

UNIVERSITÄT SIEGEN

BACHELORARBEIT

**Optimierung des Source-Scan-Setups zur Qualitätskontrolle
von ITk-Pixelmodulen im Rahmen des HL-LHC Upgrades
des ATLAS-Detektors**

Mara Fries

Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

vorgelegt der

Experimentellen Teilchen- und Astroteilchenphysik
Department Physik

Gutachter

Prof. Dr. Markus Cristinziani

24. September 2025

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende schriftliche Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinne nach entnommen sind, wurden in jedem Fall unter Angabe der Quellen (einschließlich des World Wide Web und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen) kenntlich gemacht. Dies gilt auch für die beigegebenen Zeichnungen, bildlichen Darstellungen, Skizzen und dergleichen. Mir ist bewusst, dass jedes Zuwiderhandeln als Täuschungsversuch zu gelten hat, der die Anerkennung der Arbeit ausschließt und weitere angemessene Sanktionen zur Folge haben kann.

Siegen,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Markus Cristinziani

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der ATLAS Detektor	3
2.1	Der Aufbau des ATLAS Detektors	4
2.2	Der Innere Detektor	5
2.2.1	Aktueller Aufbau des Inneren Detektors	5
2.2.2	Geplanter Aufbau des ITk	6
3	Die Pixelmodule	9
3.1	Detektionsprinzip der Pixeldetektoren	10
3.2	Produktion der Pixelmodule	10
3.3	Der Source-Scan	12
4	Radioaktivität	13
4.1	Betastrahlung	14
4.2	Strontium-90-Zerfall	15
4.3	Abschirmung von Betastrahlung	15
5	Pixelmodul-Testaufbau	19
5.1	Strahlenschutz	20
6	Optimierung der Strahlungsintensität für den Source-Scan	21
6.1	Allgemeine Untersuchungen zur Bestrahlung	21
6.2	Probleme beim Source-Scan und deren Behebung	21
7	Zusammenfassung und Ausblick	27
	Literatur	29
	Abbildungsverzeichnis	31
	Tabellenverzeichnis	33

Einleitung

Der Large Hadron Collider (LHC) ist der größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger weltweit. Physiker und Physikerinnen aus der ganzen Welt verwenden den LHC, um die fundamentalen Teilchen und Wechselwirkungen unseres Universums experimentell zu untersuchen. Im Jahr 2012 konnten sie so das Higgs-Boson experimentell bestätigen [1]. Der LHC befindet sich unterirdisch nahe Genf und hat einen Umfang von etwa 27 km. In diesem Ring bestehend aus supraleitenden Magneten und Beschleunigern werden gegenläufige Teilchenstrahlen an vier unterschiedlichen Orten zur Kollision gebracht. An diesen Orten befinden sich die vier Detektoren ATLAS, CMS, ALICE und LHCb [1]. Seit dem Frühjahr 2015 finden die Proton-Proton-Kollisionen mit einer Schwerpunktsenergie von 13,6 TeV statt. Unter dem High-Luminosity-LHC-Projekt (HL-LHC) soll in den kommenden Jahren die Anzahl der Kollisionen auf die 5- bis 7,5-fache Nominalluminosität erhöht werden (Abbildung 1.1). Dies ermöglicht, selten auftretende Ereignisse genauer zu untersuchen und könnte somit einen Einblick in die Physik jenseits des Standardmodells mit sich bringen und mögliche Abweichungen davon aufdecken [2].

Das HL-LHC Projekt bringt jedoch auch erhebliche technische Herausforderungen mit sich und die Detektoren müssen überarbeitet werden, um mit der erwarteten Anzahl an Ereignissen umgehen zu können. Die Detektoren müssen der erhöhten Strahlungsbelastung standhalten können und auch die extrem hohen Datenmenge einer Auslastung von bis zu 200 Proton-Proton-Kollisionen pro Kreuzung zweier Protonenbündel verarbeiten können. Um sich an diese Bedingungen anzupassen, werden unter anderem Veränderungen an den Trigger- und Datenerfassungssystemen, sowie an dem Inneren Detektor vorgenommen [2].

Aktuell befindet sich das ITk (*Inner Tracker*) Projekt in der Vorproduktionsphase. Die Universität Siegen ist bei der Herstellung der Pixelmodule für den Detektor beteiligt und somit werden zurzeit Prototypen hergestellt und getestet, um später an der Produktion der finalen Pixelmodule mitzuarbeiten. Ebenso wird der Testaufbau finalisiert, damit alle Tests problemlos und zuverlässig ablaufen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Testaufbau für den Source-Scan überarbeitet und optimiert. Dabei werden die ITk-Pixelmodule mit einer Strontium-90 Quelle bestrahlt, um ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Strahlungsintensität so zu konfigurieren, dass keine Überlastung der Ausleseelektronik auftritt und die Tests zuverlässig durchgeführt werden können. Hierzu wurden systematische Untersuchungen der Strahlungsintensität in Abhängigkeit von Abstand, Abschirmung und Bestrahlungsdauer durchgeführt.



Abbildung 1.1: Aktueller HL-LHC Plan [2].

Der ATLAS Detektor

Der ATLAS Detektor (*A Toroidal LHC ApparatuS*) ist mit seiner Länge von 44 m und seinem Durchmesser von 25 m der größte Teilchendetektor am LHC. Der Detektor besteht aus drei tonnenartig aufgebauten Teilen, die aus mehreren Detektoren bestehen (Abbildung 2.1). Jedes dieser Teile ist dafür verantwortlich, verschiedene Eigenschaften der Teilchen zu messen und die Art der Teilchen zu identifizieren, sodass der ATLAS Detektor in der Lage ist, möglichst viele Teilchen von den Proton-Proton-Kollisionen direkt oder indirekt detektieren zu können. In der äußersten Schicht befindet sich das Myonspektrometer, mittig positioniert ist das Kalorimeter und ganz innen der Innere Detektor [3].

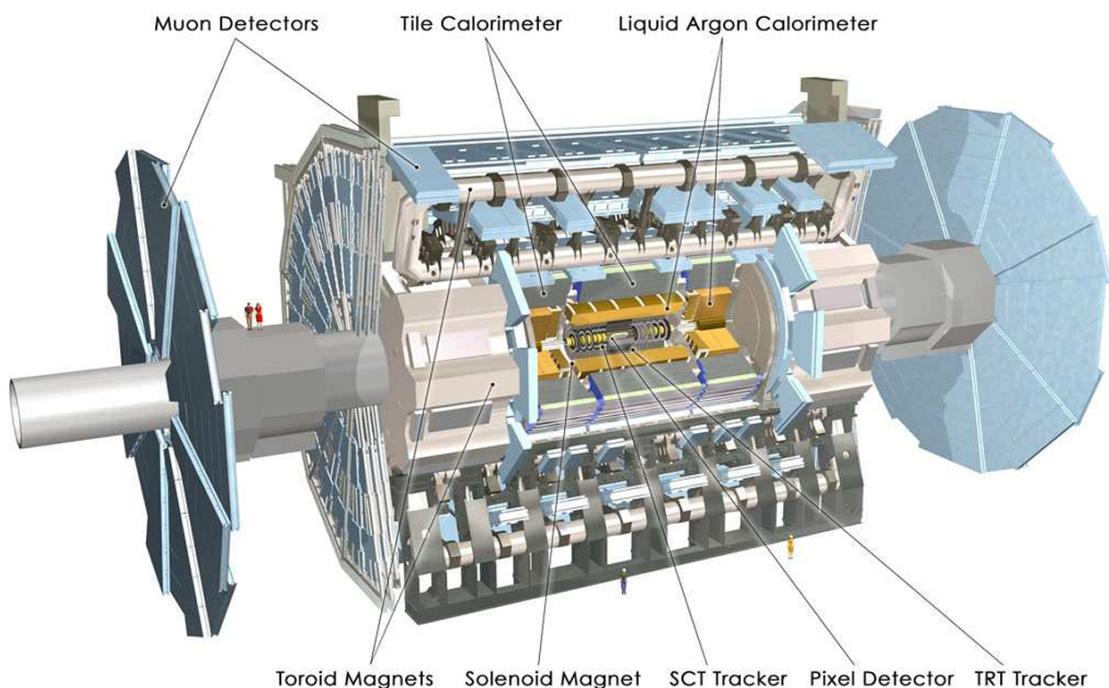


Abbildung 2.1: Der Aufbau des ATLAS Detektors [3].

Diese drei Hauptteile werden in den kommenden Abschnitten genauer beschrieben.

2.1 Der Aufbau des ATLAS Detektors

Der innerste Teil des ATLAS Detektors ist der Innere Detektor, der sich direkt am Strahlrohr befindet. Dieser ist eingebettet in ein Magnetfeld parallel zur Achse des Strahlrohrs. Der Innere Detektor wird verwendet, um die Ladung und den Impuls der geladenen Teilchen zu bestimmen, sowie die Richtung zu detektieren, in die sie abgelenkt werden [4]. In dem kommenden Abschnitt 2.2 wird der Innere Detektor ausführlicher beschrieben.

Nach dem Inneren Detektor erreichen die Teilchen das Kalorimeter, das ihre Energie misst. In diesem Bereich geben die meisten Teilchen ihre gesamte Energie ab und werden somit abgebremst bis sie schlussendlich vollständig gestoppt sind. Elektromagnetisch und hadronisch wechselwirkende Teilchen verhalten sich bei diesem Prozess unterschiedlich, sodass zwei verschiedene Kalorimetersysteme genutzt werden [5].

In dem elektromagnetischen Kalorimeter sind Absorber aus Blei und Kupfer-Kapton Elektroden in einer Akkordeon Geometrie angeordnet. Diese Struktur wird von flüssigem Argon umgeben, welches als Nachweismedium fungiert. Das elektromagnetische Kalorimeter setzt sich aus zwei Halbrohren und zwei Abschlusskappen zusammen [5]. Die Teilchen treffen auf den Absorber und lösen dort elektrische Schauer aus, sodass elektromagnetisch interagierende Teilchen wie geladene Teilchen und Photonen detektiert werden können.

Nach dem elektromagnetischen Kalorimeter folgt das hadronische Kalorimeter. Dieses misst die Energie der Hadronen, welche in der vorherigen Schicht noch nicht ihre gesamte Energie abgegeben haben. In dem Plattenkalorimeter befinden sich Schichten aus Stahl und Szintillatorplatten. Treffen die Teilchen auf den Stahl, lösen sie einen Schauer aus, der vor allem aus geladenen Teilchen und Photonen besteht, welche wiederum in den Szintillatorplatten Licht erzeugen. Dieses Licht kann dann schließlich mit Photomultipliern detektiert werden [5].

