



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

# Strahltest und Bestrahlung von Silizium-Teilchendetektor Prototypen

ausgeführt am

Institut für Hochenergiephysik

der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

unter Anleitung von

Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred KRAMMER

und

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas BERGAUER

von

Thomas Spielauer

Matrikelnummer: 0525208

Pernerstorfergasse 61/4

1100 Wien

17. September 2015, Wien



# Kurzfassung

Silizium Teilchendetektoren stellen heutzutage das wichtigste und genaueste Messinstrument in großen Teilchenphysikexperimenten dar. Die folgende Arbeit beschäftigt sich primär mit der Datenauswertung eines Strahltests sowie den dabei erkannten Effekten auf den eingesetzten Sensormodulen.

Der erste Teil der Arbeit diskutiert das Einsatzgebiet von Halbleiter Teilchendetektoren sowie ihr Funktionsprinzip. Desweiteren wird bereits auf Strahlenschäden eingegangen, die durch verschiedene Strahlungsquellen hervorgerufen werden können.

Im darauf folgenden zweiten Teil werden sowohl die eingesetzten Detektoren als auch der elektronische Aufbau des Auslesesystems, das während der durchgeführten Strahltests zum Einsatz kam, vorgestellt.

Der dritte Teil befasst sich mit der Auswertung der Daten. Die Funktionsweise der hierbei eingesetzten Software wurde vom Autor aus dem vorliegenden Quellcode rekonstruiert und anschließend um weitere Module, die eine Anpassung des Signalmodells an die Messdaten, eine Signal-Rauschabstandsberechnung sowie ein Report Modul, das entsprechende Grafiken und Berichte erzeugt, erweitert wurde, vorgestellt, wobei die eingesetzten Algorithmen und Modelle detailliert beschrieben werden.

Im darauf folgenden vierten Teil beschäftigt sich die Arbeit mit dem Versuchsaufbau, wobei zuerst Messungen in einem Teilchenstrahl am Super Proton Synchrotron des CERN erfolgten. Im Rahmen dieser Messungen konnte ein auffälliger Streifenbereich erkannt werden, in dem eine starke Abweichung der gemessenen Clusterbreiten auftrat.

Um diesen Effekt genauer betrachten zu können erfolgte daraufhin eine Bestrahlung der eingesetzten Sensoren mit Hilfe einer  $^{60}\text{Co}$  Gammaquelle, woraufhin ein weiterer Strahltest erfolgte.

Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse aus den Strahltests diskutiert. Die durch die Bestrahlung hervorgerufenen Oberflächenschäden in der  $\text{SiO}_2$  Oxidschicht, die sich auf dem Sensor befindet, werden aufgrund der unterschiedlichen Stärke der Abweichungen der gemessenen Clusterbreiten innerhalb des auffälligen Streifenbereichs als Hinweis auf eventuell auftretende Herstellungsfehler durch zusätzliche negative Ladungsträger im Bereich der Oxidschicht herangezogen. Diese Ergebnisse werden dann durch Vergleich mit parallel durchgeführten Messungen an den Detektormodulen verglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Symmetrien und B-Mesonen Physik . . . . .	6
1.2	Der Belle II Detektor . . . . .	7
1.3	Halbleiter Teilchendetektoren . . . . .	11
1.3.1	Bethe-Bloch Funktion . . . . .	11
1.3.2	Signalentstehung . . . . .	13
1.3.3	Positionsauffösung . . . . .	15
1.3.4	Strahlenschäden . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Verwendete Detektoren, Auslesesystem</b>	<b>18</b>
2.1	Detektoren . . . . .	19
2.2	Repeater Board . . . . .	19
2.3	Trigger . . . . .	21
2.4	FADC Board . . . . .	21
2.5	NECO Board . . . . .	22
2.6	VME Interface . . . . .	22
2.7	DAQ Software . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Datenauswertung</b>	<b>23</b>
3.1	Hephy Analysis Tool (Übernommene Module) . . . . .	23
3.1.1	Raw Data Reader . . . . .	23
3.1.2	Raw Data Converter . . . . .	24
3.1.3	Pedestal Evaluation . . . . .	25
3.1.4	Common Mode Correction . . . . .	25
3.1.5	Noise Evaluation . . . . .	26
3.1.6	Hit Detection . . . . .	27
3.1.7	Örtliches Clustering . . . . .	27
3.1.8	Zeitliches Clustering . . . . .	27
3.2	Hephy Analysis Tool (Neue Module) . . . . .	29
3.2.1	Hit Time Fitting . . . . .	29
3.2.2	Signal to Noise (SNR) Berechnung . . . . .	29
3.2.3	Standard Plots . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau und Durchführung</b>	<b>37</b>
4.1	Messsystem und Strahlquelle . . . . .	37
4.2	Bestrahlung . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>42</b>
5.1	Detektoren vor der Bestrahlung . . . . .	42
5.2	Detektoren nach der Bestrahlung . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>68</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Symmetrien und B-Mesonen Physik

