich mit einer Genauigkeit von $10\mu\text{m}$ einstellen lassen. Mit der vertikalen Mikrometerschraube lässt sich die Fokussierung durch die Höhe des Lasers einstellen. Da dieser eine festgelegte Brennweite hat, muss der Sensor im Brennpunkt des Lasers liegen, um die Streifenstruktur möglichst genau ausmessen zu können.

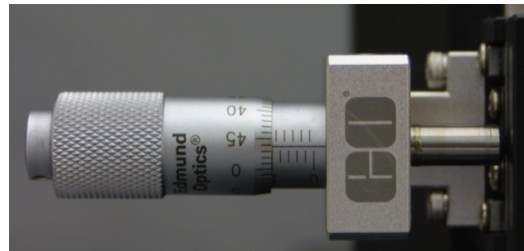


Abb. 5.5: Horizontale Mikrometerschraube zur Positionierung des Lasers über dem Sensor.

Die horizontale Mikrometerschraube dient zur Positionierung des Lasers über den Streifensensoren. Die Konstruktion der Lasereinheit lässt eine Untersuchung von 94 der 128 Streifensensoren zu.

5.2 Kontrolleinheit

Die in Abbildung 5.6 zu erkennende Kontrolleinheit dient zur Steuerung der Detektoreinheit. Über den Drehknopf "Diode Bias" kann anschließend die Vorspannung des Sensors

¹²Charge Collection Efficiency



Abb. 5.6: Kontrolleinheit von EASy. Auf der Rückseite sind USB-Anschluss und Stromanschluss zu erkennen. Der rote Resetknopf ist nötig, um die Initialisierung mit dem Computer neu zu starten. Auf der Vorderseite befinden sich ein Display zur Kontrolle von Vorspannung und Leckstrom, sowie Anschlüsse zur Verbindung zur Kontrolleinheit.

eingestellt werden. Der fließende Leckstrom wird über ein Amperemeter der Kontrolleinheit registriert und ist in $0,01 \mu\text{m}$ -Schritten genau abzulesen.

Über dem Flachbandkabelanschluss befindet sich ein Sockel für ein optisches Kabel. Der für die Messungen 6.5 und 6.6 benötigte Laser wird in der Kontrolleinheit erzeugt und über das Glasfaserkabel in die Detektoreinheit übermittelt und in der beweglichen Lasereinheit ausgekoppelt.

Die Lemoanschlüsse für die Triggerkabel werden ausschließlich bei der Quellenmessung benötigt.

Bei der Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie ist bei 0V eine Besonderheit zu beachten. Der Drehknopf muss von einer höheren Spannung gedreht werden, bis er gerade 0V anzeigt. Wird er weiter auf den mechanischen Anschlag gedreht, wird eine geringe Vorspannung in Durchlassrichtung an den Sensor angelegt und dieser wird spontan leitend. Dies erklärt den rot markierten Wert in Abbildung 3.3.

5.3 Software zur Datenaufnahme

Nach der Installation der Software kann EASy gemäß Abbildung 5.1 verkabelt, anschließend bestromt und durch das Starten der Software initialisiert werden. Diese lässt sich

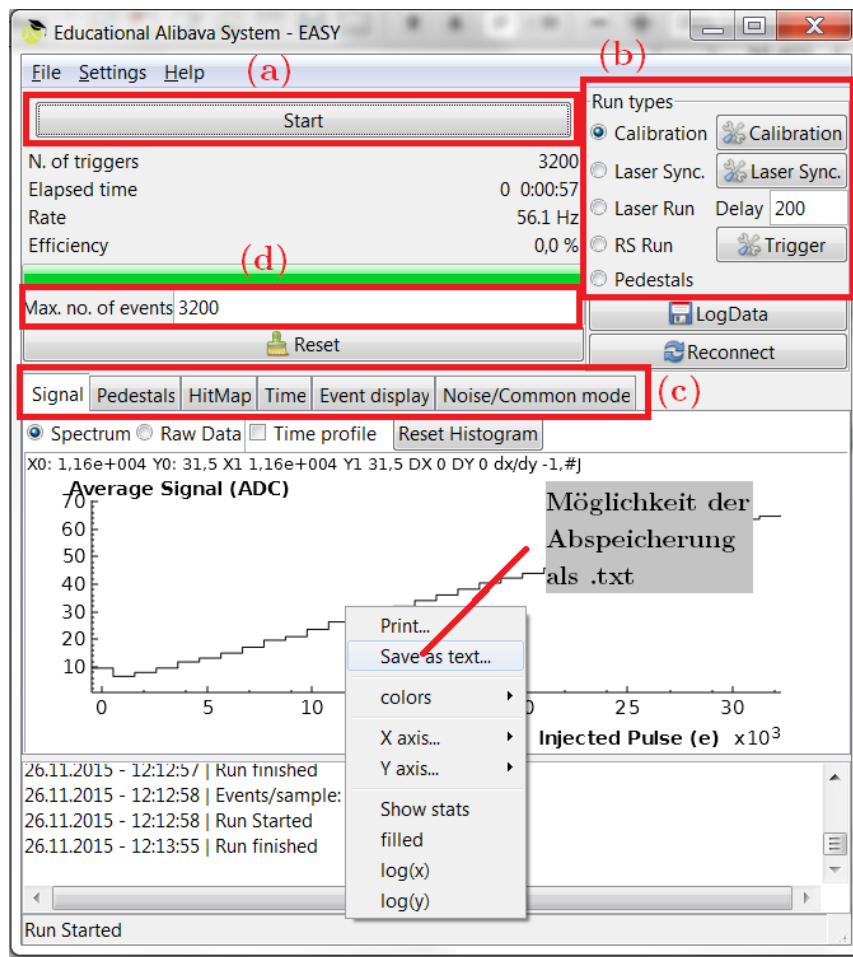


Abb. 5.7: Programmfenster der Alibava-gui. Mit Klicken von (a) lässt sich die Datenaufnahme starten, Bereich (b) legt den Betriebsmodus fest, mit (c) ist die Darstellung der Daten auszuwählen und mit (d) kann die Größe der Statistik festgelegt werden. Durch Rechtsklick auf die Graphiken können die dargestellten Messwerte als .txt abgespeichert werden.