Bei den verschiedenen Wechselwirkungen werden häufig Myonen erzeugt. Diese können die Kalorimeter durchqueren, weil sie vergleichsweise wenig Energie durch Bremsstrahlung und Ionisation verlieren und als Lepton nicht stark wechselwirken. Infolgedessen befindet sich noch ein weiterer Detektor in der äußeren Schicht, um die Myonen zu detektieren. Das Myonspektrometer wird genutzt, um die Richtung und Energie der Myonen präzise zu bestimmen [5].

Umgeben wird das Myonspektrometer von dem toroidalen Luftspulen-Magnetsystem, welches sich aus einem Rohrmagneten und zwei Abschlusskappen zusammensetzt. Das Magnetfeld hat eine Stärke von 0,5 T in dem Bereich der Rohre und 1 T bei den Abschlusskappen. Der Impuls kann mithilfe des Magnetfeldes genau bestimmt werden, indem die Ablenkung der Teilchen gemessen wird.

Das Myonspektrometer setzt sich aus dem Präzisions-Tracking-System und den Trigger-Kammern zusammen. Das Präzisions-Tracking System nutzt Aluminiumrohre, welche mit einer Mischung von Argon und Kohlenstoffdioxid Gasen gefüllt sind. Die Rohre haben einen Durchmesser von ungefähr 3 cm und sind in mehreren Schichten gestapelt. Wenn Myonen diese Rohre passieren, lösen sich Elektronen von den Gasmolekülen. Diese Elektronen werden im Mittelpunkt fokussiert und induzieren ein Signal. Die Trigger-Kammern ermöglichen es, schnell zu entscheiden, ob ein Ereignis interessant für die weitere Analyse ist [3][5].

2.2 Der Innere Detektor

2.2.1 Aktueller Aufbau des Inneren Detektors

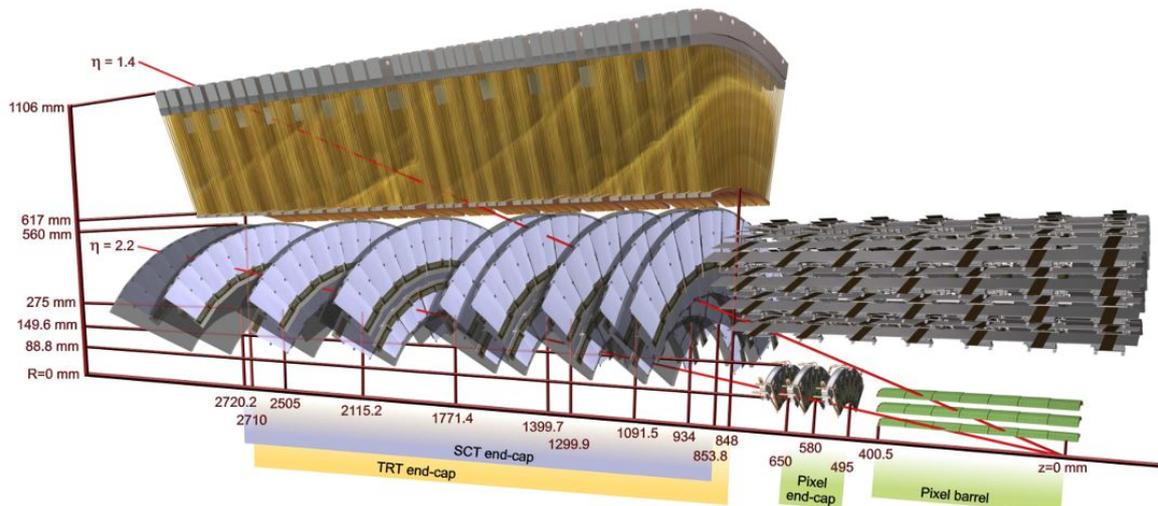


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau des Inneren Detektors [5].

Der Innere Detektor besitzt einen zylinderförmigen Aufbau mit einer Länge von 7 024 mm und einem Radius von 1 150 mm. Der Mittelpunkt des Zylinders liegt auf dem Kollisionsspunkt des Strahlrohrs. Analog zum Aufbau der anderen Detektoren am ATLAS Detektor setzt sich der Innere Detektor aus den rohrförmigen Bereichen und den Abschlusskappen zusammen. Der Innere Detektor wird in drei unabhängige Detektoren unterteilt. Direkt am Strahlrohr befindet sich der Pixeldetektor, darauf folgt der Siliziumstreifendetektor (*Semi Conductor Tracker*) und abschließend der Übergangsradiationsdetektor (*Transition Radiation Tracker*) (Abbildung 2.2 und 2.3).

Der Pixeldetektor besteht aus vier zylindrischen Lagen, sowie drei Scheiben in den Abschlusskappen. Diese bestehen aus insgesamt 1 744 zweidimensional segmentierten Siliziumpixelsensoren. Somit werden bis zu vier präzise Positionsmessungen der Teilchenpfade durchgeführt, wodurch diese nachempfunden werden können. Es werden ungefähr 80 Millionen Auslesekanäle benötigt, um die Daten des Pixeldetektors aufzunehmen. Eine hohe Genauigkeit ist in der Nähe des Strahlrohrs besonders wichtig, um verschiedene Spuren voneinander unterscheiden zu können [3].

Umgeben wird der Pixeldetektor von dem Siliziumstreifendetektor, welcher ebenfalls aus zylinderförmigen Schichten und ringförmigen Scheiben besteht. In diesem Teil des Inneren Detektors werden verschiedene Geometrien für die Siliziumdetektoren verwendet. Rechteckige Siliziumstreifen sind in den Rohren verbaut, während die Scheiben aus drei unterschiedlichen keilförmigen Modulen bestehen. Die Scheiben sind hier im Gegensatz zu denen des Pixeldetektors nicht identisch, sondern haben eine unterschiedliche Anzahl an Ringen [3].

Der äußerste Teil des Inneren Detektors ist der Übergangsradiationsdetektor. Dieser besteht aus zahlreichen dünnen Driftröhren, welche mit einer Gasmischung bestehend aus Xenon, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff gefüllt sind. Die Wände dieser Röhren sind negativ geladen und fungieren als Kathode, während die Anode ein 31 μm dünner Wolframdraht ist, welcher sich mittig in den Röhren befindet.

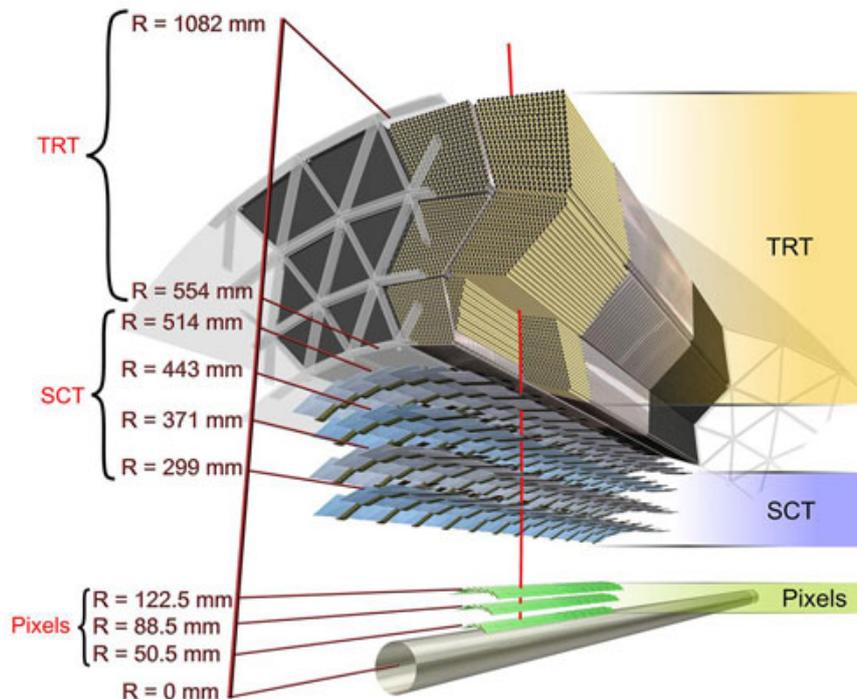


Abbildung 2.3: Schematischer Querschnitt des Inneren Detektors [5]

Durchqueren geladene Teilchen die Driftröhren, ionisieren sie das Gasgemisch und ein elektrisches Signal wird induziert, wodurch die Trajektorie der Teilchen bestimmt werden kann. Der Detektor kann zudem Übergangsstrahlung detektieren, die entsteht, wenn geladene, hochrelativistische Teilchen Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten durchqueren. In dem auf Xenon basierenden Gasgemisch werden die niedrig energetischen Übergangsstrahlungsphotonen absorbiert und ein Signal wird detektiert. Dieses Signal hat eine deutlich höhere Amplitude als das Signal, das durch das Ionisieren des Gases entsteht und kann folglich davon unterschieden werden. Da die Intensität der Übergangsstrahlung proportional zu dem Lorentz-Faktor und damit zur Masse ist, kann mithilfe dieser Strahlung zwischen verschiedenen Teilchen und insbesondere zwischen Elektronen und Hadronen unterschieden werden [5].

2.2.2 Geplanter Aufbau des ITk

Das Update durch den HL-LHC Plan bringt eine deutlich höhere Strahlungsbelastung für die Detektorkomponenten mit sich. Es wird mit durchschnittlich ungefähr 200 Proton-Proton-Kollisionen pro Kreuzung zweier Protonenbündel gerechnet. Der überarbeitete Innere Spurdetektor (*Inner Tracker*, ITk) soll diese hohe Belastung aushalten und dabei zugleich die Detektionspräzision des Inneren Detektors beibehalten. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird der ITk ausschließlich Halbleiterdetektoren nutzen und keinen Gasdetektor wie den TRT mehr. Der ITk wird aus einem Pixeldetektor bestehen, welcher von einem Streifendetektor umgeben sein wird. Der neue Pixeldetektor wird aus fünf Lagen bestehen. Die inneren zwei Schichten werden, um die erwarteten Schäden durch die Strahlungsbelastung zu umgehen, austauschbar sein. Diese beiden Schichten sind durch

die inneren Stützrohre von den Äußeren getrennt. Die Abschlusskappen des Pixeldetektors werden aus 5 Lagen bestehen, welche sich jeweils aus mehreren Ringen zusammensetzen. Die Anzahl dieser Ringe variiert dabei je nach Lage der jeweiligen Schicht, wobei die innerste Abschlusskappe mit 4 Ringen die geringste Anzahl an Ringen beinhaltet. Die meisten Ringe werden mit 11 Ringen in der zweiten Abschlusskappe verbaut. Der Streifendetektor wird aus vier zylinderförmigen Schichten und sechs Abschlusskappen bestehen. Getrennt werden der Pixeldetektor und der Streifendetektor von den Pixel-Stützrohren (Abbildung 2.5).

