

V15

Vermessung und Untersuchung von Silizium-Streifensensoren

mit dem Educational Alibava System



Entwickelt von
Nora Held und Falko Barth
bearbeitet von
Felix Wizemann

tu technische universität
dortmund

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel des Versuches	1
1.2	Vorbemerkung	1
2	Der ATLAS-Detektor	1
3	Halbleiter	3
3.1	Allgemeines über Halbleiter	3
3.2	p- und n-Typ Halbleiter	4
3.3	Der pn-Übergang	5
4	Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung	7
4.1	Der beta-Zerfall	7
4.2	Wechselwirkung von Elektronen mit Materie	8
4.3	Energiespektrum im Silizium-Sensor	9
5	Versuchsaufbau	11
5.1	Detektoreinheit	11
5.2	Kontrolleinheit	14
5.3	Versuchsaufbau für Quellenmessungen	15
5.4	Diodentrigger	16
5.5	Pedestals und Noise	16
5.6	Analyse-System	17
6	Messaufgaben	18
6.1	Vorbereitende Aufgaben	18
6.2	Messung einer Strom-Spannungs-Kennlinie	18
6.3	Pedestals und Noise	18
6.4	Kalibrationsmessungen	18
6.5	Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers	19
6.6	Bestimmung der Charge Collection Efficiency	19
6.7	Großer Quellenscan	19
7	Hilfe zur Durchführung der Messaufgaben	20
	Literaturverzeichnis	25

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuches

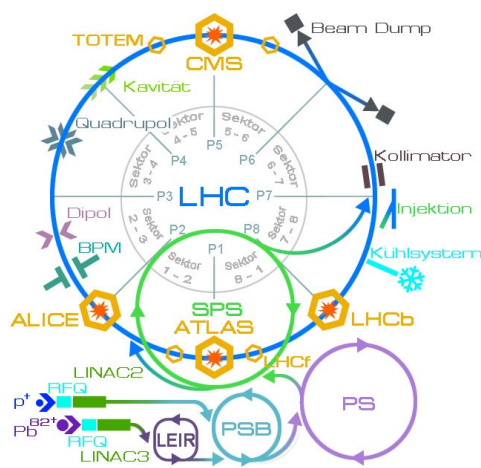
Mit diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Silizium-Halbleiterdetektors verständlich gemacht und dessen Eigenschaften in mehreren Versuchsaufgaben untersucht werden. Neben dem Sensor wird auch die Ausleseelektronik und die Datenverarbeitung betrachtet. Die gewonnenen Daten und deren Verarbeitung 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. Dieses System erlaubt, 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.

2 Der ATLAS-Detektor



Das Kernforschungszentrum CERN in Genf hat sich zur Aufgabe gemacht, die Struktur der Materie zu erforschen.

Der LHC hat einen Umfang von knapp 27 km. An ihm befinden sich insgesamt vier große Experimente: ALICE, LHCb, CMS und ATLAS, in denen Protonen zur Kollision gebracht werden. Abbildung 2.1 zeigt dies und weitere Bestandteile. Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Darstellung des ATLAS Detektors.

Abb. 2.1: Experimente des LHC. (CERN) Der ATLAS Detektor ist zylindrisch um das Strahlrohr aufgebaut, in welchem die Teilchen kollidieren. Er ist in mehreren Schichten aufgebaut.

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

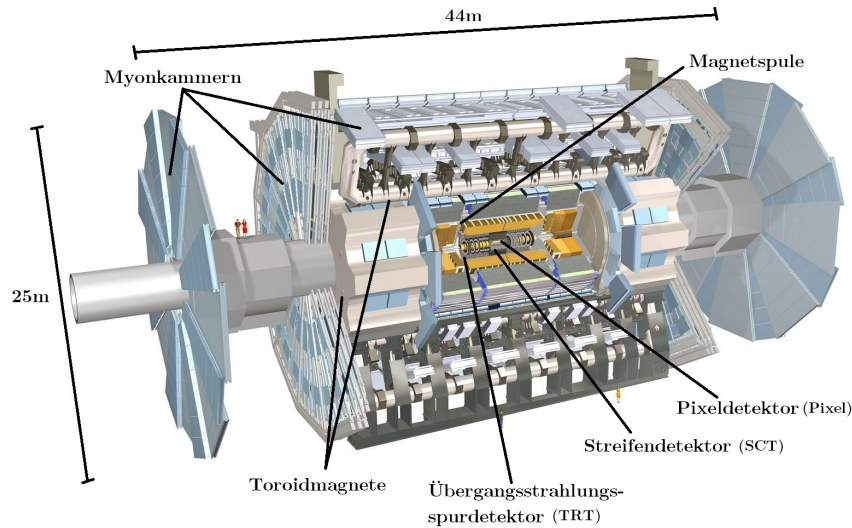


Abb. 2.3: Schematische Zeichnung des ATLAS Detektors. ([Peq08], bearbeitet)

Direkt am Strahlrohr sitzt der sogenannte *Inner Detector* (ID), der derzeit (2018) aus dem *Pixeldetektor*, dem *Silizium-Streifendetektor* (SCT³) und dem *Übergangsstrahlungsspurdetektor* (TRT⁴) besteht.