In der modernen Physik spielt die Invarianz von physikalischen Gesetzen unter Symmetrietransformationen eine große Rolle. Das Noether Theorem[1] sagt voraus, dass aus jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems eine Erhaltungsgröße folgt. Hierbei sind unter Anderem die Invarianz der Wirkungsfunktion (das des Integrals über der Lagrange Dichtefunktion) unter Translation im Raum beziehungsweise Zeit sowie unter Rotation und Eichtransformation interessant. Aus diesen Symmetrien folgt, dass der Impuls (Translationsinvarianz in den Raumkoordinaten), die Energie (Translationsinvarianz in der Zeitkoordinate), der Drehimpuls (Rotationsinvarianz) sowie die Ladung (Invarianz unter Zeittransformation) Erhaltungsgrößen sein müssen.[2]

Das CPT-Theorem, das 1951 von Julian Schwinger formuliert wurde[3] setzt voraus, dass eine unter Lorentztransformation invariante Beschreibung physikalischer Gesetze, unter der Voraussetzung eines ebenfalls unter Lorentztransformation invarianten Vakuums sowie der Existenz eines Grundzustandes, ebenfalls unter der kombinierten Ladungskonjugation (C), Paritätstransformation (P) sowie Zeitinversion (T) invariant sein muss[3].

Experimentell sind hierbei diskrete Symmetrien wie die Ladungskonjugation (C), Räumliche Spiegelung (P) sowie Zeitumkehr (T) interessant. Bereits 1956 wurde von Chien-Shiung Wu durch die Betrachtung des Beta-Zerfalls von  $\text{Co}_{27}^{60} \rightarrow \text{Ni}_{28}^{60} + e^- + \bar{\nu}_e$  die maximale Verletzung der Paritätssymmetrie durch die schwache Wechselwirkung gezeigt[4].

Da gesamt die CPT Invarianz nicht verletzt werden darf, wurde angenommen, dass die Kombination aus Ladungs- und Paritätssymmetrie, das heißt der Symmetrieoperator CP, nicht verletzt wird. Wäre die Physik unter der CP Transformation invariant, würden die selben Gesetze sowohl für Materie als auch Antimaterie gelten. 1964 wurde jedoch beim Zerfall neutraler Kaonen gezeigt, dass auch die CP Symmetrie verletzt ist. In aktuellen Experimenten, bei denen der Zerfall von B-Mesonen betrachtet wurde, konnte ein noch stärkerer CP verletzender Effekt beobachtet werden (vgl. [5] Kapitel 12).

Die Verletzung der CP Symmetrie wird im aktuellen Standardmodell der Teilchenphysik durch die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix beschrieben, durch die die Umwandlung von Quarks zwischen verschiedenen Quark Flavours ermöglicht wird. Da

die 3x3 CKM Mischungsmatrix unitär sein muss, kann sie durch 3 reelle Parameter (Mischungswinkel) sowie eine komplexe Phase parametrisiert werden. Unter der Voraussetzung, dass zumindest 3 Quarkgenerationen vorhanden sind, kann ein nicht verschwindender Effekt durch die auftretende Phase beobachtet werden ([2], [5] Kapitel 11).

Zur Beobachtung von B-Meson Zerfällen kamen unter Anderem die Experimente Belle am japanischen KEK<sup>1</sup> sowie der BaBar Detektor am Stanford Linear Collider (SLAC)<sup>2</sup> zum Einsatz.

## 1.2 Der Belle II Detektor

Die in dieser Arbeit betrachteten Silizium Teilchendetektoren sind für die Verwendung im Detektor *Belle II* am *SuperKEKB*[6] Beschleuniger des japanischen Forschungszentrum KEK<sup>3</sup> gedacht. Hierbei handelt es sich um ein Kollisionsexperiment, das mit zwei getrennten Speicherringen bei asymmetrischen Energien arbeitet, wobei das Upgrade der Speicherringe vor allem eine Erhöhung der Luminosität von  $2.11 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  auf  $80 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  erzielen soll. Die geplanten Strahlenergien liegen bei SuperKEK-B anders als bei KEK-B bei 4GeV im *Low energy ring (LER)*, in dem Positronen beschleunigt werden sollen sowie bei 7GeV im *High energy ring (HER)*, in dem Elektronen beschleunigt werden. Die Änderung der Strahlenergien von früheren 3.5GeV im LER bzw. 8GeV im HER erfolgte um die Emittanz des Strahls zu reduzieren und damit ebenfalls die Luminosität zu erhöhen.

Die Interaktion der Strahlen erfolgt an einem einzelnen Interaktionspunkt, wobei die Kollision unter einem Winkel von 83mrad stattfindet (siehe Abbildung 1).

Rund um die Interaktionsregion wird der Detektor in mehreren Schichten aufgebaut. Die innerste Schicht wird durch den Pixel Detektor (PXD, siehe Abbildung 2) gebildet, der mit Hilfe von DEPFET Sensoren (Halbleiterdetektoren auf Siliziumbasis, bei denen innerhalb des p-dotierten Kanals ein stark negativ dotiertes internes Gate eingesetzt wird, dass über ein darüberliegendes p-Kanal MosFET ausgelesen wird) realisiert.[6]

Die nächste Schicht (38mm bis 140mm vom Interaktionspunkt entfernt) bildet der Silizium Vertex-Detektor (SVD, siehe Abbildung 3). Dieser dient in Zusammenarbeit mit