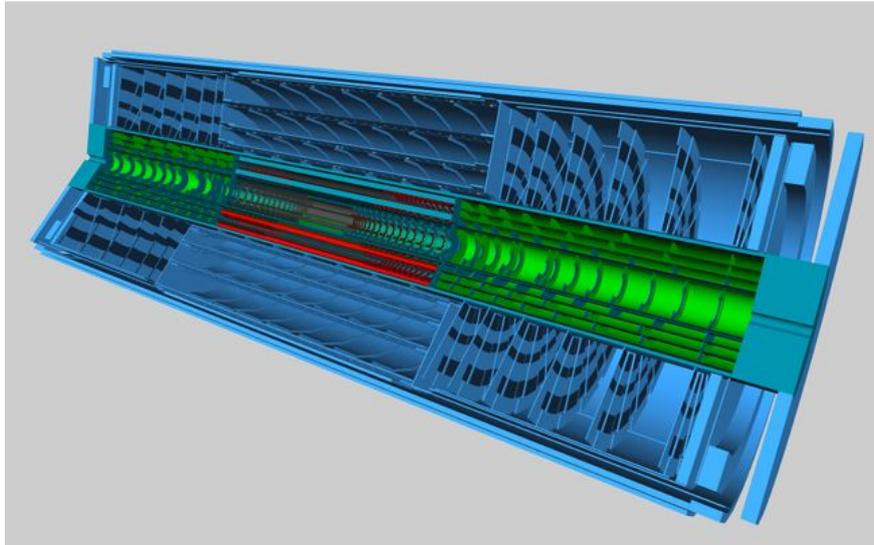


Abbildung 2.4: Aufbau aus einer Simulation des ITk [6].

Mit den Optimierungen im Zuge des ITk soll der Detektor weniger anfällig für technische Fehler, wie zum Beispiel Effizienzverlust durch Strahlungsschäden werden. Ebenso wird jedoch darauf geachtet, dass der ganze Umbau möglichst kosteneffizient ist, indem die nötige Menge an Silizium minimiert wird. Eine geringe Menge an Silizium ist ebenso notwendig, um die Messung nicht durch Interaktionen mit dem Material des Detektors zu verfälschen. Das verbesserte Layout soll zudem helfen, die Rechenleistung zu verbessern, um die CPU zu entlasten. Um diese Ziele zu verfolgen, werden die Erfahrungen der letzten Betriebsphasen sowie Geant4 Simulationen genutzt [6].

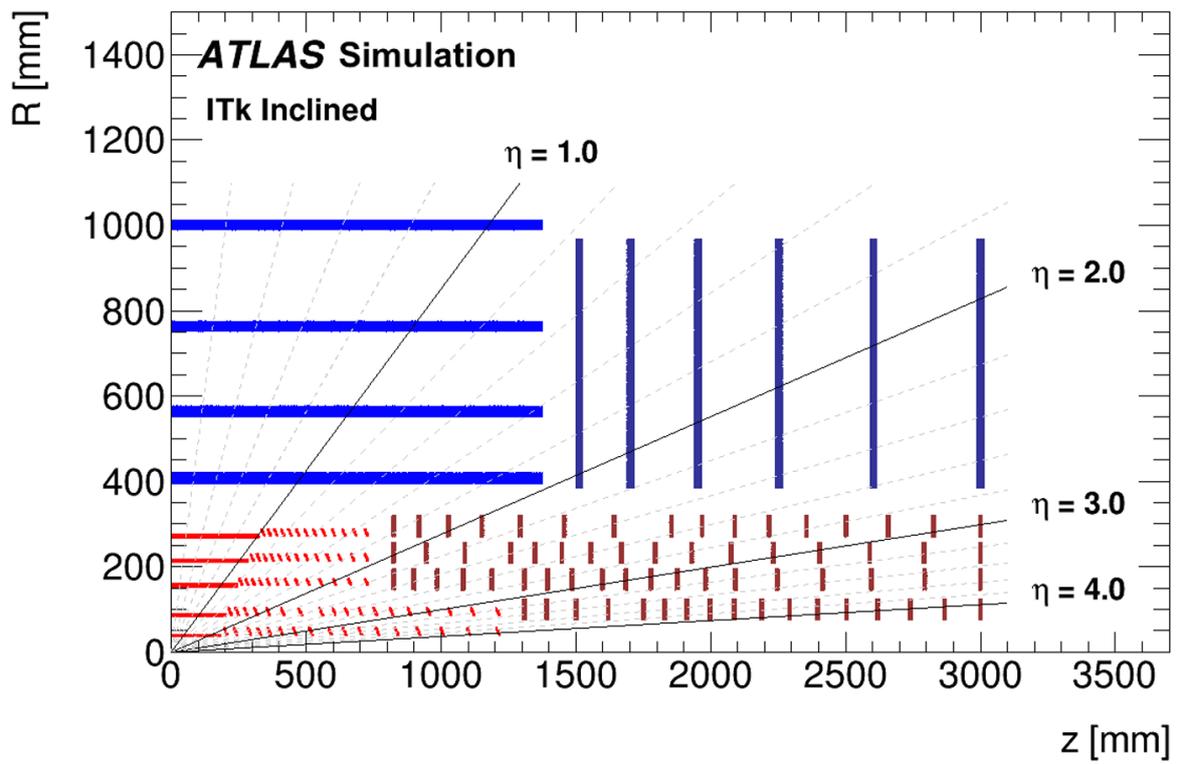


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau des ITk: in rot sind die Pixeldetektoren dargestellt, in blau die Streifendetektoren [6].

Die Pixelmodule

Die Pixelmodule, welche in dem Inneren Detektor verbaut werden, sind vom Aufbau zwar ähnlich wie die im aktuellen ATLAS Detektors verwendeten Pixelmodule, zeichnen sich jedoch durch einige Unterschiede aus. Die Größe der einzelnen Pixel wurde auf $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ bzw. $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ reduziert, um die Auflösung und die Separation zwischen verschiedenen Spuren zu verbessern. Ebenso wurden die Auslesechips verbessert. So kann der Front-End-Chip nun bei einem niedrigerem Schwellwert arbeiten und ermöglicht somit eine geringere Belastung durch radioaktive Strahlung. Zudem wurde die Ausleseelektronik an die höheren Eventraten angepasst und die Chips sind widerstandsfähiger gegenüber Strahlung. Darüber hinaus unterscheidet sich der ITk in der Ausgangs-Bandbreite. Diese wurde auf 5,12 GB/s erhöht, um die hohen Raten in dem ITk verarbeiten zu können. Es werden drei Module in drei verschiedenen Größen verwendet. Die Quad-Module bestehen aus vier Front-End-Chips, welche mit einem einzelnen Sensor verbunden sind und eine Fläche von $4 \times 4 \text{ cm}^2$ haben. Die Dual-Module bestehen aus zwei Front-End-Chips mit einer Gesamtgröße von $2 \times 4 \text{ cm}^2$ und dienen der Optimierung der radialen Krümmung. Als drittes werden Single-Module verwendet, welche aus nur einem Front-End-Chip bestehen und eine Größe von $2 \times 2 \text{ cm}^2$ haben. Um die Anzahl der Kabel und die inaktive Fläche zu minimieren, werden die Hybrid-Pixelmodule Serienschaltungen nutzen [6].

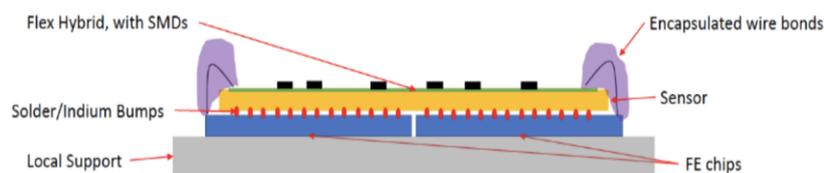


Abbildung 3.1: Aufbau der ITk Pixeldetektoren [7].

Die verwendeten Pixelmodule basieren auf dem Konzept des Hybrid-Pixeldetektors. Hierzu wird zunächst ein blankes Modul (*bare module*, BM) verwendet, bestehend aus einem Sensor, der über Bump-Bonds mit den Front-End-Chips verbunden ist. Dies ermöglicht es, jeden einzelnen Pixel auszulesen. In Folge des ITk Plans werden für die Front-End-Chips RD53B Chips verwendet. Die BMs werden zu den verschiedenen Modulmontageorten geliefert und dort weiter zu Pixelmodulen verarbeitet. Auf die andere Seite des Sensor wird ein PCB Flex geklebt und über Wire-Bonds mit den Front-End-Chips verbunden. Das Flex besteht aus zwei Metallschichten. Eine dieser Schichten bildet die Erdung des Flexes, die Andere leitet den Versorgungsstrom weiter. Die elektrische Versorgung

wird mithilfe von biegbaren Pigtails ermöglicht. Ein weiteres wichtiges Bauteil ist der Pixel-DCS-Chip (*Pixel Serial Powering and Protection chip*). Dieser ist eine Sicherheitsmaßnahme, welche ermöglicht, einzelne Module auszuschalten, und daher, trotz der Serienschaltung, den Rest der Modulkette auslesen zu können. Der Aggregator-Chip ist eine aktive Komponente des PCB Flexes. Mithilfe dieses Chips werden, abhängig von der Position im ITk, die Daten verschiedener Module kombiniert und an die elektrischen Kabel weitergeleitet [6].

3.1 Detektionsprinzip der Pixeldetektoren

Die Silizium-Pixelmodule basieren auf dem grundlegendem Prinzip der Ionisation von Halbleitermaterial durch geladene Teilchen. Durchquert ein hochenergetisches Teilchen das Modul, verliert es einen Teil seiner Energie durch inelastische Stöße mit den Elektronen der Siliziumatome. Dadurch entstehen Elektron-Loch-Paare entlang seiner Flugbahn. Die mittlere Energie zur Erzeugung eines Paares liegt für Silizium bei etwa 3,6 eV. Somit entstehen bei einem typischen Energieverlust von 100 keV bereits mehrere zehntausend Paare [8].