über die Konsole steuern, ist aber auch direkt über die Graphikoberfläche zu bedienen. Die Bedienoberfläche ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

5.4 Versuchsaufbau für Quellenmessungen

Die Detektoreinheit ist in einer Kiste, die mit Bleisteinen an den Seitenflächen und am Boden ausgelegt ist. Das Blei dient als Abschirmung der Strahlung der verwendeten Quelle. Abbildung 5.8 zeigt die Umgebung des Aufbaus. Bevor die Quelle in der Kiste an die dafür vorgesehene Stelle platziert wird, muss das System korrekt verkabelt sein. Die Vorgehensweise für die neue Verkabelung ist genauso, wie im ersten Teil der Versuchsanleitung¹³ beschrieben, durchzuführen. Zusätzlich ist das LEMO-Kabel in die Detektoreinheit in den *Diode-Trigger* Anschluss und in die Kontrolleinheit in den *Trigger-Pulse-In* Anschluss ein-

¹³Seite 13

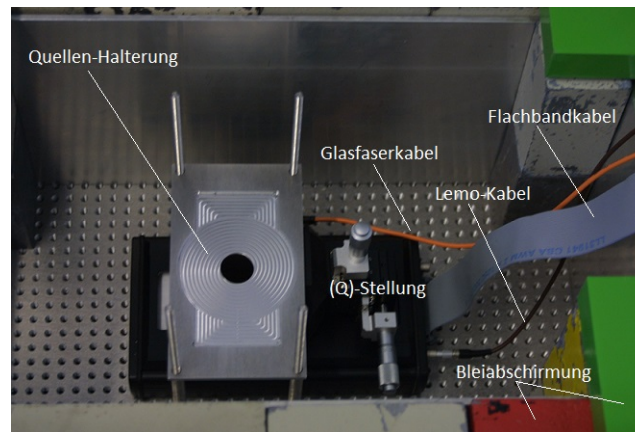


Abb. 5.8: Aufsicht der Detektoreinheit in (Q)-Stellung mit angeschlossenem Flachbandkabel und Lemo-Kabel in der Bleikiste.

zustecken. Der Detektor ist in Q-Stellung zu betreiben sodass das Carbonplättchen, auf dem die Quelle positioniert wird, direkt über dem Sensor liegt. Als Material wurde Carbonfaser gewählt, da es bereits bei einer sehr kleinen Dicke Licht undurchlässig stabil ist und somit durchlässig für ionisierende Strahlung wie Elektronen [Ali15]. Erst dann ist die Quelle zu positionieren und die Kiste zu schließen. Da kaum eine Abschirmung nach oben gegeben ist, ist das Hantieren über der Kiste zu vermeiden.

5.5 Diodentrigger

Durch die Detektion der erzeugten Elektronen-Loch-Paare beim Durchgang eines ionisierenden Teilchens kann der Sensor die abgegebene Energie bestimmen. Abbildung 5.9 zeigt in einer schematischen Darstellung wie ein Signal im Sensor erzeugt wird, wobei jeder der 128 Streifen mit dem *Beetlechips* verbunden ist [Ali15]. Insbesondere die Detektor-Diode ist für den Versuchsaufbau essentiell. Sie detektiert nur Elektronen, die durch den ganzen Sensor geflogen sind und noch ausreichen Energie besitzen, um auch in der Diode Elektronen-Loch-Paare zu erzeugen. Die Diode ist auch ein Halbleitersensor aus Silizium. Sie ist nicht in Streifen eingeteilt, sondern in vier Teilbereiche, wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist und ist mehrere Millimeter unter dem Streifensensor positioniert und wird durch eine modulinterne Spannungsquelle versorgt, die nicht extern steuerbar ist. Wird von dieser Diode ein Trigger Signal ausgelöst, wird dieses an die Kontrolleinheit weitergeleitet welche nun die Signale des BEETLE Chips ausliefert.

Analyse-System

Bei der Signalgenerierung der Streifensensoren wird stets auch das Rauschen der Streifen und der Ausleseelektronik in ADC Counts umgewandelt und gespeichert. Durch einen

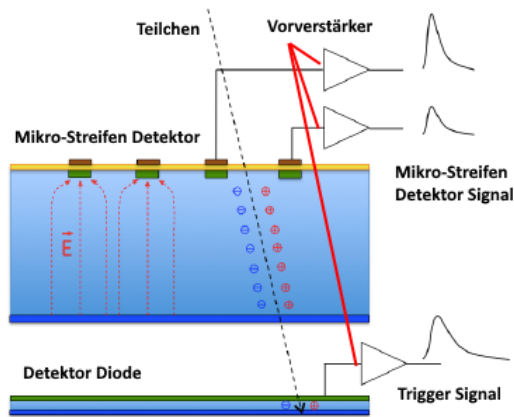


Abb. 5.9: Bearbeitete schematische Darstellung eines Querschnitts durch den Sensor und der Diode des im EASy verbauten Sensors [Ali15].