---

<sup>1</sup><http://belle.kek.jp/>

<sup>2</sup><http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>

<sup>3</sup><http://www.kek.jp>

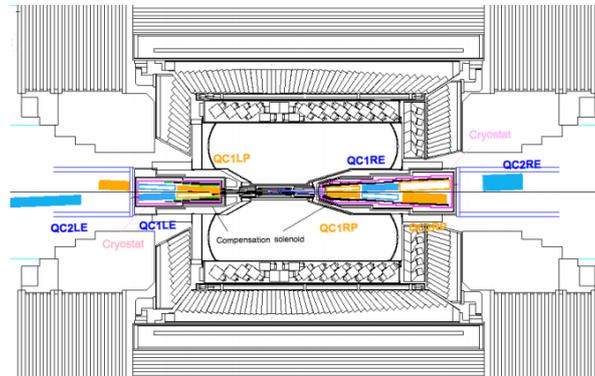


Abbildung 1: Interaktionsregion des SuperKEK-B Experiments[6]

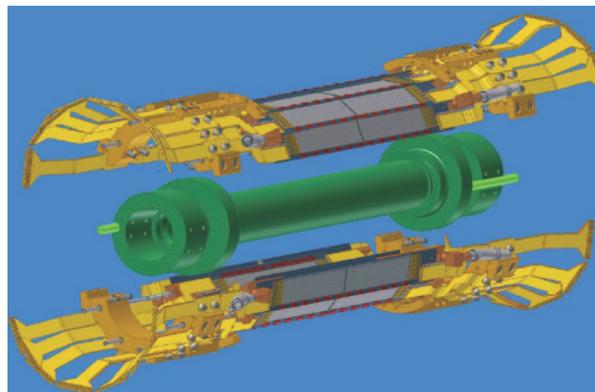


Abbildung 2: Pixel Detektor des SuperKEK-B Experiments[6]

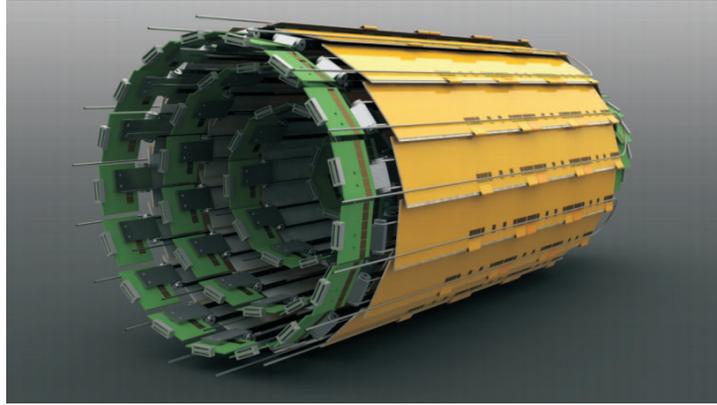


Abbildung 3: Belle2 Silizium Vertexdetektor (SVD)

dem Pixeldetektor der Vermessung von Teilchenspuren. Ziele des Detektordesigns waren geringe Masse, hohe Zeit- und Ortsauflösung, Immunität gegen Events durch den Hintergrund, Langzeitstabilität sowie hohe Strahlungshärte. Die zu erwartende Triggerrate liegt bei den Detektoren aufgrund des Beschleunigerdesigns bei bis zu 30kHz. Die Detektoren müssen Ereignisse in einem Winkelbereich von  $17^\circ$  bis  $150^\circ$  korrekt erfassen. Bei jedem Event dürfen aufgrund der Art und Weise der Rekonstruktion der Spuren aus den Driftkammern höchstens 10% der Streifen des SVDs ansprechen.[6]

Um diese Designziele zu erfüllen wurde bei der Entwicklung des SVD auf doppelseitige Silizium Streifendetektoren gesetzt. Diese Detektoren sowie das Auslesesystem werden in Kapitel 2.1 genauer beschrieben.

Der SVD wird in 4 Schichten (siehe Abbildung 4) mit den Radien 140mm, 115mm, 80mm sowie 38mm aufgebaut, was wiederum 187 Sensoren sowie 1902 Auslesechips entspricht. Am vorderen Ende des Detektors kommen trapezförmige Sensoren zum Einsatz, um eine Überlappung von 8 – 10% der Sensorfläche zu erreichen. Um die Verbreiterung des durch Elektronen im Sensor induzierten Signals aufgrund des Magnetfelds innerhalb des Detektors zu reduzieren werden alle Sensoren gegenüber der Tangentialebene verkippt (siehe Abbildung 5).

Außerhalb des Vertex Detektors folgt eine Driftkammer, die sich über einen Bereich von 160mm bis 1130mm erstreckt, wobei die Drähte innerhalb der Driftkammer in 56 Lagen (gesamt 9 Gruppen mit alternierender Ausrichtung) unterteilt werden.[6]

Die vorletzte Lage des Detektors bilden *Time-of-propagation* Zähler auf Basis eines Quarz Szintillators sowie in den Endcaps des Detektors *Aerogel Ring-Imaging Cherenkov*