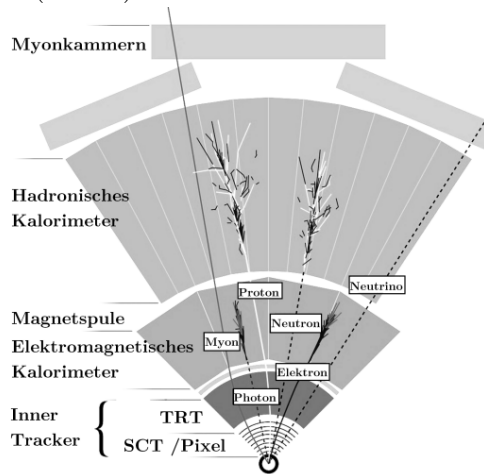


Abb. 2.2: Querschnitt des ATLAS Experiments und schematische Darstellung der Teilchenspuren. ([PS13], bearbeitet)

Pixelsensoren unterscheiden sich von Streifendetektoren durch eine höhere Strukturierung und besitzen somit eine höhere Ortsauflösung. Da Pixelsensoren jedoch in der Herstellung teurer sind, finden sie nur in den innersten Lagen des ID Anwendung.

Der ID ist von einer Magnetspule umgeben. Geladene Teilchen werden so durch die Lorentzkraft auf gekrümmte Bahnen abgelenkt. Aus der Bahn, die aus den Messergebnissen des ID errechnet werden kann, werden Impuls und Ladung der Teilchen berechnet. Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf einiger Teilchenspuren in ATLAS.

chenspuren in ATLAS.

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 mrad verdreht sind. Hierdurch kann die Auflösung längs der Streifen verbessert werden.

³Semiconductor Tracker

⁴Transition Radiation Tracker

Insgesamt besteht der SCT 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 Ladungsträger im Leitungsband 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" kann als Quasiteilchen mit einer effektiven Masse betrachtet werden. Das Elektron ist ohne äußere Krafteinwirkung an das Coulombfeld des Atomrumpfes gebunden, sodass es wieder zur Rekombination kommt. Wird jedoch ein elektrisches Feld



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.

angelegt, wandern die Elektronen zur Anode, während die Löcher in die entgegengesetzte Richtung bewegen.

Bei diesem Prozess spricht man von Eigenleitung. Silizium als intrinsischer Halbleiter hat eine Ladungsträgerdichte von $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Um die Leitfähigkeit eines Halbleiterkristalls 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.

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 p-typ und einem n-typ Halbleiter unterschieden.

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 als Element der fünften Hauptgruppe fünf Elektronen in der Valenzschale, sodass eines 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. Man spricht daher bei Arsen, welches in Silizium dotiert wird, von einem *Donator*⁷.

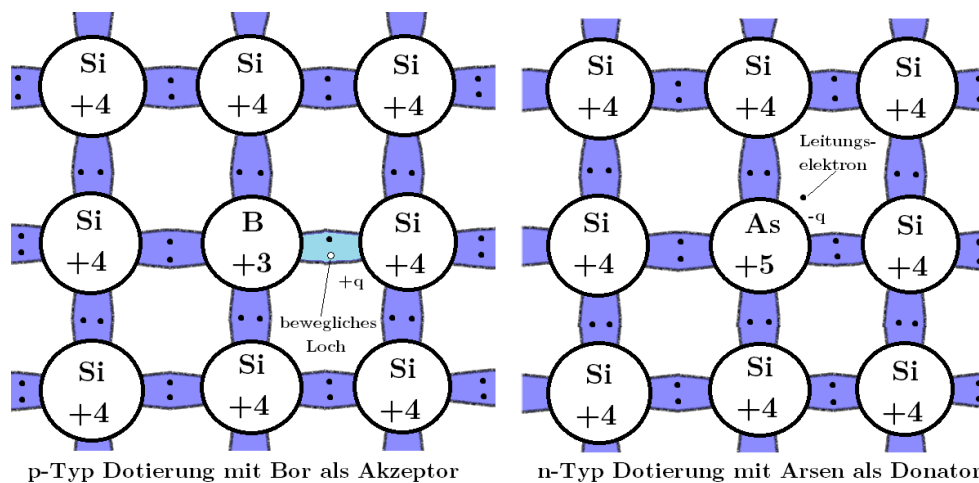


Abb. 3.2: Schematische Darstellung einer n- und p-typ Dotierung in zwei Dimensionen. (ähnlich [SL13])

⁶lat. dotare = ausstatten

⁷lat. donare = schenken

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 Boratom ersetzt im Kristallgitter ein Siliziumatom. Da es sich um ein Element der dritten Hauptgruppe handelt, sind nur die drei Elektronen in der Valenzschale an der Bindung zu den vier Nachbaratomen beteiligt.

Die Verbindung ist zwar elektrisch neutral, jedoch fehlt in der Gitterstruktur ein bindendes Elektron in einer der kovalenten Bindungen. Durch Elektroneneinfang kann das hier entstandene Loch gefüllt werden, daher wird ein solches Fremdatom in einem Silizium-Kristall auch als Akzeptor⁸ bezeichnet. Somit kann das Loch als freier Ladungsträger mit positiver Ladung betrachtet werden.