In dem Detektor werden p- und n-dotierte Bereiche aneinander gesetzt, sodass sich bei dem pn-Übergang eine Verarmungszone bildet. Der Sensor wird über eine externe Spannung in Sperrrichtung betrieben. Dadurch wird die Verarmungszone deutlich vergrößert. Wenn nun Elektron-Loch-Paare entstehen, driften die Elektronen zu der n-dotierten Rückseite, während die Löcher zur p-dotierten Vorderseite driften. Dieser Vorgang dauert typischerweise wenige Nanosekunden. Die Bewegung der Ladungen im elektrischen Feld induziert einen messbaren Stromimpuls in dem Sensor, wodurch ein Signal detektiert wird [8].

Das Signal wird von einem integrierten Verstärker im Front-End-Chip weiterverarbeitet. Die eingehende Ladung wird in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt, anschließend in einem Pulsformer geglättet und die Pulslänge begrenzt, um das Signalrauschen zu minimieren. Durch einen Schwellenwert im folgenden Diskriminator wird dann entschieden, ob es sich um ein Signalereignis oder Untergrund handelt. Auf diese Weise wird die Unterdrückung thermischer und elektronischer Störungen unterstützt [9].

Durch die präzise Segmentierung in einzelne Pixel, ist eine Ortsauflösung von wenigen Mikrometern möglich und es wird verhindert, dass sich benachbarte Ladungssammlungen überlappen. Die hohe räumliche Auflösung, sowie schnelle Signalauslese und Diskriminierung, sind für die Anwendung in dem ATLAS Detektor notwendig [9].

3.2 Produktion der Pixelmodule

Die Pixelmodule werden in mehreren strukturierten Prozessschritten an verschiedenen Montagestandorten hergestellt (Abbildung 3.3). Die Universität Siegen stellt einen dieser Montagestandorte dar. Die verschiedenen Standorte müssen sich für die unterschiedlichen Fertigungsschritte qualifizieren und standardisierte Protokolle befolgen. Dies soll eine gleichbleibend hohe Qualität der Module sicherstellen [6].

Die Produktion beginnt mit dem Anbringen der Front-End-Chips auf dem Siliziumsensor. Dies wird mithilfe eines Bump-Bonding-Verfahrens, bei welchem mikroskopisch kleine Lötverbindungen angebracht werden, durchgeführt. Hier werden erste visuelle Inspektionen und Tests durchgeführt, um

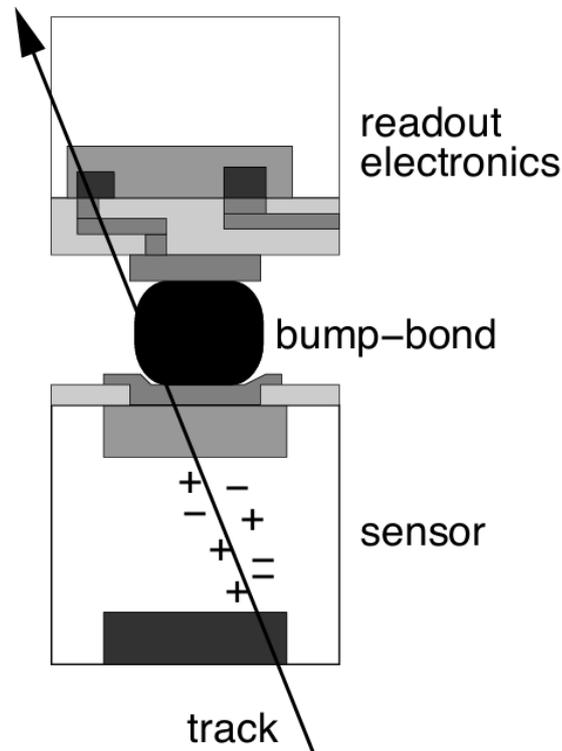


Abbildung 3.2: Detektionsprinzip der Pixeldetektoren [9].

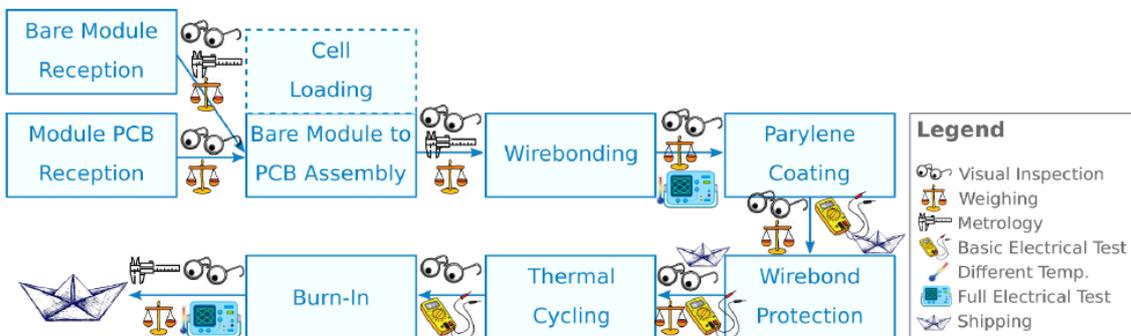


Abbildung 3.3: Schema der Produktion der Pixelmodule [10].

defekte Chips und Bumps zu identifizieren. Im Anschluss wird das Flex, ein flexibles Leiterplattenmodul für die Stromversorgung und Datenübertragung, angebracht. Das Flex wird über Wire-Bonds mit dem Front-End-Chip verbunden. Im nächsten Montageschritt wird das Modul elektrisch kontaktiert, das Pigtail elektrisch verbunden und das Modul in eine schützende Struktur eingebettet. Im Anschluss werden umfangreiche Tests durchgeführt, darunter Funktionstests, Leckstrommessungen sowie mikroskopische Sichtkontrollen [6].

Die verschiedenen Arbeitsschritte unterliegen hierbei strengen Richtlinien. Jeder Montageort muss

nachweisen, dass die Module innerhalb der gegebenen Spezifikationen liegen. Die Ergebnisse der Tests werden zentral dokumentiert, um die Rückverfolgbarkeit und die Qualitätssicherung sicherzustellen. Ein zentraler Bestandteil dieser Tests ist der sogenannte Source-Scan, auf den im folgenden Abschnitt eingegangen wird [6].

3.3 Der Source-Scan

Der Source-Scan ist als Teil der elektrischen Tests ein zentraler Funktionstest zur Qualitätskontrolle der Pixelmodule. Die elektrischen Tests werden an verschiedenen Herstellungsschritten durchgeführt (Abbildung 3.3).

Während des Source-Scans werden die Module mit ionisierender Strahlung einer radioaktiven Quelle bestrahlt, um die Funktionalität der einzelnen Pixel, sowie die Homogenität der Detektorantwort zu überprüfen. Hierzu wird ein Beta-Strahler verwendet, welcher hochenergetische Elektronen emittiert. Das Ziel des Scans ist es, in jedem Pixel eine Mindestanzahl an Treffern zu detektieren, sodass Rückschlüsse auf mögliche defekte Bereiche gezogen werden können. Diese Mindestanzahl ist auf 10 Treffer gesetzt.

Die Durchführung der Tests erfolgt in einem thermisch regulierten Aufbau. Dies soll helfen, die späteren Bedingungen des ATLAS Detektors zu simulieren und thermisch induziertes Rauschen zu unterdrücken. Ebenso werden die Chips durch vorherige Tests kalibriert und die Diskriminatorschwellen auf die für den späteren Detektoreinsatz vorgesehenen Werte in dem Bereich von 3 000 bis 4 000 Elektronen gesetzt. Die Anzahl der detektierten Treffer wird über die Dauer des Tests akkumuliert und in einer zweidimensionalen Hitmap visualisiert.

Die resultierende Hitmap kann unmittelbar Aufschluss über die Funktionsfähigkeit des Moduls geben. Lokal fehlende Treffer oder linienförmige Abweichungen deuten auf mögliche Fehlerquellen wie Schäden an dem Bump-Bonds, beschädigte Sensorbereiche oder auch elektrische Fehler hin. Während des Herstellungsprozesses wird dieser Test regelmäßig verwendet, um die Funktionalität des Moduls zu gewährleisten und mögliche Fehler direkt zu erkennen (Abbildung 3.3).

Radioaktivität

Bei den Atomen unseres Universums kann man zwischen solchen mit stabilen und instabilen Kernen unterscheiden. Die instabilen Kerne zerfallen innerhalb einer endlichen Lebenszeit zu stabilen Kernen. Diese Zerfälle kann man in drei Arten unterteilen.

Die Alphazerfälle beschreiben Kerne, welche bei ihrem Zerfall ein Alphateilchen, also einen Heliumkern, abspalten. Der Zerfall folgt der folgenden Relation:



Das Spektrum des Alphazerfalls weist charakteristische Peaks auf, da es sich um einen Zweikörper-Zerfall handelt.

Der Betazerfall unterteilt sich weiter in den β^- -Zerfall und den β^+ -Zerfall. Bei dem β^- -Zerfall emittiert der Kern ein Elektron und ein Antielektronneutrino.



Der β^+ -Zerfall dagegen beschreibt einen Prozess, bei welchem innerhalb des Kernzerfalls ein Positron und ein Elektronneutrino entstehen.



Das Beta-Spektrum ist ein kontinuierliches Spektrum, das langsam abfällt. Es handelt sich also um eine asymmetrische Verteilung. Diese Verteilung ist charakteristisch für Dreikörper-Zerfälle wie den Betazerfall.

Bei dem Gammazerfall bleibt der Kern als Element erhalten, gibt jedoch Energie in Form eines Photons ab. Der Kern befindet sich ursprünglich in einem angeregten Zustand, wie zum Beispiel in Folge eines Alphazerfalls. Dieser angeregte Kern emittiert Gammastrahlung, welche aus Photonen besteht.



Ähnlich wie bei einem Alphazerfall, erkennt man in dem Gammaskpektrum charakteristische Peaks. Diese Peaks sind für jedes Element charakteristisch und man kann sie benutzen, um Elemente zu identifizieren.