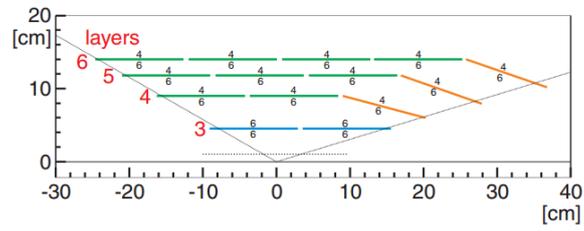


Abbildung 4: 4 SVD Lagen innerhalb des SuperKEK-B Experiments

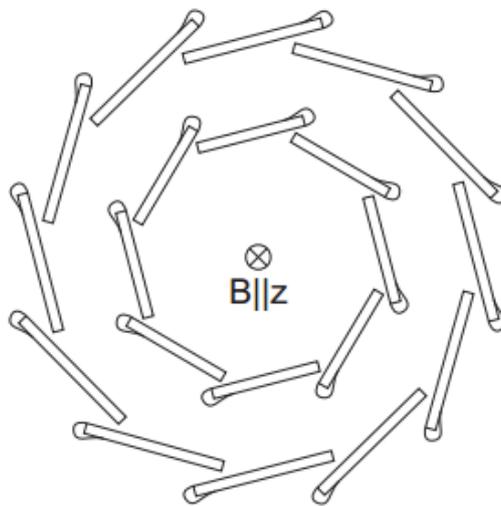


Abbildung 5: Verkipptes Layout der Detektormodule des SVD

(ARICH) Detektoren. Diese erlauben die Identifikation von Teilchen, die die Driftkammer durchqueren konnten und erlauben eine Unterscheidung von Pionen, Elektronen und Myonen bis in einem Bereich unterhalb von  $1\text{GeV}/c$ . [6]

Zuletzt wird der Detektor von einem elektromagnetischen Kalorimeter abgeschlossen, das einen Winkelbereich von  $12.5^\circ$  bis  $155.1^\circ$  abdeckt, sowie außerhalb des Magnetjochs mit einem Kaonen sowie Myonen Detektor umschlossen. (siehe Abbildung 6). [6]

## 1.3 Halbleiter Teilchendetektoren

Bei den im Folgenden betrachteten Detektoren handelt es sich um Halbleiter Teilchendetektoren auf der Basis von Silizium-Wafern. Bei diesen Detektoren handelt es sich um Strahlungs- bzw. Teilchendetektoren, bei denen das gemessene Signal durch Ionisationseffekte innerhalb einer Halbleiterschicht zustande kommt.

### 1.3.1 Bethe-Bloch Funktion

Die Energieabgabe von geladenen Teilchen beim Durchdringen von Materie wird durch die Bethe-Bloch Funktion [5] beschrieben.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 \right] \quad (1)$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \quad (2)$$

$$N_A = 6.022 * 10^{23} \text{mol}^{-1} \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}^{-1} \quad (4)$$

$$\beta = \left(\frac{v}{c}\right) \quad (5)$$

Hierbei handelt es sich bei  $Z$  um die Ordnungszahl beziehungsweise  $A$  um die Massezahl des Absorbers, bei  $z$  um die Ladung des einfallenden Teilchens, bei  $m_e$  um die Masse des Elektrons ( $0.510\text{MeV}$ ) sowie bei  $r_e$  um dessen Radius.  $I$  stellt die mittlere Anregungsenergie in eV dar. Bei  $T_{\max}$  handelt es sich um die maximale kinetische Energie, die in einer einzelnen Kollision an ein Elektron übertragen werden kann.