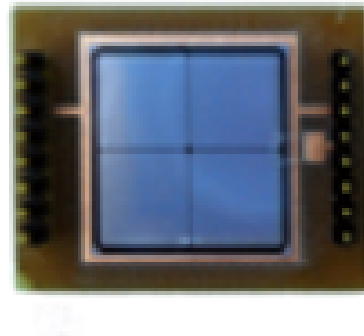


Abb. 5.10: Aufsicht auf die eingebaute Diode [Ali15].

Signal-to-Noise-Cut soll das relevante Signal vom Rauschen unterschieden werden. Dies geschieht, indem das Rauschsignal von dem Signal, welches durch das durchfliegende β^- -Teilchen erzeugt wird, abgezogen wird und daraufhin durch das Rauschen des Streifens geteilt wird. Das wird mit dem gesetzten $S/N_{textcut}$ verglichen. Ist das Signal größer, so wird es weiter in der Analyse berücksichtigt.

Bei der Lasereinheit des EASy werden Photonen gezielt auf den Sensor geschossen. Dadurch ist allenfalls eine Ladungsdeposition zwischen zwei Streifen möglich, was bei der Vermessung der Streifen sichtbar wird.

Bei einer radioaktiven Quelle ist die Energie des ausgestrahlten Teilchens und auch die Strahlrichtung des Teilchens willkürlich. Dem entsprechend oft durchquert das Teilchen bei einem Event nicht nur einen Streifen und es existiert *Charge Sharing*. Ab und zu durchqueren vom Trigger-Elektron unabhängige Elektronen den Sensor. Diese bilden, unterschiedliche, sogenanntes Cluster [Fra03], die die Analyse-Software des EASy erkennt und analysiert. Pro Event können mehrere Cluster mit unterschiedlichen Größen entstehen.

6 Messaufgaben

Eine Hilfe zur Durchführung der Messaufgaben ist in Abschnitt 7 gegeben.

6.1 Vorbereitende Aufgaben

- a) Machen Sie sich mit dem Ablesen einer Mikrometerschraube vertraut. Lesen Sie dazu als Beispiel ab, wie viel μm bzw. mm die Mikrometerschraube in Abbildung 5.5 auf Seite 17 anzeigt.
- b) Der Sensor wird mit einer ^{90}Sr Quelle untersucht. Wie beeinflusst der Zerfall des Yttrium-90 im Folgeprozess die Messung des Energiespektrums?

6.2 Messung einer Strom-Spannungs-Kennlinie

- a) Messen Sie eine Strom-Spannungs-Kennlinie in 10V Schritten und bestätigen sie die vom Hersteller genannte Depletionsspannung aus Gleichung (18).
- b) Für die Messungen 6.4 und 6.5 ist an den Sensor eine um mindestens 20V höhere Spannung als die ermittelte Depletionsspannung anzulegen. Begründen Sie dies.

6.3 Pedestals und Noise

Führen sie einen *Pedestal Run* für 1.000 Events durch.

- a) Geben Sie einen Überblick über die Pedestals und das Noise für die einzelnen Streifen an.
- b) Stellen Sie die Werte des Common Mode sinnvoll dar.

6.4 Kalibrationsmessungen

Für diese Messaufgabe genügt es, die Daten über den Rechtsklick auf die Graphik als .txt zu speichern.

- a) Bestimmen Sie mittels einer *Delay Messung* im *Calibration Run* die optimale Verzögerung zwischen Signal und Auslese und tragen Sie den Wert im Calibration Fenster ein.
- b) Nehmen Sie für fünf Kanäle eine Kalibrationskurve auf, wobei die Vorspannung oberhalb der Depletionsspannung liegt. Für einen Kanal ist zusätzlich eine Kurve bei einer Vorspannung von 0 V aufzunehmen. Unter *Num. Pulses* ist 255 einzutragen.
 - a) Plotten Sie die Messwerte der *Calibration Runs* oberhalb der Depletionsspannung und ihre Mittelwerte.

- b) Bestimmen Sie die Abhängigkeit der injizierten Ladung von den gemessenen ADC Werten mit einem Polynom 4. Grades.
- c) Vergleichen sie den Verlauf bei 0 V und oberhalb der Depletionsspannung.

6.5 Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers

- a) Messen Sie mittels der Option *Laser Sync.* die optimale Verzögerung zwischen Lasersignal und Chipauslese. Der ermittelte Wert ist in das Formularfeld neben *Laser Run* einzutragen.
- b) Untersuchen sie die Struktur des Streifensensors, in dem sie für 35 Punkte im Abstand von 10 μm 1000 events aufnehmen.
- c) Plotten Sie das Signal in Abhängigkeit zur Laserposition. Bestimmen Sie daraus b) die *pitch* der Streifen, die Ausdehnung des Lasers auf diesem und vermerken Sie die Streifennummern.
- d) Reflektieren Sie, warum der Sitz der Kathode eines (unbestrahlten) Streifensensors für die Messung eines ionisierenden Teilchens irrelevant ist.

6.6 Bestimmung der Charge Collection Efficiency

Laser

Erhöhen Sie die Spannung von 0 bis 200 V in 10 V Schritten und nehmen Sie für jede Stufe einen Datensatz mit 1.000 Events auf.