4.1 Betastrahlung

Als erste radioaktive Strahlung wurde 1896 Alphastrahlung von Antoine Henri Becquerel entdeckt. Ernest Rutherford entdeckte 1899, dass es eine weitere, stärker durchdringende Art von Strahlung gibt. Er etablierte es, beide Strahlungen als Alpha- und Betastrahlung zu unterscheiden. Beim Betrachten der Betastrahlung fiel auf, dass das Spektrum nicht die charakteristischen Peaks der Alphastrahlung aufweist. Das Spektrum der Betastrahlung war kontinuierlich, was bei einem Zweikörper-Zerfall zu einer Verletzung der Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung führen würde.

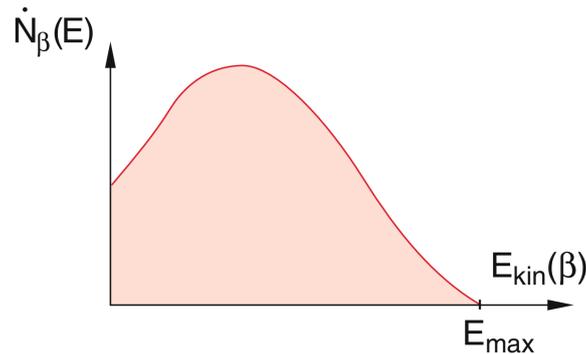
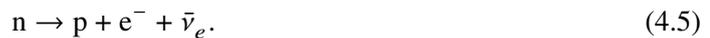


Abbildung 4.1: Das kontinuierliche Betaspektrum [11].

Um diesen Widerspruch zu lösen, wurde 1933 das Neutrino von Wolfgang Pauli als neues Teilchen postuliert. Mithilfe des Neutrinomodells kann der Betazerfall durch die Formeln (4.2) und (4.3) beschrieben werden. Innerhalb des instabilen Kerns findet bei dem β^- -Zerfall eine Umwandlung eines Neutrons zu einem Proton. Damit sowohl die Ladung als auch die Leptonenzahl erhalten bleibt, muss für diese Umwandlung ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino emittiert werden.



Das Elektron und das Neutrino verlassen dabei sofort nach der Entstehung den Kern, da sich im Kern wegen der Unschärferelation keine Elektronen aufhalten können. Analog dazu wird bei dem β^+ -Zerfall ein Proton in ein Neutron umgewandelt [11].



Bei radioaktiven Zerfällen handelt es sich um stochastische Prozesse. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen in einer gewissen Zeiteinheit zerfällt, ist für alle Teilchen der selben Sorte gleich. In diesem Zusammenhang wird die Aktivität A eingeführt, definiert als

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (4.7)$$

N beschreibt hierbei die Anzahl der Teilchen und λ die Zerfallskonstante, welche die Wahrscheinlichkeit von einem Zerfall pro Zeiteinheit beschreibt. Integriert man diese Relation, kommt man zu dem Zerfallsgesetz für die Teilchenanzahl.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4.8)$$

N_0 ist in dieser Gleichung definiert als die Anzahl an Teilchen zu einem Zeitpunkt $t = 0$.

4.2 Strontium-90-Zerfall

^{90}Sr ist ein radioaktives Isotop, das durch einen β^- -Zerfall zerfällt. Die Zerfallskonstante von ^{90}Sr ist $\lambda_{\text{Sr}} = 7,6027 \cdot 10^{-10}/\text{s}$. ^{90}Sr zerfällt vollständig zu ^{90}Y , welches ebenfalls durch einen β^- -Zerfall vollständig zu dem stabilen ^{90}Zr zerfällt. Die Zerfallskonstante von ^{90}Y ist $\lambda_{\text{Y}} = 3,0061 \cdot 10^{-6}/\text{s}$. Betrachtet man also die Betastrahlung, ^{90}Sr Quelle detektieren kann, sieht man ein doppeltes Betaspektrum durch die beiden Zerfälle. Der ^{90}Sr -Zerfall ist dabei der weniger energetische Prozess mit einer maximalen Energie von $E_{\text{max,Sr}} = 0,5460 \text{ MeV}$. Der ^{90}Y -Zerfall ist dagegen höher energetisch mit einer maximalen Energie von $E_{\text{max,Y}} = 2,2756 \text{ MeV}$ sr.

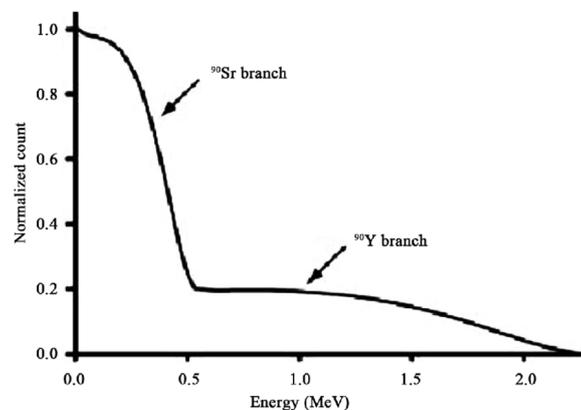


Abbildung 4.2: Energiespektrum der ^{90}Sr - und ^{90}Y -Zerfälle [12].

4.3 Abschirmung von Betastrahlung

Die Betastrahlung besteht je nach Art des Zerfalls aus Positronen beziehungsweise Elektronen. Neutrinos wechselwirken aufgrund ihres extrem kleinen Wirkungsquerschnitts kaum mit Materie, sodass sie in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden und keine Abschirmung erfordern. Da mit einer Strontium-90 Quelle gearbeitet wird, wird sich im Folgenden auf die Wechselwirkungsprozesse von Elektronen in Materie konzentriert.

Im Allgemeinen wird von einer isotropischen Quelle ausgegangen. Damit verringert sich mit dem Abstand auch die Strahlungsintensität. Die Strahlungsintensität eines isotropen Strahlers ist proportional zu r^{-2} . Somit kann man bei einem Objekt mit fester Größe die Anzahl an Treffern mit radioaktiver Strahlung verringern, indem man mehr Abstand zwischen die Quelle und das Objekt bringt.

Treffen Elektronen auf Materie, kommt es durch Stöße mit den Elektronenhüllen der Atome zu Richtungsablenkungen. Die tatsächlich zurückgelegte Strecke der Elektronen entspricht somit nicht der Reichweite in dem Absorbermaterial. Die Gesamtverluste kann man in Strahlungs- und Ionisationsverluste unterteilen.

Durch inelastische Stöße mit Hüllenelektronen kann es zu einer Ionisation der Atome oder zu einer Anregung der Hüllenelektronen kommen, wodurch die Elektronen der Betastrahlung einen Teil ihrer

Energie verlieren. Diese Energieverluste werden von der Bethe-Bloch-Gleichung beschrieben ([11])

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ion}} \approx \frac{Z^2 e^4 n_e}{4\pi \cdot \epsilon_0^2 m_e v^2} \ln \frac{m_e v^2}{2\langle E_b \rangle}. \quad (4.9)$$

Hierbei beschreibt Z die Kernladung, n_e die Elektronendichte und $\langle E_b \rangle$ die mittlere Bindungsenergie. Die Reichweite der Elektronen wird jedoch nicht nur durch Ionisationsverluste verringert, sondern auch durch Strahlungsverluste. Werden die Elektronen abgebremst oder im Coulomb-Feld der Atome abgelenkt, emittieren sie Bremsstrahlung. Der Energieverlust in Folge von Bremsstrahlung wird beschrieben durch:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \frac{4n_a Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2 E_e}{m_e^2 c^4} \ln \frac{a}{Z^{1/3}}. \quad (4.10)$$

Dabei beschreibt n_a die Atomdichte, E_e die kinetische Energie der Elektronen, $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c)$ die Feinstrukturkonstante und $a \approx 138$ einen numerischen Faktor.

Diese beiden Verlustarten werden addiert, um den Gesamtverlust zu bestimmen. In Abbildung 4.3 erkennt man den Energieverlust durch Ionisation sowie den Energieverlust durch Strahlung von Blei und Wasser im Vergleich. Die durchgezogene Linie stellt den Gesamtenergieverlust da, welcher einem logarithmischen Zusammenhang folgt.

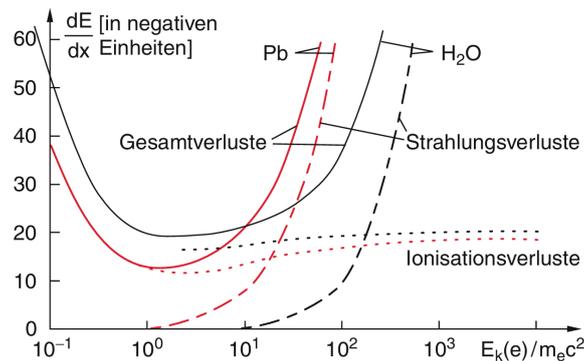


Abbildung 4.3: Darstellung der Gesamtverluste, sowie Ionisationsverluste und Strahlungsverluste von Blei und Wasser gegen die Elektronenenergie [11].

Die Reichweite von Elektronen in Aluminium kann in dem Energiebereich von 10 keV bis 1 GeV durch eine empirische Formel beschrieben werden:

$$\log_{10} R = -0.176(\log_{10} E)^2 + 1.25 \log_{10} E - 0.29. \quad (4.11)$$

Die Reichweite R ist hierbei in der Einheit g/cm^2 und die Energie E wird in MeV angegeben [8].

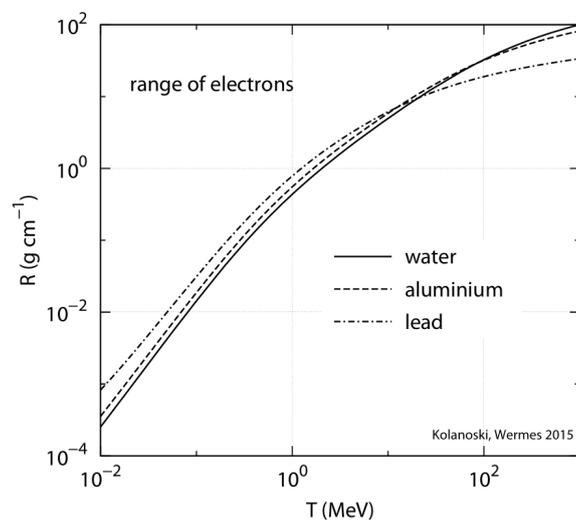


Abbildung 4.4: Reichweite von Elektronen als Funktion der kinetischen Energie in Wasser, Aluminium und Blei [8].