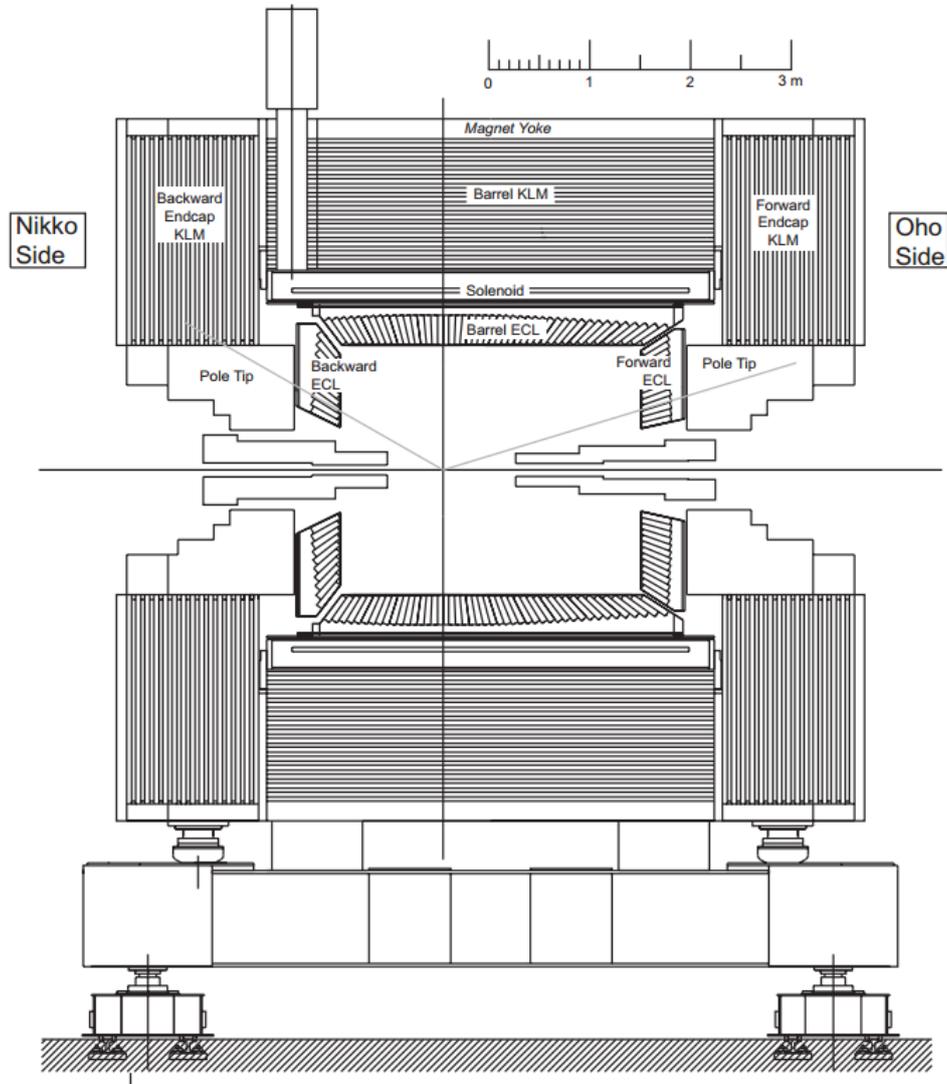


Abbildung 6: Elektromagnetisches Kalorimeter und Kaon/Myon Detektion[6]

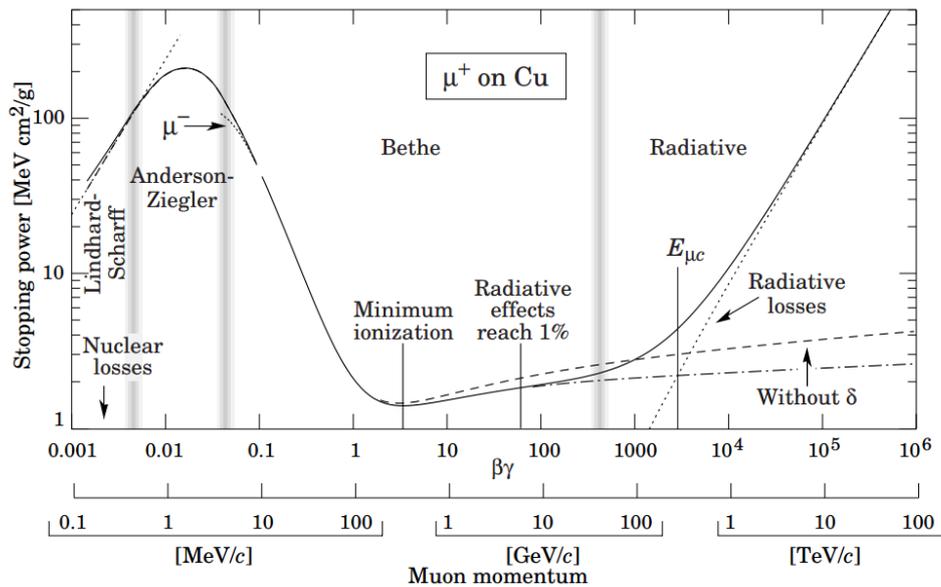


Abbildung 7: Bethe-Bloch,  $\langle -\frac{dE}{dx} \rangle$  positiver Myonen in Kupfer [5]

Die beschriebenen Effekte setzen sich durch Beiträge aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Ionisation der Detektoratome
- Anregung der Detektoratome
- Bremsstrahlungsbeiträge
- Cerenkov Strahlungsbeiträge
- Übergangsstrahlungsbeiträge

Wie aus der Abbildung 7 erkannt werden kann, werden bei den in der folgenden Arbeit relevanten Energien bis zu ca.  $120 \frac{\text{GeV}}{c}$  Beiträge aus Bremsstrahlung, Cerenkov Strahlung sowie Übergangsstrahlungsbeiträge nur eine geringe Rolle spielen. Der Großteil der Energieabgabe erfolgt durch Ionisation sowie Anregung der Detektoratome.

### 1.3.2 Signalentstehung

Halbleiter Teilchendetektoren bestehen wie Dioden aus einem Übergang zwischen einer p-dotierten und n-dotierten Schicht innerhalb eines Halbleiter-Substrats. Da zur Detektion von geladenen Teilchen Ionisationseffekte innerhalb des Halbleitersubstrats genutzt

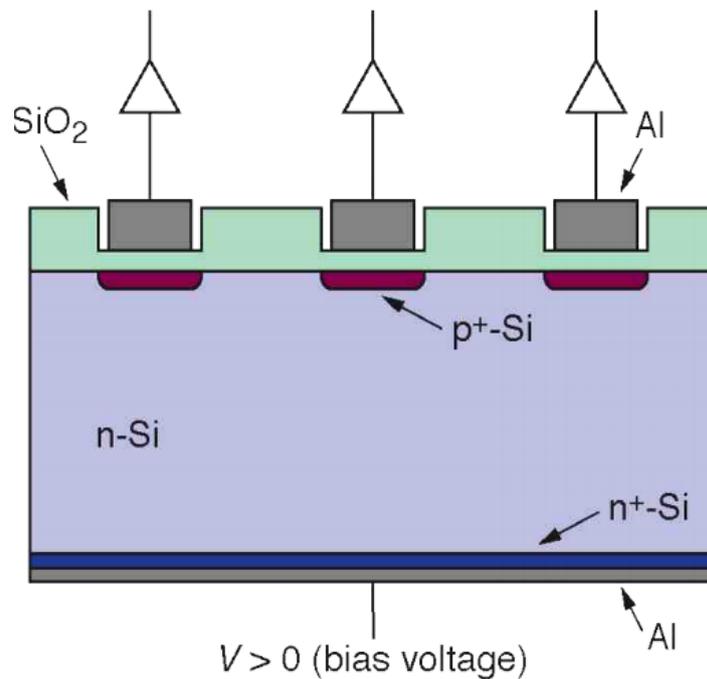


Abbildung 8: Schema des Halbleiterdetektors[7]