- a) Untersuchen Sie die die Effizienz des Detektors in Abhängigkeit der angelegten Spannung, indem Sie bei fokussiertem Laser eines der Maxima aus Aufgabe 6.5 bei unterschiedlichen Vorspannungen vermessen. Vergleichen Sie den Beginn des Plateaus mit der ermittelten Depletionsspannung aus Aufgabenteil 6.2.
- b) Ermitteln Sie die Eindringtiefe a des Lasers über einen Funktionenfit mit Gleichung (19).

Quelle

Erhöhen Sie die Spannung von 0 bis 200 V in 10 V Schritten und nehmen Sie für jede Stufe einen Datensatz mit 10.000 Events auf.

- a) Stellen Sie die Mittelwerte der Clusterenergie in Abhängigkeit der angelegten Spannung dar.
- b) Vergleichen sie die Ergebnisse zwischen der CCE Messung mit einem Laser sowie der Quelle. Warum unterscheiden diese sich?

6.7 Großer Quellenscan

Führen Sie einen *RS Run* für 1.000.000 Events durch.

- Stellen Sie die Cluster pro Event und die Kanäle pro Cluster sinnvoll dar.
- Stellen Sie die Anzahl an Ereignissen pro Kanal dar (Hitmap)
- Stellen Sie das Energiespektrum in ADC-Werten und in keV dar.
- Bestimmen Sie den Mittelwert der deponierten Energie und den MPV¹⁴.
- Interpretieren Sie den Mittelwert und evaluieren Sie das Ergebnis.

7 Hilfe zur Durchführung der Messaufgaben

Auswerteskript

Um die Wahl einer beliebigen Auswertesoftware zu ermöglichen steht ein Auswerteskript zur Verfügung, dass die Messdaten in *.txt* Dateien konvertiert sowie einige Analyseschritte durchführt. Es wird ein Ordner zur Verfügung gestellt, der dieses Skript enthält. Die Messdaten sind in passende Unterordner abzulegen, sodass eine Durchführung des Skriptes möglich ist. Ist der Versuch abgeschlossen, muss das Pythonskript *execute.py* durchgeführt werden. Es ist zu beachten dass dies einige Minuten dauert.

Messung einer Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie wird nur über die Kontrolleinheit gesteuert. Trotzdem ist diese mit dem Computer zu initialisieren. Hierzu muss das System an den Computer angeschlossen sein und die Alibava-gui gestartet werden. Ist das System korrekt initialisiert, erlischt die rote LED und lediglich die grüne leuchtet durchgängig. Ist dies nicht der Fall, muss der Resetknopf auf der Rückseite der Kontrolleinheit gedrückt und die Software neu gestartet werden.

Das von Alibava entwickelte *Exercise Book* [Ali15] gibt eine Strom-Spannungs-Kennlinie gemäß Abbildung 7.1 an.

Bei der Vermessung ist so vorzugehen, dass zunächst über den Drehknopf die gewünschte Vorspannung eingestellt wird. Beachten sie, dass die Vorspannung von 0V vorsichtig von einer höheren Spannung aus eingestellt werden muss, da bei einem Weiterdrehen des Knopfes eine geringe Spannung in Durchlassrichtung angelegt wird, was den Sensor spontan leitend macht.

Warten Sie einige Sekunden vor Erfassung des Leckstroms und notieren Sie den Wert.

¹⁴Most Probable Value (dt. Wahrscheinlichster Wert)

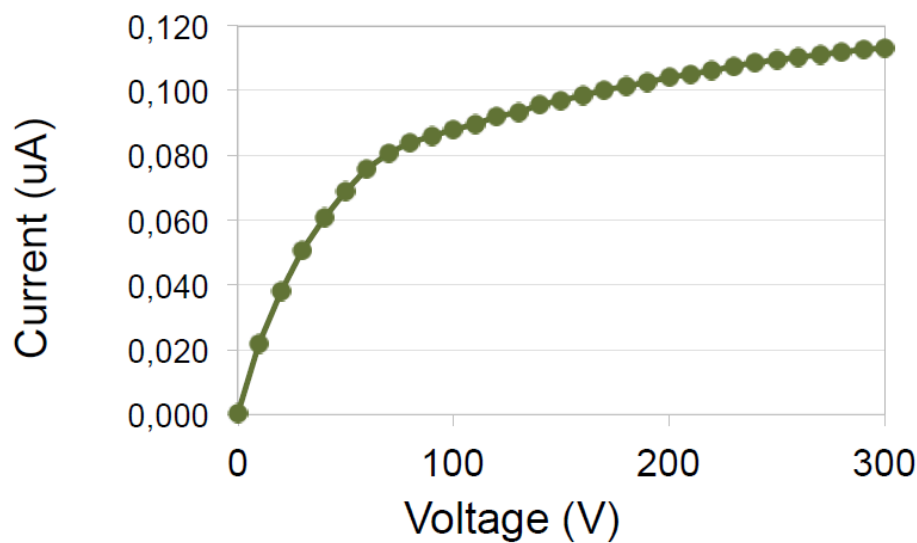


Abb. 7.1: Strom-Spannungs-Kennlinie bei nicht initialisiertem System (Alibava Systems)

Nach der Vermessung von 0 bis 199V ist der Leckstrom in Abhängigkeit zur angelegten Vorspannung zu plotten und aus der Graphik die Depletionsspannung abzuschätzen.