Pixelmodul-Testaufbau

Um die in Siegen gebauten Module zu testen, wurde eine Teststation entwickelt. In dieser Teststation sollen vier Module parallel, automatisiert getestet werden können. Der Aufbau dieser Teststation ist in Abbildung 5.1 gezeigt.

Die Pixelmodule werden auf Vakuumpplatten befestigt und mit einer mit Trockenluft gefluteten Styrodurbox abgedeckt. Dies ist nötig, um ein kontrolliertes Temperaturumfeld für die Tests zu ermöglichen und das Entstehen von Kondensation zu verhindern. Die Vakuumpplatten sind gekühlt, wodurch auch die Module selbst gekühlt werden. Die Temperatur wird während der Tests kontrolliert und auch die Taupunkttemperatur überwacht. Dies ermöglicht es, den Testvorgang abzubrechen, falls die Gefahr besteht, dass Feuchtigkeit entsteht. Während der Tests wird ebenso der Druck in der Styrodurbox überwacht. Gibt es eine starke Veränderung, kann es sein, dass das Modul den Kontakt mit der Vakuumpplatte verloren hat. In diesem Fall wird ebenso der Test abgebrochen, da der Temperatenausgleich zwischen der gekühlten Platte und dem Modul nicht mehr gewährleistet ist.

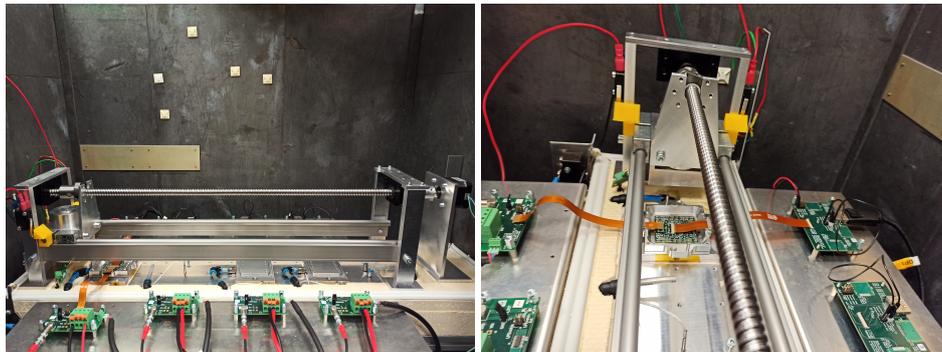


Abbildung 5.1: Teststation der Pixelmodule in Siegen.

Der Aufbau beinhaltet eine Strontium-90 Quelle mit einer Aktivität von ungefähr 80 MBq. Wie in Abbildung 5.1 ist die Quelle mit einem steuerbaren Motor ausgestattet, sodass sie von dem Computer aus gesteuert werden kann. Wird sie nicht gerade für Tests benötigt, befindet sich die Strontium-90-Quelle in der abgeschirmten Garage. Dies hilft dabei, die Arbeit mit radioaktiven Strahlern sicher zu gestalten.

5.1 Strahlenschutz

Da es sich bei der verwendeten Strontium-90 Quelle um eine hochaktive Quelle handelt, muss garantiert werden, dass die Arbeit an dem Teststand sicher ist.

Zu diesem Zweck sind zum einen die Wände mit Blei verstärkt, wodurch sichergestellt wird, dass die radioaktive Strahlung außerhalb abgeschirmt wird, während die Quelle für den Source-Scan herausgefahren ist. Solange kein aktiver Test läuft, kann die Quelle in die Garage gefahren werden, wo die Quelle sicher abgeschirmt wird. Auf diese Weise sind Arbeiten innerhalb des Teststandes möglich, wie beispielsweise das Auswechseln der zu testenden Module, selbst bei geöffneter Tür.

Solange die Tür des Teststandes jedoch geschlossen ist, kann man nicht überprüfen, wo sich die Quelle befindet, was ein Sicherheitsrisiko darstellt. Um die Position der radioaktiven Quelle zu überprüfen, wurde eine Signalampel angebracht, siehe Abbildung 5.2. Diese ist mit einem mechanischen Schalter verbunden, der betätigt wird, wenn die Quelle in die Garage gefahren ist. Solange die Messung läuft und die Strontium-90 Quelle über die Module gefahren ist, leuchtet das Licht rot und die Tür ist geschlossen zu halten. Ein grünes Licht signalisiert, dass sich die Quelle in der Garage befinden und sich die Tür sicher öffnen lässt.

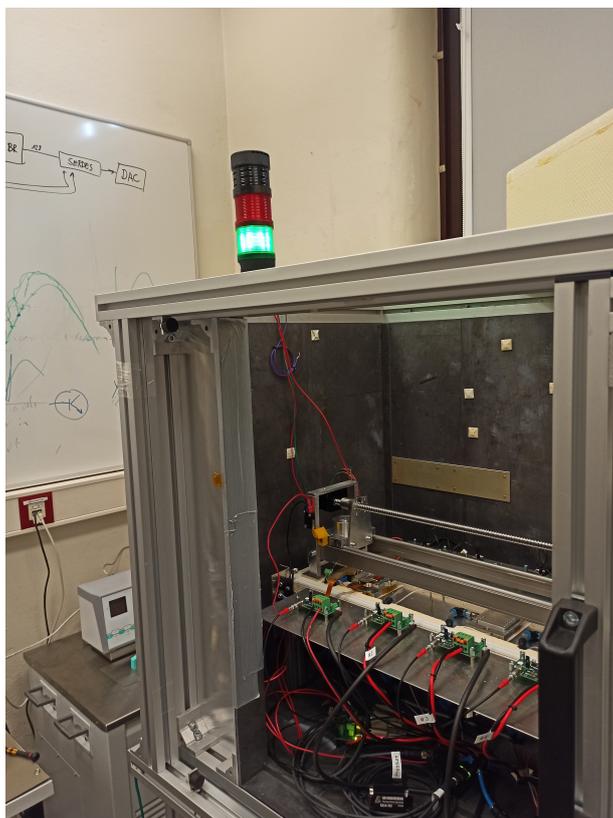


Abbildung 5.2: Angeschlossene Signalampel zum Anzeigen der Quellenposition.

Optimierung der Strahlungsintensität für den Source-Scan

6.1 Allgemeine Untersuchungen zur Bestrahlung

Der Source-Scan ist als einer der elektrischen Tests ein zentraler Bestandteil der Qualitätskontrolle der Pixelmodule. Das Modul wird während des Tests mit Beta-Strahlung, einer Strontium-90 Quelle, bestrahlt, um die Detektionseffizienz und die Funktionalität der einzelnen Pixel zu überprüfen. Um den Test zu bestehen, müssen alle nicht maskierten Pixel eine Mindestanzahl von 10 Treffern aufweisen. In der späteren Produktionsphase soll der Testvorgang weitestgehend automatisch ablaufen. Daher ist es besonders wichtig, dass auch der Source-Scan zuverlässig und ohne Unterbrechungen durchgeführt werden kann.

Damit möglichst zeiteffizient und zuverlässig eine ausreichend hohe Anzahl an Hits pro Pixel erreicht wird, muss der Versuchsaufbau hinreichend konfiguriert werden. Hierzu wurden systematische Untersuchungen hinsichtlich der Strahlungsintensität durchgeführt. Die Intensität hängt hierbei im Wesentlichen von zwei Parametern ab: dem Abstand der Quelle zum Detektor und den möglichen zusätzlichen Abschirmungen zwischen Quelle und Modul. Für die Anzahl der Treffer ist ebenso die Dauer des Scans relevant. Um den Einfluss dieser Parameter zu quantifizieren, wurden Messreihen mit unterschiedlichen Höhenpositionen, verschiedenen Abschirmungen, sowie mit variierenden Bestrahlungszeiten durchgeführt.

Die Tests zeigen, dass es aufgrund der hochaktiven Quelle zu einem Signalüberlauf im Auslesechip kommen kann. Dies äußert sich in unvollständigen Messungen oder Abbrüchen durch Softwarefehler. Ziel des Optimierungsprozesses ist es daher, eine Konfiguration zu finden, in der einerseits genügend Hits generiert werden, wo aber andererseits die Ausleseelektronik nicht überlastet wird, sowie die Testdauer zu optimieren.

6.2 Probleme beim Source-Scan und deren Behebung

Bei der Durchführung der ersten Source-Scans traten unerwartete Probleme auf. Die Module waren korrekt montiert und mit Spannung versorgt. Auch der elektrische Kontakt und die Kalibrierung der Front-End-Chips verliefen erfolgreich. Dennoch zeigte die Hitmap des Source-Scans keine Treffer,

sondern lediglich einige Pixel, die Untergrundereignisse anzeigten (Abbildung 6.1). Dieses Verhalten war ungewöhnlich, da man üblicherweise bei korrekter Bestrahlung und funktionierenden Modulen bereits nach wenigen Minuten mit einer deutlichen Anzahl an Treffern rechnet.

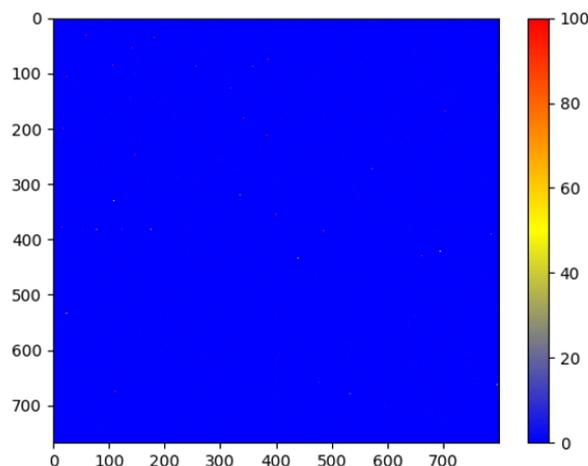


Abbildung 6.1: Hitmap eines Source-Scans mit der ursprünglich eingesetzten Strontium-90 Quelle.

Zunächst wurde aufgrund der uniformen Hitmaps, wie z.B. in Abbildung 6.1 gezeigt, vermutet, dass eine zu hohe Strahlungsintensität zu einer Überlastung der Ausleseelektronik führt. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden systematisch verschiedene Konfigurationen getestet. Dazu wurden, wie zuvor beschrieben, verschiedene Abschirmungen und auch Abstände der Quelle verwendet. Als Abschirmungen wurden mehrere dünne Aluminium- und Plastikplatten verwendet. Diese Platten wurden gestapelt, um möglichst viele verschiedene Dicken auszutesten. Ebenso wurde die Bestrahlungsdauer angepasst. Die unterschiedlichen Konfigurationen führten jeweils zu demselben Ergebnis wie zuvor.