werden, muss zuerst eine von freien Ladungsträgern freie Zone (*Verarmungszone*) gebildet werden. Hierzu wird auf dem Halbleiterdetektor in Sperrrichtung, das heißt an der positiv dotierten Seite eine negative Spannung, eine Bias Spannung angelegt.

Durchdringt nun ein geladenes Teilchen den Detektor kommt es zur Ionisation. Hierbei entstehen sowohl positive als auch negative freie Ladungen in Form von Elektronen und ionisierten Atomen, die wiederum im elektrischen Feld der Bias Spannung driften. Durch diese Bewegung entsteht das Signal, welches sich durch einen schnellen elektronischen Anteil und einen langsamen durch die Löcher bestimmten Anteil zusammensetzt. Die Dauer des Signals wird sowohl durch die Dicke des Detektormaterials, der Position der Interaktion sowie durch die Diffusionskoeffizienten bestimmt.

Um sowohl Bias Spannung aufbringen als auch das Signal auslesen zu können, wird die Bias Spannung über serielle Induktivitäten (die einen Tiefpassfilter bilden), das Signal hingegen über serielle Kapazitäten (die wiederum einen Hochpassfilter bilden) aus dem Detektor geführt. Darauf folgt eine Vorverstärkung des Signals sowie durch die verwendeten Kapazitäten, Induktivitäten und internen Eigenschaften des Vorverstärkers eine Formung des Signals. Das Signal, das im Detektor entsteht, folgt einer Landau Verteilung (siehe Grafik 9). Da die Ausleselektronik über einen Signal-Shaper verfügt, durch

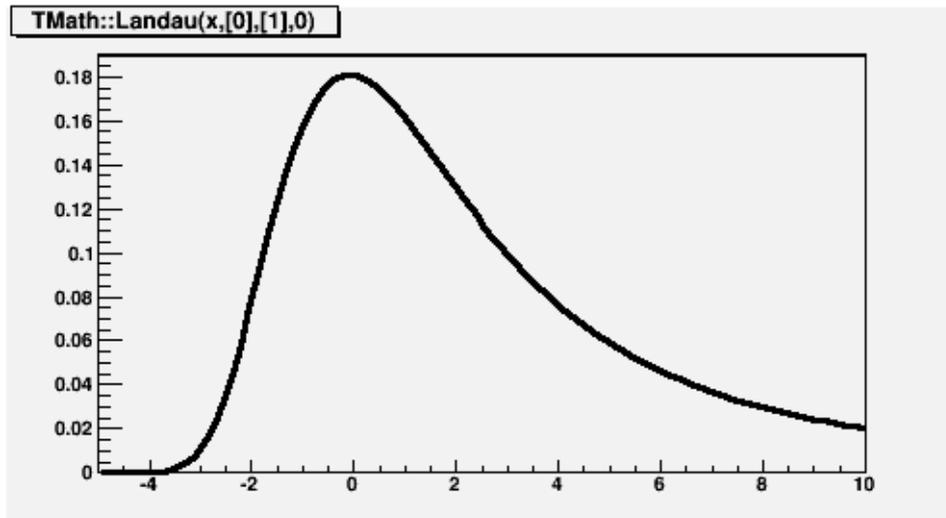


Abbildung 9: Landau Verteilung[8]

den der Signalverlauf durch ein elektronisch wählbares Filternetzwerk vorgegeben wird, entspricht die Form des ausgelesenen Signals nicht mehr exakt einer Landau Verteilung. In der vorliegenden Arbeit wurde die Form des Signals durch ein RC-CR Netzwerk vorgegeben (*Peak mode* der Ausleseelektronik). In diesem Fall folgt das Signal nur mehr näherungsweise einer Landau Verteilungsfunktion, wobei die hierbei auftretenden Abweichungen als klein angenommen wurden. Alternativ könnte mit der vorhandenen Ausleseelektronik der sogenannte *deconvolution mode* zum Einsatz kommen. In diesem Fall wird ein *Dekonvolutions* Algorithmus auf das Signal angewendet, das heißt die Umkehrung der Faltungsoperation – in diesem Fall würde das Signal näherungsweise einer Gauß-Verteilung folgen.