Auswertung der Pedestals und Noise

Es ist ein Pedestal Run durchzuführen, indem über *LogData* eine Datei unter *Pedestal/Pedestals.h5* gespeichert und **danach** ein Pedestal Run gestartet wird. Das Auswerteskript produziert eine Textdatei mit dem Namen *pedestals.txt*, die gemessenen Signale aller Channel für jedes Element beinhaltet. Die Auswertung ist mit Hilfe der Definitionen in Kapitel 4.4 durchzuführen.

Kalibrationsmessungen

Bei der Kalibrationsmessung sendet die Kontrolleinheit über das Flachbandkabel einen definierten Elektronenpuls an den BEETLE. Dies ist von Nöten, um im weiteren Verlauf der Versuchsaufgaben die ADC Counts in Ladung umrechnen zu können. Der BEETLE vermittelt daraufhin der Kontrolleinheit die gemessenen ADC Counts. Trägt man diese in Abhängigkeit zum gesendeten Elektronenpuls auf, erhält man die Kalibrationskurve für die Ladung. Dafür ist im Programmfenster über den Bereich (b) (vgl. Abbildung 5.7) die Option *Calibration Run* zu wählen. Über ein weiteres Programmfenster, welches sich durch Drücken auf *Calibration* öffnen lässt, können weitere Parameter eingestellt werden. Das Fenster ist in Abbildung 7.2 zu sehen.

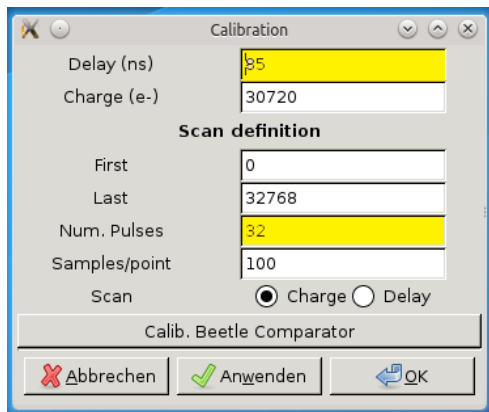


Abb. 7.3: Kalibrierungsmenü.

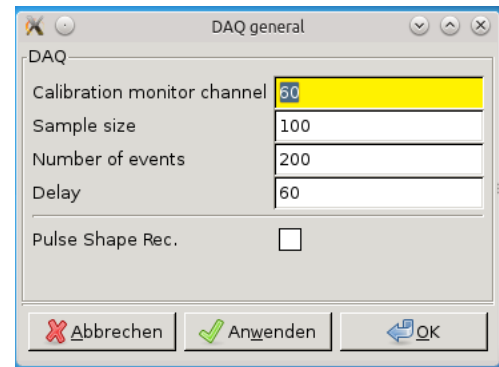


Abb. 7.4: DAQ general Menüübersicht.

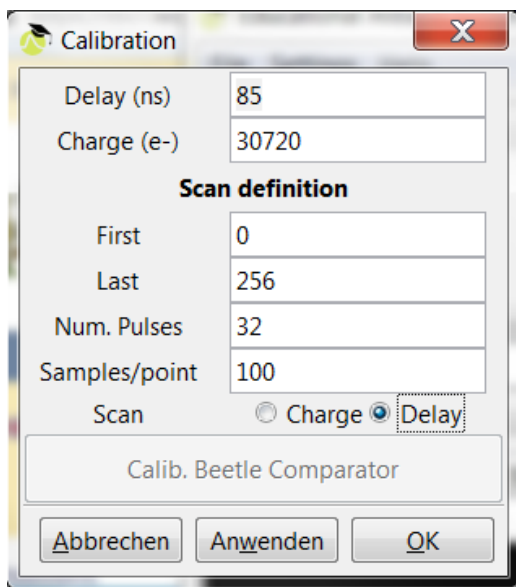


Abb. 7.2: Parameter des Calibration Run.

Zunächst ist ein *Delay* Scan durchzuführen. Dieser optimiert den Abstand zwischen Signal und Auslese des BEETLE. Das Maximum der entstandenen Kurve ist in dem Fenster unter *Delay (ns)* einzutragen. Typischerweise hat der Delay einen Wert um die 65ns.

Die anschließende *Charge* Messung ist von Nöten, um im weiteren Verlauf die ADC Counts in Ladung umrechnen zu können. Hier können die Scan Parameter variiert werden. First und Last definiert das Zeitfenster der Pulse. Die maximale Größe des gesendeten Elektronenpulses ist über Charge (e^-) einzustellen. Da jeweils nur ein Kanal untersucht wird, müssen verschiedene Kanäle des Chips (die mit jeweils einem Streifen verbunden sind) untersucht werden.

Die Option Samples/point definiert, wie viele Messungen pro Datenpunkt genommen werden und die Num.Pulses die Anzahl an Pulsen, die untersucht werden. Der minimal mögliche Puls umfasst 1024 Elektronen, sodass der größtmögliche Wert hier 256 Pulse umfasst.

Um den Streifen auszuwählen, der untersucht werden soll, ist unter dem Reiter *Settings*, wie in Abbildung 7.9 dargestellt, der Menüpunkt *DAQ* anzuklicken. Abbildung 7.4 gibt eine Übersicht über das Menüfenster. Dann ist im Fenster neben *Calibration monitor channel* die Streifennummer einzugeben.