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.

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 Eigenschaft des pn-Übergangs einer einfachen Diode ist auch elementar für Halbleiter-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. Durch die ortsfesten Atomrümpfe 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. U_D hat die Größenordnung einiger mV [Har09].

Für die Detektion von Teilchen 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 wie folgt von der angelegten

⁸lat. acceptare = annehmen

Vorspannung U ab:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_D + U)}{qN_{\text{eff}}}} \quad , \quad (1)$$

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 (2) beschrieben wird. N_D und N_A sind die jeweiligen Dotierungskonzentrationen von Donatoren und Akzeptoren.

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \quad (2)$$

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 (1) die Abschätzung:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon U}{qN_{\text{eff}}}} \quad . \quad (3)$$

Und da die Dicke der Depletionszone ihr Maximum bei U_{dep} erreicht, folgt nach Umstellen von Formel (3)

$$U_{\text{dep}} \approx \frac{q}{2\varepsilon} N_{\text{eff}} D^2 \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} d_c(U) &= D \sqrt{\frac{U}{U_{\text{dep}}}} && \text{für } U < U_{\text{dep}} \\ d_c(U) &= D && \text{für } U \geq U_{\text{dep}} \quad . \end{aligned} \quad (5)$$

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.

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 ungewollten Elektron-Loch Paaren, welche dann durch die angelegte Vorspannung in der Depletionszone 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

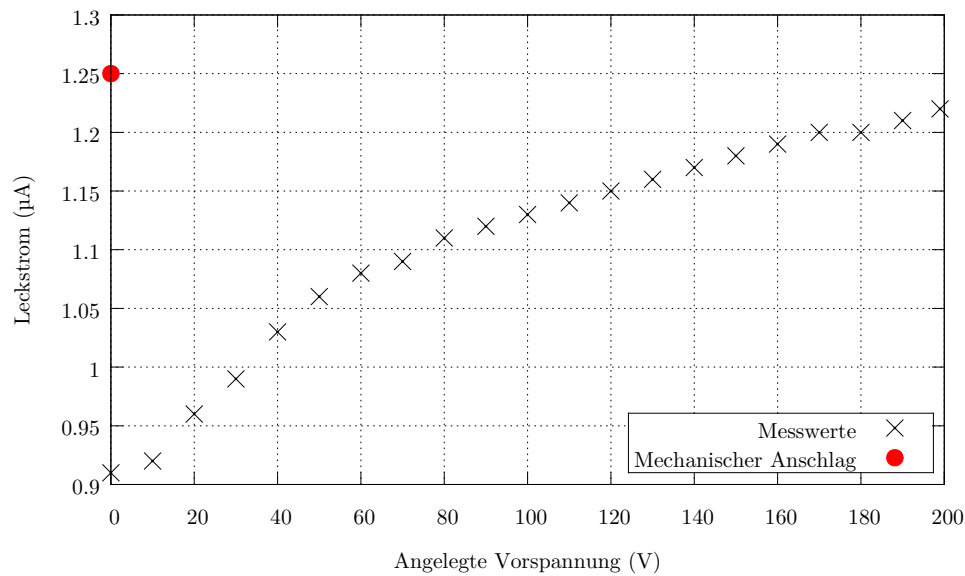


Abb. 3.3: Strom-Spannungs-Kennlinie des Educational Alibava Systems. Aus der Abflachung der Kurve bei 60V lässt sich die Depletionsspannung U_{dep} abschätzen. Zu beachten ist, dass der Einstellknopf für die Vorspannung nicht auf den mechanischen Anschlag gedreht wird, da hier die Spannung minimal in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

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 6 definiert und besitzt die

Dimension $Bq = [\frac{1}{s}]$ [Bet96]:

$$A = \lambda N = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

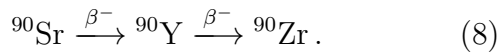
N_0 gibt die Zahl der Kerne bei Beobachtungsbeginn des Zerfalls an. λ ist die sogenannte Zerfallskonstante des primären Zerfalls.

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

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (7)$$

Ein typisches Energiespektrum eines β -Emitters ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Spektrum entsteht, da die Zerfallsenergie auf das Elektron, das Antineutrino und den Atomkern aufgeteilt werden

Die emittierten β^- -Teilchen der ^{90}Sr Quelle sind Elektronen mit einer kinetischen Energie, die maximal 0,546 MeV beträgt [Leo87]. Die Zerfallskette von ^{90}Sr ist wie folgt [Rau]:



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

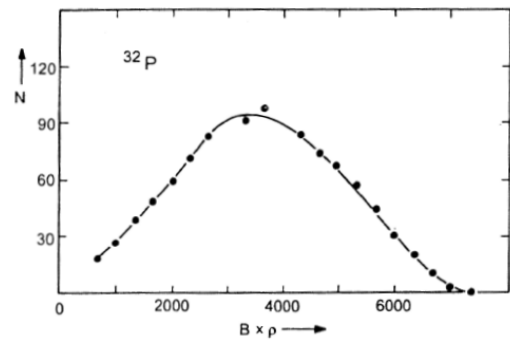


Abb. 4.1: „Elektronenspektrum eines β -Zerfalls, gemessen mit einem Magnetspektrometer“ [Bet96].