### 1.3.3 Positionsauflösung

Die Positionsauflösung erreichen Siliziumdetektoren zum Beispiel durch die Verwendung von Streifen oder Pixeln auf der positiv dotierten Seite des Detektors (p-Seite), die negativ dotierte Seite (n-Seite) wird komplett metallisiert. Jeder Streifen wird getrennt ausgelesen, wobei sowohl analoge als auch digitale Systeme zum Einsatz kommen können. Die Positionsauflösung eines Streifendetektors ist sowohl durch den Streifenabstand als auch durch die Auflösung der verwendeten Analog-Digital Wandler (*ADC*) bestimmt. Positionen im Raum zwischen den Streifen können durch die Ladungsträgerverteilung errechnet werden.

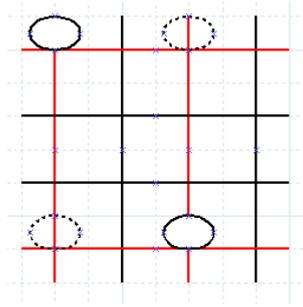


Abbildung 10: Auftreten von falschen Events beim 2D Auslesevorgang

Je nach Geometrie des einzelnen Detektors sowie des Detektorsystems kann die Position der Ereignisse in einer oder in zwei Dimensionen ermittelt werden. Werden zum Beispiel Pixel oder Streifen sowohl auf der Oberseite als auch der Unterseite des Detektors verwendet, ist eine zweidimensionale Auflösung der Position möglich. Im letzteren Fall kommt es allerdings beim Auftreten mehrerer Ereignisse zu mehreren fälschlicher Weise erkannten Trefferpositionen - 2 reale Ereignisse liefern hier 4 Signale (siehe Abbildung 10).

Werden nur Streifen auf einer Seite des Detektors eingesetzt und die Unterseite komplett metallisiert, kann nur eine Positionsermittlung in einer Dimension erfolgen. Um dennoch Teilchenspuren rekonstruieren zu können, werden, sofern dies gewünscht ist, mehrere gegeneinander verdrehte Detektoren eingesetzt.

### 1.3.4 Strahlenschäden

Die Wechselwirkung der Detektoren mit den Teilchen führt auch zu Strahlungsschäden. Diese können grob in 2 Kategorien unterteilt werden: Oberflächenschäden und Substratschäden.

**Substratschäden** Substratschäden können unter Anderem durch die Verschiebung einzelner Atome von ihren Gitterpunkten entstehen (so genannte *Punktdefekte*). In diesem Fall bildet sich ein Frenkel-Paar, das aus einer Leerstelle sowie einem Zwischengitterion besteht. Die hierfür notwendige minimale Energie liegt bei einem Silizium Einkristall bei ca. 25eV[9].

Desweiteren können bei höheren Energien Stoßkaskaden entstehen, durch die mehrere Atome aus ihren Gitterpositionen verschoben werden, wodurch sich *Clusterdefekte* bilden

können. Die minimale hierfür notwendige Energie liegt bei einem Silizium Einkristall bei ca. 5keV

Zuletzt kann es innerhalb des Substrats durch nukleare Wechselwirkungen auch zu Transmutation oder Neutroneneinfang kommen, wodurch Fremdatome entstehen und zusätzliche Ladungsträger oder Fehlstellen gebildet werden können.

Durch die Entstehung neuer Fehlstellen sowie neuer Ladungsträger kann es durch die Beeinflussung der Raumladung zur Entstehung von Rekombinationszentren kommen. Innerhalb dieser können bestehende Elektron-Loch-Paare einerseits einfacher rekombinieren, andererseits ist es einfacher Elektron-Loch-Paare zu emittieren. Hierdurch wird unter Anderem der Dunkelstrom als auch das Rauschen des Detektors erhöht. Zusätzlich kann es durch einen kombinierten Einfangs- und Erzeugungsprozess zu einer starken Verzögerung der Ladungsträger kommen, wodurch das Signal nicht mehr innerhalb des Abtastzeitraums erfasst wird.

Werden genügend zusätzliche Ladungsträger in das Substrat eingebracht, kann es durch die Änderung der Raumladungsdichte zu einer sogenannten *Typeninversion* kommen, bei der negativ dotierte Halbleiterregionen in positiv dotierte Halbleiterregionen umgeladen werden können. Wird eine Struktur aus n-Substrat sowie p-Implantaten und einer sehr stark negativ dotierten gegenüberliegenden Schicht verwendet, wird der p-n Übergang innerhalb des Sensors durch die Typeninversion verschoben, wodurch ein weiterer Betrieb des Detektors mit ansteigender Bias-Spannung weiterhin möglich ist.

Aus der benötigten minimalen Energie von 25eV für Punktdefekte sowie 5keV für Clusterdefekte kann gefolgert werden, dass diese durch Neutronen mit kinetischen Energien über 185eV (Frenkel-Paar) beziehungsweise 35keV (Clusterdefekte) sowie durch Elektronen mit kinetischen Energien über 255keV (Frenkel-Paar) beziehungsweise 8MeV (Clusterdefekte) hervorgerufen werden können.

Bei Photonen erfolgt bei Compton Streuung ein maximaler Energieübertrag von  $E_{e,\max} = \frac{2E_\gamma^2}{1+2E_\gamma}$  an das Photon. Hieraus kann durch

$$E_\gamma = \frac{E_{e,\max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{E_{e,\max}}{2}\right)^2 + \frac{E_e}{2}} \quad (6)$$

gefolgert werden, dass Punktdefekte ab einer Energie von ca. 25.5keV und Clusterdefekte

ab einer Photonenenergie von ca. 8MeV auftreten können.[9]

Schäden am Substrat werden demnach primär durch schwere und stark interagierende Teilchen hervorgerufen (wie zum Beispiel Protonen, Neutronen oder Pionen).