Um weiter nach der Ursache des Problems zu suchen, wurde eine alternative Strontium-90 Quelle verwendet. Diese verfügt über eine deutlich geringere Aktivität, passt jedoch mechanisch nicht in die vorgesehene Halterung. Somit wäre diese Quelle für den regulären Betrieb nicht geeignet. Um die Tests durchzuführen, wurde die Quelle provisorisch an der Schiene des Quellenhalters befestigt. Dies ermöglichte eine sichere Bestrahlung unter vergleichbaren geometrischen Bedingungen.

Die Tests mit dem alternativen Betastrahler zeigten eine deutliche Anzahl sichtbarer Treffer über die gesamte aktive Fläche des Moduls (Abbildung 6.2). Man kann auf den Hitmaps gut die Struktur der auf dem Pixeldetektor angebrachten Komponenten erkennen, wodurch man die Treffer auf eine oberhalb platzierte Quelle zurückführen kann. Diese Struktur ist sichtbar, da einige der Elektronen bereits im Material des Pixeldetektors absorbiert werden. Dieser hat unterschiedliche Dicken durch die verschiedenen elektronischen Komponenten auf dem Detektor. Die absorbierten Elektronen zeigen sich auf der Hitmap durch eine reduzierte Anzahl an Treffern. Dies bestätigt, dass die Auslekette funktioniert und die Module in der Lage sind, die Betastrahlung zu detektieren. Somit konnte die Ursache des Problems auf die hochaktive Strontium-90 Quelle zurückgeführt werden.

Um zu definieren, welches Problem die radioaktive Quelle hat, wurde ein Test durchgeführt, bei

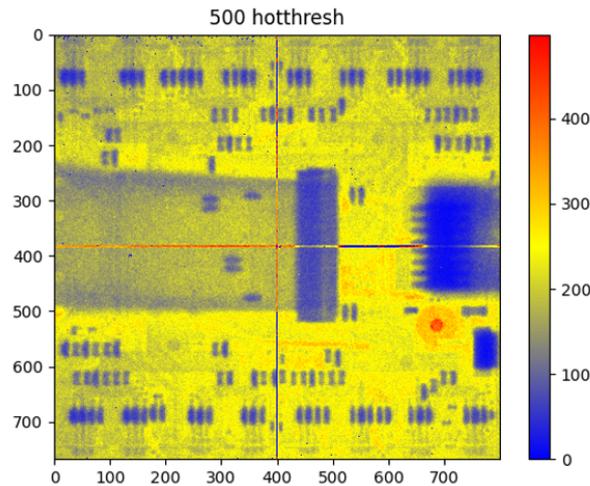


Abbildung 6.2: Hitmap mit der schwächeren Quelle.

welchem beide Quellen das Modul zeitgleich bestrahlen. Dies sollte zeigen, ob eine Überlastung des Auslesesystems durch die hohe Aktivität der Quelle zu den leeren Hitmaps führt. Das Ergebnis dieses Tests zeigt ein identisches Bild zu den Tests mit der schwächeren Quelle (Abbildung 6.3). Somit konnte eine Überlastung des Systems als Ursache ausgeschlossen werden. Dieser Test legt die Vermutung nahe, dass trotz der hohen Aktivität der Quelle keine Strahlung austritt. Dies wurde durch den Strahlenschutzbeauftragten der Universität bestätigt. Die Quelle war in dem kollimierten Quellenhalter verkehrt herum befestigt, wodurch die abgeschirmte Seite zu der Öffnung zeigte und somit keine Strahlung die Halterung verlassen und das Modul treffen konnte.

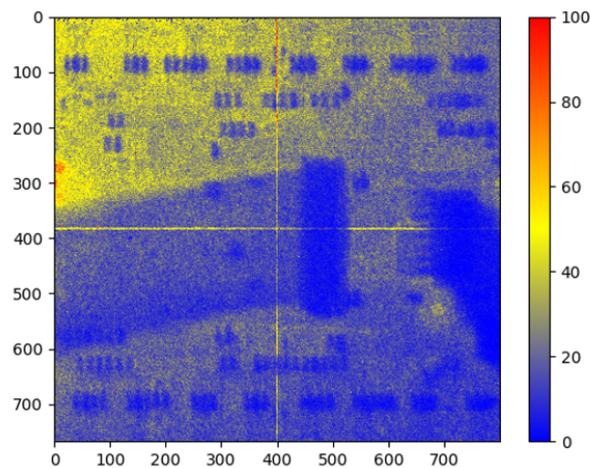


Abbildung 6.3: Hitmap eines kombinierten Testlaufs.

Nach der Korrektur der Ausrichtung der Quelle zeigten sich auch bei dieser Quelle Treffer auf der Hitmap. Allerdings zeigte sich hierbei eine zu hohe Anzahl an Treffern, wodurch die Tests nicht zuverlässig durchlaufen werden konnten. Registriert das Auslesesystem zu viele Hits, kommt es zu Softwareabstürzen oder Fehlermeldungen im Terminal, was auf eine Überforderung des Systems schließen ließ. In diesem Fall konnte mithilfe der Fehlermeldungen das Problem direkt auf die zu hohe Strahlungsintensität zurückgeführt werden.

Um dieses Problem zu lösen und eine zuverlässige und stabile Konfiguration für den Source-Scan zu finden, wurden nach dem selben Prinzip wie zuvor systematisch Tests mit verschiedenen Abschirmungen, Höheneinstellungen und Bestrahlungsdauern durchgeführt. Das Ziel war es hierbei, die Strahlungsintensität soweit zu reduzieren, dass eine stabile Auslese möglich ist und zugleich die Mindestanzahl von 10 Treffern erreicht wird. Dabei soll die Zeit möglichst kurz gehalten werden.

Tabelle 6.1: Beispielsweise ausgewählte Testreihe mit variierender Höhe.

Test-ID	Höhe [cm]	Abschirmung	Zeit [min]	Test abgeschlossen	Treffer unter 10
000492	28	0.25mm alu	10	ja	487
000493	28		10	nein	
000494	28		10	nein	
000495	30		10	nein	
000496	32		10	nein	
000497	32		10	nein	
000498	32		10	nein	
000499	34		10	nein	
000500	34		10	ja	134
000501	34		15	ja	8
000502	34		20	ja	2

In Tabelle 6.1 ist ein Beispiel für eine Messreihe angegeben. In dieser Messreihe wurde hauptsächlich die Höhe variiert. Als Abschirmung befand sich zwischen der Quelle und dem Detektor ebenso die in Kapitel 5 beschriebene 2,5 mm dicke Styrodurbox. An den Ergebnissen erkennt man, dass die Source-Scans häufig durch die zuvor beschriebene Überforderung des Systems nicht beendet werden konnten. Zusätzlich zu den Tests mit verschiedenen Quellenabständen wurden ebenso Tests aus geringerer Höhe mit verschiedenen Abschirmungen aus Aluminium und Plastik durchgeführt. Zudem wurden die Tests für verschiedene Module durchgeführt, da auch dort ein unterschiedliches Verhalten auftreten kann. Diese Unterschiede zeigen sich deutlich, da einige Module weniger Strahlungsintensität als andere verarbeiten konnten. Um dennoch eine stabile und reproduzierbare Testdurchführung zu gewährleisten, wurde die Konfiguration des Teststandes konservativ gewählt. Damit ist gemeint, dass die gewählten Einstellungen für alle Module zuverlässig funktionieren, auch wenn einzelne Module empfindlicher reagieren.

Die zuverlässigsten Ergebnisse wurden bei größeren Quellenabständen erreicht. In den Hitmaps kann man gut die Struktur der Module erkennen (Abbildung 6.4). Da auf dem gesamten Modul mindestens 10 Treffer erreicht werden sollen, ist der Bereich unter der Stromversorgung derjenige, in dem diese Mindestanzahl am häufigsten unterschritten wird. Für den abgebildeten Source-Scan, wurde die Mindestanzahl jedoch in allen außer zwei Pixeln erreicht. Dies erkennt man in dem Trefferhistogramm

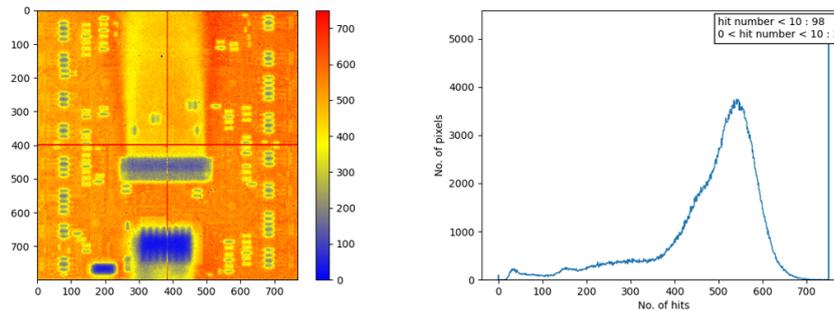


Abbildung 6.4: Hitmap und Trefferhistrogramm für Test-Run 000502 in 34 cm Höhe und für 20 min Bestrahlungsdauer.

(Abbildung 6.4). Hier wird die Anzahl der Pixel, die eine bestimmte Trefferanzahl erreicht haben, abgebildet. Dabei fällt auf, dass 96 Pixel keine Treffer detektiert haben. In dieser Zahl sind ebenso die defekten Pixel mit eingeschlossen.

Das Ergebnis der verschiedenen Testreihen zeigt, dass die besten Ergebnisse mit einem größeren Abstand zwischen Quelle und Modul zu erreichen sind. Die Tests auf 34 cm Höhe laufen nicht vollständig zuverlässig und führen häufig zu einer Systemüberlastung. Somit wurde die Höhe weiter angehoben. Um die Quelle möglichst sicher bedienen zu können, wurde die Schiene an dem oberen Rand des Teststand befestigt, wodurch sich die Quelle auf einer Höhe von ungefähr 45 cm befindet (Abbildung 6.5). Hier kann die Halterung fest angeschraubt werden und ist mechanisch gut gesichert. Dies ist sehr wichtig, um den Schutz vor Strahlung zu gewährleisten und den Testkoordinatoren ein sicheres Arbeitsumfeld zu bieten.