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 Stoß mit dem Kern und Stöße mit Elektronen der Atomhülle. [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.

Der Nachweis von Elektronen, die den Silizium-Sensoren durchqueren, geschieht über die Ionisation der Atome im Kristallgitter durch Stöße mit Hüllenelektronen. Die Energie, die das Elektron dabei im Schnitt pro Strecke verliert, wird für Elektronen durch die

modifizierte Bethe-Bloch-Gleichung bestimmt [Leo87]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a m_e c \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{\tau^2(\tau + 2)}{2(I/m_e c^2)^2} \right) + F(\tau) - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (9)$$

Dabei hat τ die Einheit $m_e c^2$ und entspricht der kinetischen Energie. Für Gleichung 9 ist $F(\tau)$ und τ wie folgt bestimmt.

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\frac{\tau^2}{8} - (2r_e + 1)\ln 2}{(\tau + 1)^2} \quad \text{mit} \quad \tau = \gamma - 1 \quad (10)$$

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

Aus der modifizierten Bethe-Bloch-Formel folgt, dass die durchschnittliche Energiedispo-

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

sition eines ionisierenden Elektrons der maximalen Energie des Primärzerfalls von ^{90}Sr in reinem Silizium bei 3,88 MeV/cm liegt.

4.3 Energiespektrum im Silizium-Sensor

Für Siliziumsensoren ist als Folge des zentralen Grenzwertsatzes bei einer hinreichenden Dicke eine Gaußverteilung als Spektrum der deponierten Energie von durchquerenden Elektronen zu erwarten [Leo87].

In dünneren Sensoren, wie dem Sensor in diesem Versuch mit einer Dicke von 300 μm , 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. Dies sorgt dafür, dass die Energieverteilung asymmetrisch wird und einer Landau-Verteilung gleicht [Ali15].

In dünnen Silizium-Sensoren ist zudem zu beachten, dass die Elektronen der β -Quelle nicht monoenergetisch sind. Deswegen beschreibt die Faltung einer Gauß-Verteilung mit einer Landau-Verteilung das Spektrum der deponierte Energie am genauesten [Sch14]. Ein solches ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Der MPV⁹ ist der wahrscheinlichste Energieverlust, welcher in einer Landau-Verteilung unterhalb des mittleren Energieverlustes liegt.

Zu beachten ist, dass die Ladungsdeposition stets in ADC-Charges bzw. Counts¹⁰ 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.

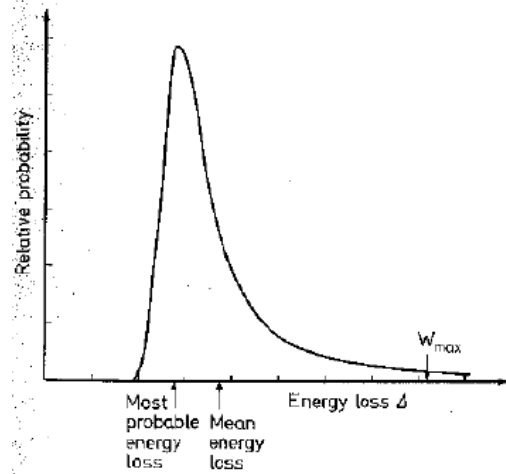


Abb. 4.2: Typisches Spektrum einer Energie-disposition eines Elektrons in einem dünnen Sensor [Leo87].

⁹Most Probable Value (dt. Wahrscheinlichster Wert)

¹⁰Einheit der Ausgabe des Analog-Digital-Konverter(ADC)

5 Versuchsaufbau

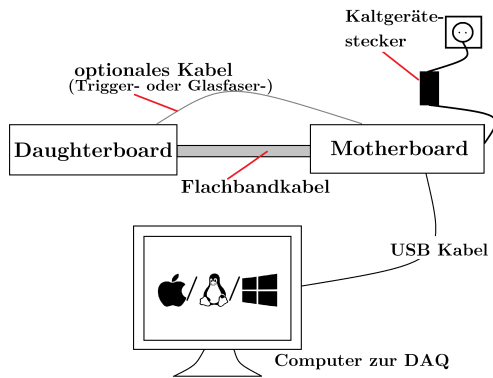


Abb. 5.1: Schaltplan zum Aufbau von Alibava EASy. (Auszüge aus iconarchive.com)

Anschließend wird die Kontrolleinheit 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.

Das Alibava EASy ist ein Detektorsystem bestehend aus drei Komponenten: der Kontrolleinheit, der Detektoreinheit und einem Computer, über den die Datenaufnahme gesteuert wird. Die Software zur Steuerung des Systems erfolgt über die Alibava-gui¹¹.

Detektor- und Kontrolleinheit werden zunächst über ein Flachbandkabel verbunden, welches den Detektor mit Spannung versorgt und Daten an und Steuersignale von der Kontrolleinheit überträgt. Zudem können je nach Messung ein Glasfaser oder ein Triggerkabel notwendig sein.