Alle anderen Einstellung, die dort vorgenommen werden, ändern sich automatisch mit den Einstellungen, die man zuvor im *Calibration*-Menü eingegeben hat. Die Daten werden direkt aus der Graphik, die in Abbildung 7.5 angezeigt wird, entnommen und mit

einem Rechtsklick in einer Textdatei (im Ordner *Calib*) gespeichert. Schränken Sie bei der Bestimmung des Polynoms den Fitbereich soweit ein, dass ein sinnvoller Fit möglich ist.

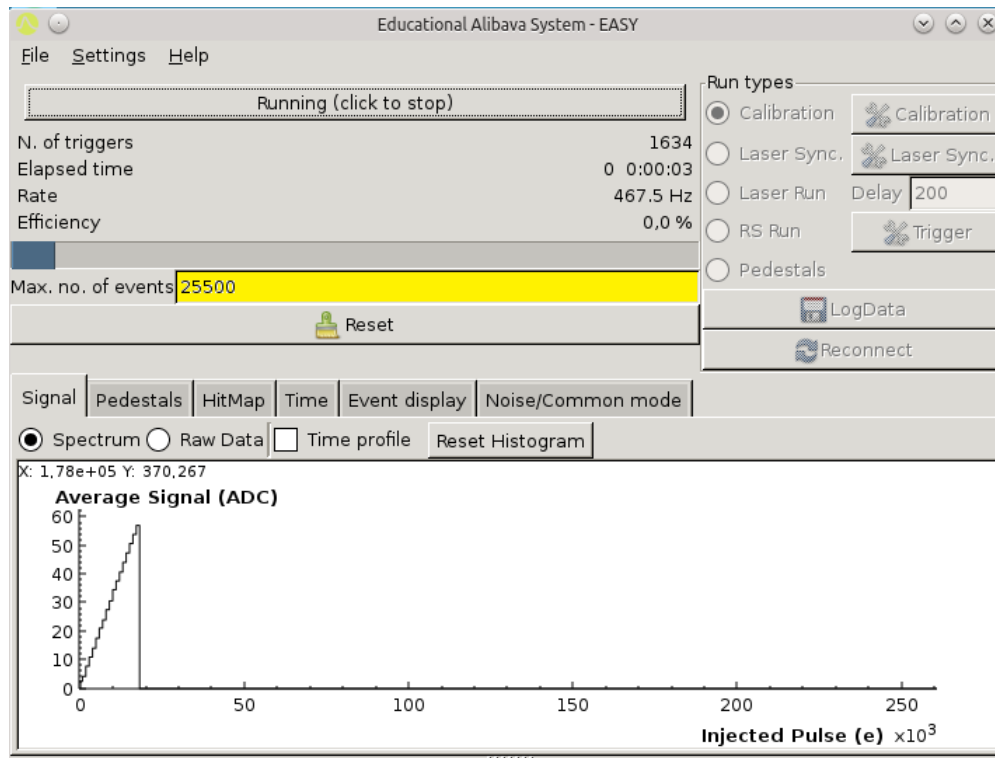


Abb. 7.5: Hauptmenü der Gui bei der Durchführung eines *Calibration Runs* am 60. Streifen.

Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers



Abb. 7.6: Glasfaserkabel zum Anschluss des Lasers. Der rote Kreis markiert die Erhebung, die in die Einkerbung des Sockels der Lasereinheit passt.

Die Streifenstruktur auf dem Halbleitersensor lässt sich mittels des Lasers erfassen, da dieser an der Metallisierung der Streifensensoren reflektiert wird und dort nicht in den Halbleiter eindringen kann und somit dort kein Signal entstehen kann. Durch das Vermessen einiger Perioden kann so aus dem Abstand der Minima der Abstand der Streifensensoren bestimmt werden.

Der Laser ist mittels Glasfaserkabel an die Kontrolleinheit anzuschließen und der Sensor mit der

in Aufgabe 6.2 bestimmten Depletionsspannung zu betreiben, da sonst kein Signal detektiert werden kann.

Die Erhebung an dessen Enden ist genau in die Einkerbung an den Anschlüssen anzubringen und daraufhin die Schraubverschlüsse sicher anzudrehen.

Zunächst ist der Laser mit dem System zu synchronisieren. Dazu wird der Betriebsmodus *Lasersync.* in Abschnitt (b) des Programmfensters gewählt und die Datenaufnahme gestartet.

Um die deponierte Ladung korrekt zu messen, muss das Zeitfenster zwischen Laserimpuls und Auslese der Daten optimiert werden. Die Graphikoberfläche zeigt unter dem Reiter Signal die gemessenen ADC Counts in Abhängigkeit zur Verzögerung zwischen Laser und Auslese. Aus dem Maximum ist die optimale Verzögerung in das Formularfeld neben *Laser Run* einzutragen. Die Daten der Messung sind über einen Rechtsklick zu speichern und zu plotten.

Zeigt sich kein Peak, liegt dies vermutlich daran, dass sich der Laser exakt über einer Metallisierung befindet. In diesem Fall kann über die horizontale Mikrometerschraube der Laser über den Sensor bewegt werden. Eine andere Möglichkeit ist, den Laser stark zu defokussieren, da so eine größere Fläche des Sensors getroffen wird.