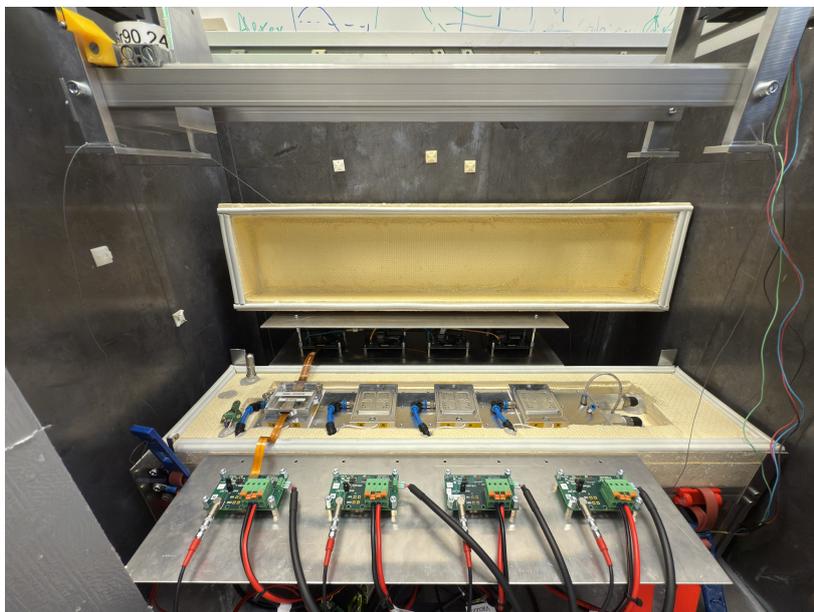


Abbildung 6.5: Optimiertes Setup mit der Quellenhalterung, die an dem oberen Rand des Teststands befestigt ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des High-Luminosity Upgrades des LHC wird auch der ATLAS-Detektor umfassend überarbeitet, um den erhöhten Anforderungen an Strahlungstoleranz und Datenrate gerecht zu werden. Der neue Innere Spurdetektor ist ein zentrales Element dieser Modernisierung. In diesem wird der Pixeldetektor eingebaut, welcher aus präzisen Silizium-Pixelmodulen bestehen. Der Innere Detektor wird eine wichtige Rolle beim Nachweisen von Teilchen spielen. Damit der Detektor später zuverlässig betriebsfähig ist, ist es essenziell, die Module ausreichend hinsichtlich ihrer Qualität zu kontrollieren. Diese Qualitätskontrolle wird bereits während der Herstellung der einzelnen Module an unterschiedlichen Produktionsschritten durchgeführt. Ein zentrales Element dieser Tests ist der Source-Scan, bei welchem die Module mit Betastrahlung einer Strontium-90 Quelle bestrahlt werden. Dies hilft dabei, die Homogenität und Funktionalität der Detektorantwort zu überprüfen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Teststand für die Durchführung von Source-Scans erfolgreich getestet und optimiert.

Um den Teststand an die Herausforderungen des Source-Scans anzupassen, wurden systematische Untersuchungen durchgeführt, bei denen unterschiedliche Konfigurationen bezüglich Abstand der Quelle, verwendeter Abschirmungen, sowie Bestrahlungsdauer getestet wurden. Das Ziel war es hierbei zu erreichen, dass die Messungen zuverlässig ohne Fehlermeldungen durchlaufen und die Testdauer minimiert wird. Dies war notwendig, da zu hohe Strahlungsintensitäten zu einer Überlastung des Auslesesystems führen. Um die Qualität der Module zu beurteilen, muss bei dem Source-Scan eine Mindestanzahl von 10 Treffern pro Pixel erreicht werden. Durch eine Anpassung des Teststands, bei welcher die Halterung der Quelle und die Schiene an dem oberen Rand des Teststands befestigt wurden, konnte eine Konfiguration gefunden werden, die eine zuverlässige und stabile Durchführung des Source-Scans ermöglicht.

Im Rahmen der zukünftigen Produktion ist es notwendig, dass alle Tests möglichst ohne manuelle Anpassungen durchlaufen können, um die Produktions- und Testprozesse zu beschleunigen. Somit ist es besonders relevant, dass in Folge des Source-Scans das Auslesesystem nicht überfordert wird und die Messung nicht abbricht, wozu unter anderem der angepasste Testaufbau einen entscheidenden Teil zu beigetragen hat.

Die Vorproduktionsphase an dem Standort Universität Siegen ist inzwischen abgeschlossen und das Bauen und Testen von den Produktionsmodulen hat begonnen. Aktuell sind rund 40 Pixelmodule gebaut und getestet worden. Der veränderte Aufbau des Teststandes wurde genutzt, um diese Module zu testen und lieferte zuverlässige Ergebnisse. Zu der vollständigen Qualifikation fehlt noch ein Block, welcher aus Thermocycling und dem QC-Testvorgang besteht, der aktuell bearbeitet wird. Diese

Qualifizierung ist notwendig, um die Produktionsmodule vollständig in Siegen zu testen und somit den Produktions- und Testprozess lokal durchzuführen. Ein weiteres Ziel ist es, die Rate der produzierten Module weiter zu erhöhen, damit sämtliche Module gebaut und getestet sind, wenn sie für den Einbau in den ATLAS Detektor benötigt werden.

Literatur

- [1] O. Brüning, H. Burkhardt und S. Myers, *The Large Hadron Collider*, Progress in Particle and Nuclear Physics, Vol. 67 (2012), pp. 705–734, 2012, URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2012.03.001>.
- [2] O. Brüning und L. Rossi, *Chapter 1: High-Luminosity Large Hadron Collider*, In: I. Béjar Alonso et al. (Eds.), High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report, Vol. 10, CERN Yellow Reports: Monographs, 2020, URL: <https://doi.org/10.23731/CYRM-2020-0010.1>.
- [3] A. Robichaud-Véronneau, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, 2009, URL: <https://cds.cern.ch/record/1213517>.
- [4] ATLAS Kollaboration, *The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration*, Eur. Phys. J. C, Vol.70, No.3 (2010), pp.787–821, 2010, URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1366-7>.
- [5] ATLAS Kollaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST, Vol. 3 S08003 (2008), URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>.
- [6] ATLAS Kollaboration, *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector*, Techn. Ber., CERN, 2017, URL: <https://cds.cern.ch/record/2285585>.
- [7] J. Pater, *ATLAS Pixel Detector upgrade at High Luminosity LHC*, 2020, URL: https://www.researchgate.net/publication/344793281_ATLAS_Pixel_Detector_upgrade_at_High_Luminosity_LHC.
- [8] H. Kolanoski und N. Wermes, *Particle Detectors*, Oxford University Press, 2020, ISBN: 978-0-19-885836-2.
- [9] ATLAS Kollaboration, *ATLAS Pixel Detector electronics and sensors*, 2008, URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/07/P07007>.
- [10] L. Meng, *RD53A Module Testing Document*, URL: <https://cds.cern.ch/record/2702738> (besucht am 19.02.2025).
- [11] W. Demtröder, *Experimentalphysik 4*, Springer, 2017, ISBN: 978-3-662-52883-9.
- [12] B. V. Vasiliev, *The energy distribution of beta-electrons generated by 90 Sr/ 90 Y nuclei*, URL: https://www.researchgate.net/figure/The-energy-distribution-of-beta-electrons-generated-by-90-Sr-90-Y-nuclei_fig2_338480470 (besucht am 15.01.2025).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aktueller HL–LHC Plan [2].	2
2.1	Der Aufbau des ATLAS Detektors [3].	3
2.2	Schematischer Aufbau des Inneren Detektors [5].	5
2.3	Schematischer Querschnitt des Inneren Detektors [5]	6
2.4	Aufbau aus einer Simulation des ITk [6].	7
2.5	Schematischer Aufbau des ITk: in rot sind die Pixeldetektoren dargestellt, in blau die Streifendetektoren [6].	8
3.1	Aufbau der ITk Pixeldetektoren [7].	9
3.2	Detektionsprinzip der Pixeldetektoren [9].	11
3.3	Schema der Produktion der Pixelmodule [10].	11
4.1	Das kontinuierliche Betaspektrum [11].	14
4.2	Energiespektrum der ^{90}Sr - und ^{90}Y -Zerfälle [12].	15
4.3	Darstellung der Gesamtverluste, sowie Ionisationsverluste und Strahlungsverluste von Blei und Wasser gegen die Elektronenenergie [11].	16
4.4	Reichweite von Elektronen als Funktion der kinetischen Energie in Wasser, Aluminium und Blei [8].	17
5.1	Teststation der Pixelmodule in Siegen.	19
5.2	Angeschlossene Signalampel zum Anzeigen der Quellenposition.	20
6.1	Hitmap eines Source–Scans mit der ursprünglich eingesetzten Strontium-90 Quelle.	22
6.2	Hitmap mit der schwächeren Quelle.	23
6.3	Hitmap eines kombinierten Testlaufs.	23
6.4	Hitmap und Trefferhistogramm für Test–Run 000502 in 34 cm Höhe und für 20 min Bestrahlungsdauer.	25
6.5	Optimiertes Setup mit der Quellenhalterung, die an dem oberen Rand des Teststands befestigt ist.	25

Tabellenverzeichnis

6.1 Beispielsweise ausgewählte Testreihe mit variierender Höhe. 24

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich bei Prof. Dr. Markus Cristinziani für die Möglichkeit bedanken, meine Bachelorarbeit in einem sehr aktiven und interessanten Bereich durchführen zu können. Ebenso möchte ich mich für die Unterstützung und Hilfe bei den Forschungsarbeiten bedanken.

Mein besonderer Dank geht zudem an Dr. Qader Dorosti, welcher mich sowohl bei der Forschungsarbeit als auch beim Anfertigen der Bachelorarbeit immer unterstützt hat und mir immer mit seinem Rat zur Seite stand.

Ein weiterer Dank geht an Nico Malinowski, Nils Krengel, Luke Hammer und alle, die mir bei der Durchführung der Tests sowie bei dem Heranführen an das Setup geholfen haben und mich im Labor unterstützt haben.

Ebenso möchte ich mich bei Lars Maczey, Celine Radu und Jennifer Merz bedanken, welche mich bei dem Korrekturlesen der Arbeit viel unterstützt haben.

Als letztes möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, durch die ich überhaupt die Möglichkeit habe zu studieren und die mich auch im Studium immer unterstützt haben, indem ich mit meinen Problemen und Sorgen immer an sie wenden konnte.