5.1 Detektoreinheit

In der Detektoreinheit befindet sich der Halbleitersensor und die zugehörige Ausleseelektronik. Der Siliziumsensor ist vergleichbar mit denen des ATLAS-Experiments und in 128 Streifen unterteilt. Der verwendete Auslesechip (BEETLE) ist über Wirebonds mit den Streifen des Sensors verbunden. Der BEETLE Chip findet Verwendung im LHCb Experiment.

Eingehende Ladungssignale werden im BEETLE Chip 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 Signale 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 $U_{dep} \approx 60$ bis 80 V [Ali15]. Die angelegte Spannung kann an der Kontrolleinheit eingestellt werden. Es ist ausschließlich ein Betrieb in Sperrichtung möglich.

Auf der Oberseite der Detektoreinheit befindet sich eine verschiebbare Plattform, die das

¹¹gui = graphical user interface (dt. Grafische Benutzeroberfläche)

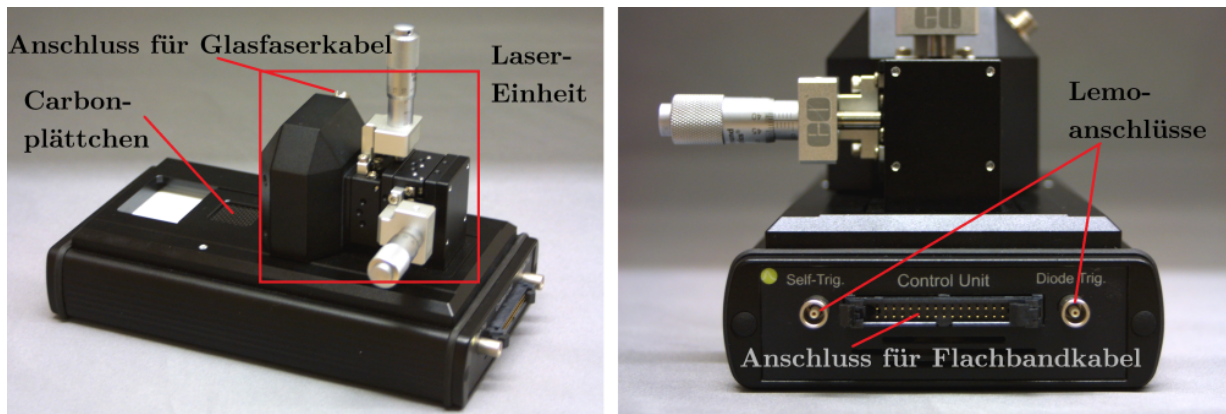


Abb. 5.2: Detektorreinheit in Aufsicht und Vorderansicht.

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.

Der Halbleitersensor

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 wird¹². 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. 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 kapazitiv 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].

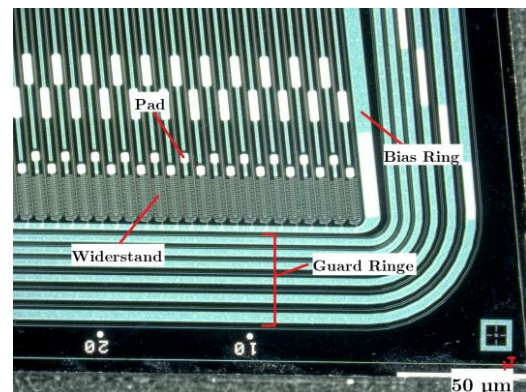


Abb. 5.3: Makroskopische Aufnahme eines Streifensensors (Foto: J. Lönker).

¹²Anmerkung: 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].

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. Auf Grund der ausgelesenen p-Implantate in einer n-basis wird ein solcher Sensor als p-in-n Sensor bezeichnet.

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 Ladungssammlung, kurz CCE¹³, der Messung steigt mit der Dicke der Depletionszone, bis sie bei U_{dep} ihr Maximum erreicht.

Für den eingebauten Laser ergibt sich mittels Formel (5) folgender Zusammenhang für die CCE des Detektors:

$$CCE(U) = \frac{1 - \exp\left(\frac{-d_c(U)}{a}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-D}{a}\right)} \quad (11)$$

mit der Dicke der Depletionszone d_c gemäß Gleichung (5), 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]. Bei der Detektion von Elektronen ist die CCE proportional zur Dicke der Depletionszone.

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].

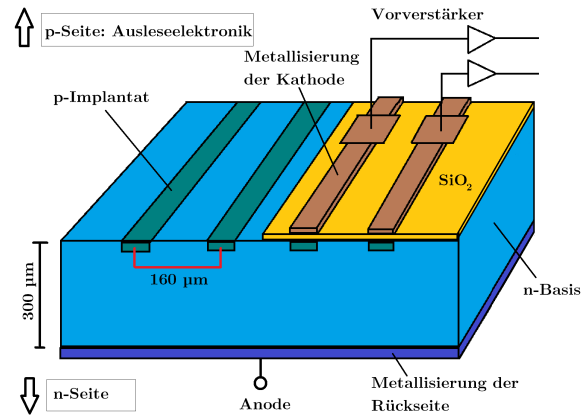


Abb. 5.4: Schematisches Schrägbild des im EASy verbauten Sensors. Die n-Seite wird über einen Anschluss mit Spannung versorgt, während die Elektroden auf der p-Seite einzeln ausgelesen werden können (nach [Ali15]).