Ist der Laser synchronisiert, ist über Bereich (b) des Programmfensters der *Laser Run* zu wählen. Unter dem Reiter Event Display kann das gemessene Signal der einzelnen Streifensensoren angezeigt werden. Durch Drehen der horizontalen Mikrometerschraube ist ein Maximum zu suchen. Danach wird über die vertikale Mikrometerschraube der Laser auf und ab bewegt, bis er fokussiert ist und somit den kleinstmöglichen Durchmesser auf dem Sensor hat. Dies ist daran zu erkennen, dass der Peak maximal wird, da das Signal in diesem Fall nur von einem Streifen erfasst wird.

Nach diesen Maßnahmen können die Laser Runs gestartet werden.

Da die Mikrometerschraube mit keiner Ausleseelektronik verbunden ist, muss zur Auswertung jeder Messpunkt als eigene .h5 Datei im Ordner Laserscan abgespeichert werden. Beginnen Sie die Benennung mit *Laser_1.h5*, starten Sie einen Laser Run und drehen Sie darauf die horizontale Mikrometerschraube 10µm weiter. Speichern Sie eine weitere .h5 unter dem Namen *Laser_2.h5* ab und fahren Sie so weiter fort, bis 35 Messpunkte erfasst sind.

Das Auswerteskript führt eine Korrektur mit Hilfe des Pedestalscans durch und gibt anschließend eine .txt Datei mit einer 35x128 Matrix aus. Diese enthält das mittlere Signal für jeden Kanal in jeder Positionierung. Bei der Durchführung ist zu überlegen, welche Kanäle in die Auswertung mit einbezogen werden.

Bestimmung der Charge Collection Efficiency (Laser)

Hier ist ähnlich vorzugehen wie in Messaufgabe 6.5. Die horizontale und vertikale Position des Lasers ist fix, während die angelegte Vorspannung variiert wird.

Der Laser ist wie in Aufgabe 6.5 zu fokussieren, und ein Maximum zu suchen. Daraufhin ist eine neue Messreihe zu beginnen, indem über *LogData* eine .h5 Datei im Ordner *CCEL* erstellt wird. Der Dateiname muss die angelegte Spannung enthalten und keine sonstigen Zahlen. Darauf hin ist der Laser Run zu starten. Über das Skript werden .txt Dateien erstellt, die für jede Messung den mittleren Wert jedes Kanals enthalten.

Um die Eindringtiefe des Lasers in den Sensor zu bestimmen ist über ein Plotprogramm ein Fit über die mittlere Eindringtiefe a aus Gleichung (19) durchzuführen. Hierbei ist nur der vom Laser getroffene Kanal im Bereich unterhalb der Depletionsspannung zu berücksichtigen. Sofern nötig können zusätzliche Fitparameter, z.B. zur Skalierung, eingefügt werden. Abbildung 7.7 zeigt die Theoriekurve der Charge Collection Efficiency des im EASy verbauten Sensors.

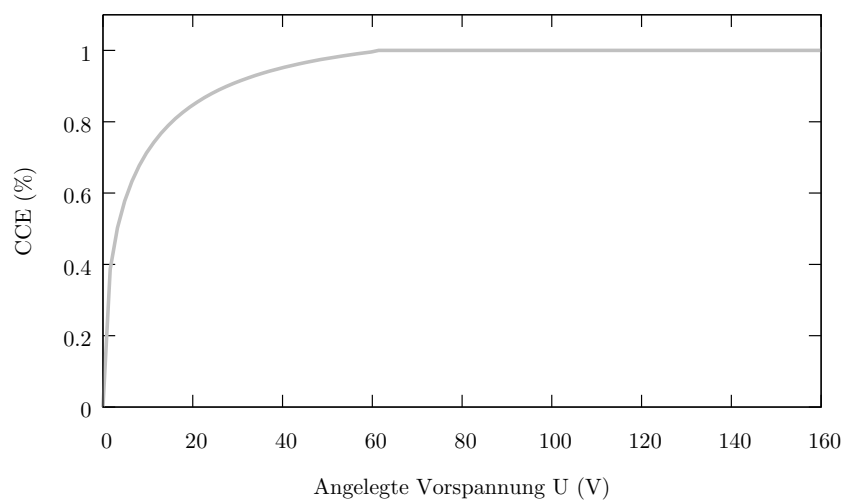


Abb. 7.7: Theoriekurve der Effizienz des Detektors in Abhängigkeit zur angelegten Vorspannung. Das Plateau beginnt bei $U_{dep} = 60\text{V}$, da der Sensor ab dieser Spannung voll depletiert ist.

Bestimmung der Charge Collection Efficiency (Quelle)

Für Bestimmung der Charge Collection Efficiency bei einer Quellenmessung ist vergleichbar vorzugehen. Bei verschiedenen Spannungen soll jeweils ein Quellenscan mit 10.000 Events durchgeführt werden. Das Abspeichern der Daten erfolgt wie im vorherigen Aufgabenteil, hier jedoch im Ordner *CCEQ*. Mit Hilfe des Auswerteskripts werden die Cluster aus den Rohdaten bestimmt. Mit Hilfe der Kalibration aus Aufgabe 6.4 ist die deponierte Energie in den einzelnen Kanälen auszurechnen und anschließend alle Einträge eines Clusters zu addieren. Daraufhin ist der Mittelwert der Clusterenergie zu bestimmen, welcher als Vergleichswert in der CCE-Messung dient. Für das bestmögliche Ergebnis der Datenaufnahme ist das Timing zu verändern. Dazu ist unter dem Reiter *Settings*, wie in Abbildung 7.9 ge-

zeigt, der Menüpunkt *Latency* auszuwählen und auf 129 zu setzen. So kann das maximale Datensignal, welches im Beetlechip generiert wird, aufgezeichnet werden. In das *Event*-Feld im Hauptmenü 7.5 ist die Anzahl an Events für die Datenaufnahme einzugeben.