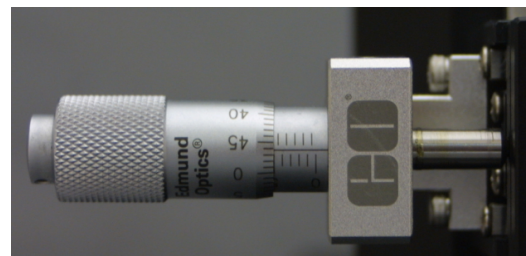


Abb. 5.5: Horizontale Mikrometerschraube zur Positionierung des Lasers über dem Sensor.

¹³Charge Collection Efficiency

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. Die horizontale Mikrometerschraube dient zur Positionierung des Lasers über den Streifen.

5.2 Kontrolleinheit

Die in Abbildung 5.6 zu erkennende Kontrolleinheit dient zur Steuerung der Detektoreinheit. Über den Drehknopf "Diode Bias" kann die Vorspannung des Sensors eingestellt werden. Der fließende Leckstrom wird über ein Amperemeter der Kontrolleinheit registriert und ist in $0,01\mu\text{m}$ -Schritten 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 dienen für das Triggerkabel bei der Quellenmessung.



Abb. 5.6: Kontrolleinheit von EASy.

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 leitend. Dies erklärt den rot markierten Wert in Abbildung 3.3.

In Abbildung 5.7 ist das Alibava-gui zu sehen, über welche das Alibava System gesteuert wird. Mit (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

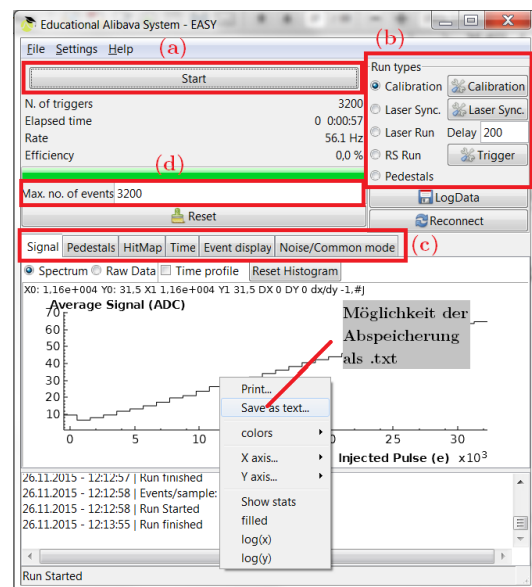


Abb. 5.7: Programmfenster der Alibava-gui.

Durch Rechtsklick auf die Graphiken

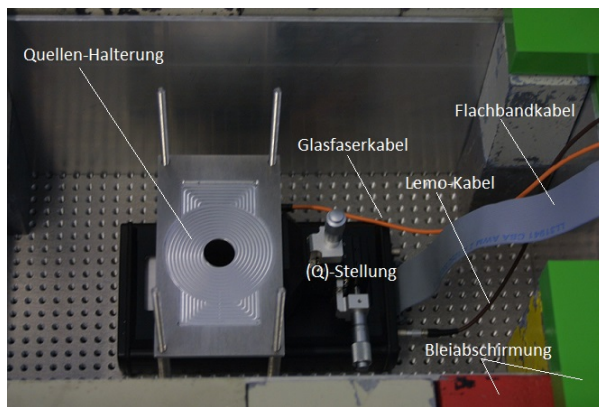


Abb. 5.8: Aufsicht der Detektoreinheit in (Q)-Stellung mit angeschlossenem Flachbandkabel und Lemo-Kabel in der Bleiabschirmung.

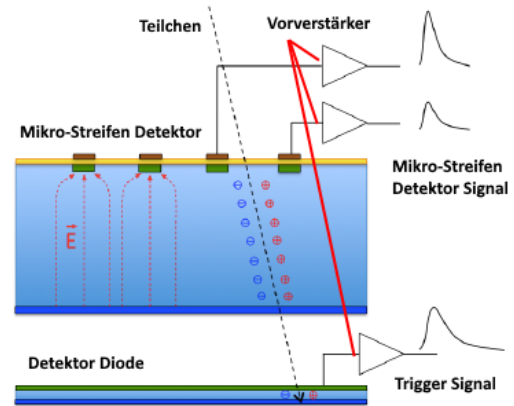


Abb. 5.9: Bearbeitete schematische Darstellung eines Querschnitts durch den Sensor und der Diode des im EASy verbauten Sensors [Ali15].

können die dargestellten Messwerte als .txt abgespeichert werden. Abspeichern der Daten in .h5 Dateien ist möglich, in dem vor der Messung über LogData eine Datei angegeben wird.

5.3 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 Vorhergehensweise für die neue Verkabelung ist genauso, wie im ersten Teil der Versuchsanleitung¹⁴ 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 einzustecken. 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 und somit durchlässig für ionisierende Strahlung wie Elektronen [Ali15] ist. 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.

¹⁴Seite 13

5.4 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].

Wichtig für die Quellenmessungen ist eine zusätzliche Siliziumdiode. Sie ist mehrere Millimeter unter dem Streifensensor positioniert und wird durch eine modulinterne Spannungsquelle versorgt, die nicht extern steuerbar ist. 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. Registriert diese Diode ein Teilchendurchgang, wird ein Triggersignal ausgelöst, woraufhin die Kontrolleinheit den BEETLE Chip auslöst.

5.5 Pedestals und Noise

Durch den Sensor selbst und 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 $ADC(i, k)$ Count, der für ein Signal k bei einem Streifen i entsteht, ist in Gleichung 12 dargestellt.

$$ADC(i, k) = P(i, k) + D(k) + \text{Signal}(i, k) \quad (12)$$

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

$$P(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N ADC(i, k). \quad (13)$$

Jeder der 128 Kanäle hat ein Pedestal Offset von etwa 500 ADC Counts. Der *Common Mode Shift* $D(k)$ beschreibt eine globale, alle Streifen betreffende, Störung während eines Events. Es wird wie folgt ermittelt:

$$D(k) = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (ADC(i, k) - P(i)). \quad (14)$$

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 RMS¹⁵ der ADC counts nach Abzug der Pedestal und des Common Mode Shifts bestimmt wird:

$$\text{Noise}(i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\text{ADC}(i, k) - P(i) - D(k))^2}. \quad (15)$$

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.

5.6 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 Signal-to-Noise-Cut soll das relevante Signal vom Rauschen unterschieden werden. Dies geschieht indem das Signal, welches durch das durchfliegende β^- -Teilchen erzeugt wird, durch das Rauschen des Streifens geteilt wird. Das wird mit dem gesetzten S/N_{textcut} (in diesem Versuch: 5) verglichen. Ist das Signal größer, so wird es weiter in der Analyse berücksichtigt.

Durch verschiedene Effekte kann es zu einer Bildung von Clustern kommen, das heißt, dass mehrere benachbarte Streifen ein Signal sehen. Bei einem Teilchendurchgang in der Nähe des Randes eines Streifens kommt es zu Charge Sharing. Hierbei geht die deponierte Ladung auf zwei verschiedene, benachbarte Streifen. Bei dem Effekt des Crosstalks induziert ein Signal in der Auslekette eines Streifens ein Signal im benachbarten Streifen. Teilchenbahnen, die nicht senkrecht zur Oberfläche sind, können zudem durch mehrere Streifen verlaufen.

¹⁵Root-Mean-Square

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 13 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

Messen Sie eine Strom-Spannungs-Kennlinie in 10V Schritten und bestätigen sie die vom Hersteller genannte Depletionsspannung aus Abschnitt 5.1. Für die folgenden Messungen, sofern nicht anders verlangt, 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) Plotten Sie einen Überblick über die Pedestals und das Noise für die einzelnen Streifen.
- b) Stellen Sie die Werte des Common Mode sinnvoll graphisch 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 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* 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.
- b) Untersuchen Sie die Struktur des Streifensensors, indem Sie für 35 Punkte im Abstand von 10 μm 1000 events aufnehmen.
- c) Plotten Sie das Signal relevanter Streifen in Abhängigkeit zur Laserposition. Bestimmen Sie daraus b) den *pitch* der Streifen, die Ausdehnung des Lasers auf diesem und vermerken Sie die Streifennummern.

6.6 Bestimmung der Charge Collection Efficiency

Unter Verwendung eines Lasers

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 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 Fit mit Gleichung (11).

Unter Verwendung einer β^- -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 mittlere 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.

- a) Stellen Sie die Cluster pro Event und die Kanäle pro Cluster sinnvoll dar.
- b) Stellen Sie die Anzahl an Ereignissen pro Kanal dar (Hitmap)
- c) Stellen Sie das Energiespektrum in ADC-Werten und in keV dar.
- d) Bestimmen Sie den Mittelwert der deponierten Energie und den MPV.
- e) 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.

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, wodurch der Sensor leitend wird.

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

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 5.5 durchzuführen.

Kalibrationsmessungen

Bei der Kalibrationsmessung sendet die Kontrolleinheit über das Flachbandkabel einen definierten Elektronenpuls an den BEETLE. Dies ist nötig, 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 des 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 7.1 zu sehen.

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* einzutragen im *DAQ general* Fenster einzutragen. Dieses ist unter dem Reiter *Settings* der Menüpunkt *DAQ*. Typischerweise hat der Delay einen Wert um die 65ns. Im selben Menü kann der zu untersuchende Kanal ausgewählt werden, wie in Abbildung 7.2 dargestellt.

Die Option *Samples/point* im *Calibration* Menü definiert, wie viele Messungen pro Datenpunkt genommen werden und die *Num.Pulses* die Anzahl an Pulsen, die untersucht werden.

Die Daten werden direkt aus der Graphik 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.