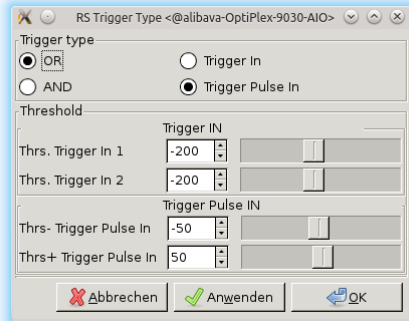


Abb. 7.8: Triggermenü für den *RS Run*.

Settings:

Data File Format	Ctrl+F
DAQ	Ctrl+D
Beetle	Ctrl+B
Trigger	Ctrl+T
Comparator	Ctrl+C
Analysis	Ctrl+A
Latency	Ctrl+Y
Load Pedestals	Ctrl+R
Save Pedestals	Ctrl+P

Abb. 7.9: Menüpunkte des Reiters *Setting* [Ali15].

Das *Trigger*menü ist über das Hauptmenü zu öffnen. Abbildung 7.8 zeigt das Pop-up Fenster. Im Bereich *Trigger type* sind *OR* und *Trigger Pulse In* zu markieren. Diese Einstellungen sorgen dafür, dass bei korrekter Verkabelung, die Diode als Trigger verwendet wird, um die Signale aufzuzeichnen. Ersteres sorgt dafür, dass bei Signalen über dem positiven Schwellenwert oder unter dem negativen Schwellenwert getriggert wird. Im Bereich *Threshold*¹⁵ sind die Schwellenwerte des *Trigger Pulse In* einzustellen. Der negative Wert ist bei *Thrs- Trigger Pulse In* auf - 50 und der positive Wert ist im darunterliegenden Fenster auf + 50 zu setzen. Die Werte sind Angaben im Millivoltbereich [Ali15]. Die Schwellenwerte dienen dazu ungewollte Signale herauszufiltern. Eine Messung wird mit der Auswahl *RS Run* gestartet

Es werden diverse *.txt* Dateien erstellt. In der Datei *Cluser_adc_entries.txt* ist in jeder Zeile ein einzelnes Clusters mit allen dem Cluster zugeordneten ADC Einträgen.

Großer Quellenscan

Die Vorspannung ist auf 110 V zu regeln. Die Datei ist unter dem Namen *RS_Run.h5* mit *LOGData* im Ordner *RSScan* zu speichern. Anschließend ist der *RS Run* zu starten.

Das Auswerteskript wertet die Daten mit einem Signal-to-Noise-Cut aus und bestimmt die *Pedestals*, die *Noise*, den *Common Mode* und generiert Cluster. Die Datei gibt vier *.txt*-Dateien aus, die entsprechend ihres Inhalts benannt sind.

Für die weitere Analyse ist die Umrechnung des ADC-Charge-Spektrums in ein keV-Spektrum mit Hilfe des Fits aus Aufgabe 6.7 durchzuführen.

¹⁵dt. Schwellenwert

Erklären Sie in welchem Bereich sinnvolle Ergebnisse zu erwarten sind und bestimmen Sie für diesen Bereich den Mittelwert und den MPV des Spektrums. Anhaltspunkte dafür sind das Kalibrierungsintervall und die zu erwartende Verteilung.

Literaturverzeichnis

- [Ali15] ALIBAVASYSTEMS (Hrsg.): *Activity Book for Students*. First Edition. Barcelona: Alibavasystems, 2015
- [Bet96] BETHGE, Prof. Dr. K.: *Kernphysik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [CER16] CERN: *Internetpräsenz CERN*. <http://home.cern/about/experiments>. Version: Jan 2016
- [Fra03] FRADEN, Jacob: *HANDBOOK OF MODERN SENSORS*. Third Edition. San Diego : Springer Science + Business Media, LLC, 2003
- [Har09] HARTMANN, F.: *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Berlin : Springer, 2009
- [Hil14] HILLERINGMANN, U.: *Silizium Halbleitertechnologie*. 6. Auflage. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- [Kit02] KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*. 13. Auflage. München : Oldenbourg Verlag, 2002
- [Kuc11] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. München : Carl-Hanser Verlag, 2011
- [Leo87] LEO, Dr. William R.: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987
- [Lid96] LIDE, D.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 77th Edition. Boca Raton : CRC Press, 1996
- [Peq08] PEQUENAO, Joao: *Computer generated image of the whole ATLAS detector*. <http://cds.cern.ch/record/1095924>. <http://cds.cern.ch/record/1095924>. Version: Mar 2008
- [PS13] PEQUENAO, Joao ; SCHAFFNER, Paul: *An computer generated image representing how ATLAS detects particles*. <https://cds.cern.ch/record/1505342>. <https://cds.cern.ch/record/1505342>. Version: Jan 2013
- [Rau] RAUSCH, Rene: *Periodensystem-online*. <http://www.periodensystem-online.de/index.php>
- [Sch14] SCHORLEMMER, Dr. A.: *Monitoring Radiation Damage in the ATLAS Pixel Detector*. Göttingen, Georg-August Univesität Göttingen, Diss., 2014

[Thu11] THUSELT, F.: *Physik der Halbleiterbauelemente*. Berlin Heidelberg : Springer, 2011