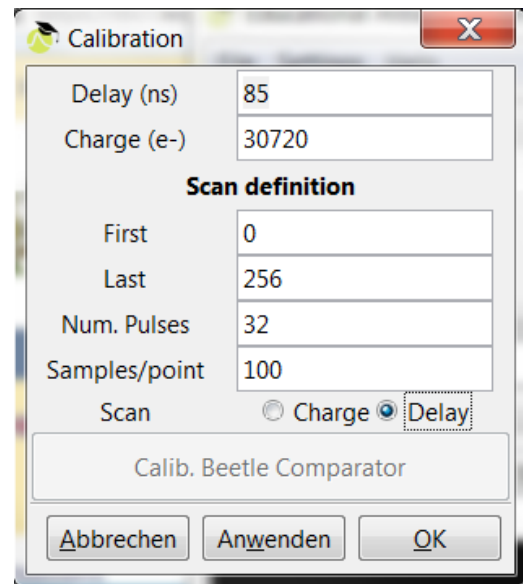


Abb. 7.1: Parameter des Calibration Run.

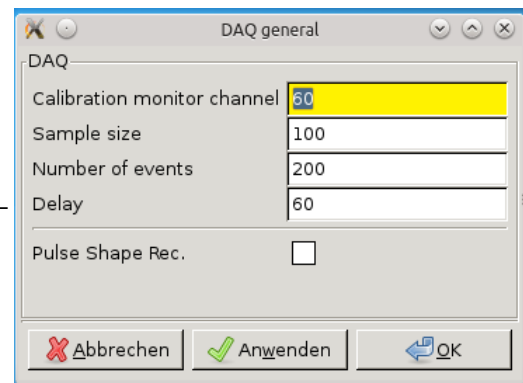


Abb. 7.2: *DAQ general* Menüübersicht.

Vermessung der Streifensensoren mittels des Lasers

Die Streifenstruktur auf dem Halbleitersensor lässt sich mittels des Lasers erfassen, da dieser an der Metallisierung in der Mitte der Streifen 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.

Zunächst ist der Laser mit dem System zu synchronisieren. Dazu wird der Betriebsmodus *Lasersync.* in Abschnitt (b) des Programmfensters gewählt und die Datenaufnahme gestartet. Die Graphikoberfläche zeigt unter dem Reiter *Signal* die gemessenen ADC Counts in Abhängigkeit zur Verzögerung zwischen Laser und Auslese. Aus



Abb. 7.3: Glasfaserkabel zum Anschluss des Lasers.

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 Streifen 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.

Zur Auswertung muss 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 mit dem mittleren Signal für jeden Kanal in jeder Positionierung aus. In einem Plot sind nun die positionsabhängige Signale der relevanten Kanäle darzustellen, sodass für alle Kanäle mit eindeutigem Signal alle Punkte dargestellt sind.

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

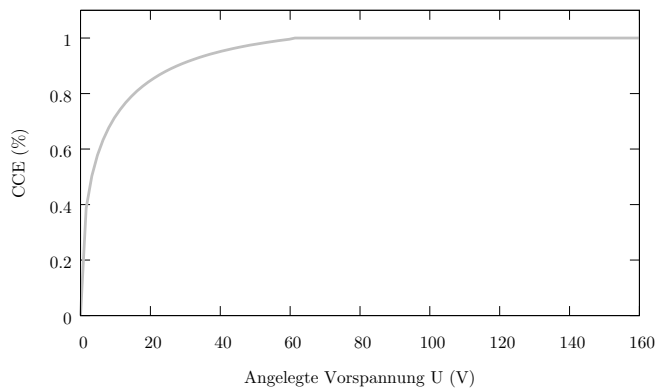


Abb. 7.4: Theoriekurve der Effizienz des Detektors in Abhängigkeit zur angelegten Vorspannung. Das Plateau beginnt bei $U_{dep} = 60V$, da der Sensor ab dieser Spannung voll depletiert ist.

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 (11) 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 7.4 zeigt die Theoriekurve der Charge Collection Efficiency.

Bestimmung der Charge Collection Efficiency (Quelle)

Für die 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. Addieren sie die Einträge eines Clusters auf und nutzen sie den Mittelwert der Counts in einem Cluster als Vergleichswert. Für korrektes Timing muss im Reiter *Settings* der Menüpunkt *Latency* ausgewählt und auf 129 gesetzt werden. In das *Event*-Feld ist die Anzahl an Events für die Datenaufnahme einzugeben.

Das *Triggermenü* ist über das Hauptmenü zu öffnen und die Werte wie in Abbildung 7.5 einzustellen. Eine Messung wird mit der Auswahl *RS Run* gestartet

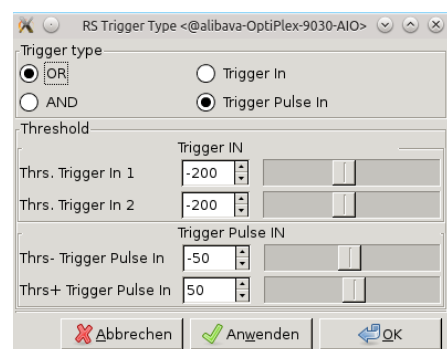


Abb. 7.5: Triggermenü für den RS Run.

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 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. Rechnen sie hierfür die einzelnen ADC-count Einträge in Energien um und addieren sie dann alle Energien eines Clusters auf.

Literaturverzeichnis

- [Ali15] ALIBAVASYSTEMS (Hrsg.): *Activity Book for Students*. First Edition. Barcelona: Alibavasytems, 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
- [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
- [SL13] SZE, S. ; LEE, M.-K.: *Semiconductor devices : physics and technology*. 3rd ed. Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2013