**Oberflächenschäden** Da Silizium Halbleiterdetektoren im Normalfall beinahe komplett mit einer SiO<sub>2</sub> Schicht überzogen werden, spielen vor Allem Effekte innerhalb des Oxids eine Rolle. Da es sich bei der Oxidschicht um eine stark irreguläre Struktur handelt, spielen Verschiebungen keine relevante Rolle.

Da die Mobilität der Elektronen innerhalb des Oxids viel höher ist, als die Mobilität der Löcher, kommt es durch das schnelle Auseinanderdiffundieren der Paare zu einer positiven Aufladung des Oxids (die entstehenden Löcher sind quasi permanent vorhanden, die negativen Ladungen sammeln sich in stark positiv geladenen Bereichen). Durch diese Aufladung und das dadurch entstehende elektrische Feld kann die Verarmungszone des p-n Übergangs geschmälert werden, wodurch es zu einer besseren Leitfähigkeit und damit einem höheren Dunkelstrom, niedrigerem gemessenen Signal und hiermit zu einem Anstieg des Rauschens kommen kann.[10]

Desweiteren kommt es durch die zusätzlichen positiven Ladungen zu einer stärkeren kapazitiven Kopplung innerhalb des Detektors, durch die es bei hohen Signalfrequenzen zu kurzschlussähnlichen Effekten zwischen Detektorkomponenten kommen kann.

Zusätzlich zu Schäden am Detektor kann es zu Fehlern an der eingesetzten Elektronik kommen, wobei hier sowohl temporäre Fehler (zum Beispiel *latch-up*, das heißt einem niederomigen eingerasteten Zustand, der durch den Stromfluss zu einer thermischen Zerstörung der Bauteile führen kann, oder geänderten Inhalten in Speicherzellen, wobei letztere durch Einsatz von Korrekturverfahren wie dem *Error-Correcting Code (ECC)* erkannt oder korrigiert werden können) oder ebenfalls durch die Akkumulation von parasitären Ladungen im Oxid permanente Fehler auftreten können.

## 2 Verwendete Detektoren, Auslesesystem

Die Reihenfolge der im Folgenden beschriebenen Komponenten entspricht zugleich der Reihenfolge, in der die Komponenten miteinander in Verbindung stehen, als auch der zunehmenden Entfernung vom Interaktionspunkt.

## 2.1 Detektoren

In der folgenden Arbeit wurden Silizium Teilchendetektoren betrachtet, die einseitig auf der p-Seite über Streifen verfügten, auf der n-Seite hingegen über eine metallisierte Oberfläche. Die Streifen wurden in einem Abstand von  $80\mu\text{m}$  aufgebracht und liegen parallel. Die Dicke der Wafer lag bei  $300\mu\text{m}$ . Während des Testbeams wurden 2 Module (siehe Abbildung 11) verwendet.

Um die jeweils 256 Streifen eines Sensors auszulesen, verfügte dieser über eine analoge Ausleseelektronik, die mit Hilfe von je zwei APV25 Chips[11] realisiert wurde. Bei dem APV25 handelt es sich um eine analoge Pipeline, in der die Sensorsignale analog gespeichert und jeden Taktzyklus innerhalb einer Pipeline weitergereicht werden. Desweiteren wird die aktuelle Streifenladung jeden Taktzyklus in die erste Pipelinestufe geschoben. Die Pipeline des APV25 bietet dabei 128 Kanäle mit einer Tiefe von je 129 Einträgen bei einer Betriebsfrequenz von 40 MHz, wobei jeder Kanal über einen eigenen Vorverstärker sowie Signal-Shaper verfügt (siehe Abbildung 12).

Zur Kalibrierung des Messsystems verfügt der APV25 über eine Schaltung, die es ermöglicht eine vorbestimmte Ladung in die einzelnen Kanäle einzuspeisen. Hierbei existieren 8 Sets, die jeweils 16 Vorverstärker ansprechen können, wobei jeweils die Verstärker  $8 * n + s$  angesprochen werden (d.h. Kanäle 0,8,16,... im Set 1, Kanäle 1,9,17,... im Set 2).

Das Auslesesystem kann nun eine beliebige Stufe innerhalb der Pipeline auswählen und analog auslesen. Hierzu wird während des Strahltests ein externes Triggersystem benötigt, wobei ein System aus Photomultipliern verwendet wird, deren Triggersignale in Koinzidenz auftreten müssen. Nach dessen Auslösung wird 1 beziehungsweise ein vielfaches von 3 Pipelinestufen ausgelesen. Wird der Auslesevorgang für eine Pipelinestufe nicht gestartet, werden gemessene Ladungen nach dem Erreichen der letzten Pipelinestufe verworfen. Während der Kalibrierung des Messsystems ist es desweiteren möglich, den Auslesevorgang unter Umgehung des Triggersystems durch Software auszulösen.

## 2.2 Repeater Board

Direkt an den Detektoren wird ein Repeater Board eingesetzt, auf dem einerseits die Spannungsversorgung der Detektoren zur Verfügung gestellt, als auch das Datensignal

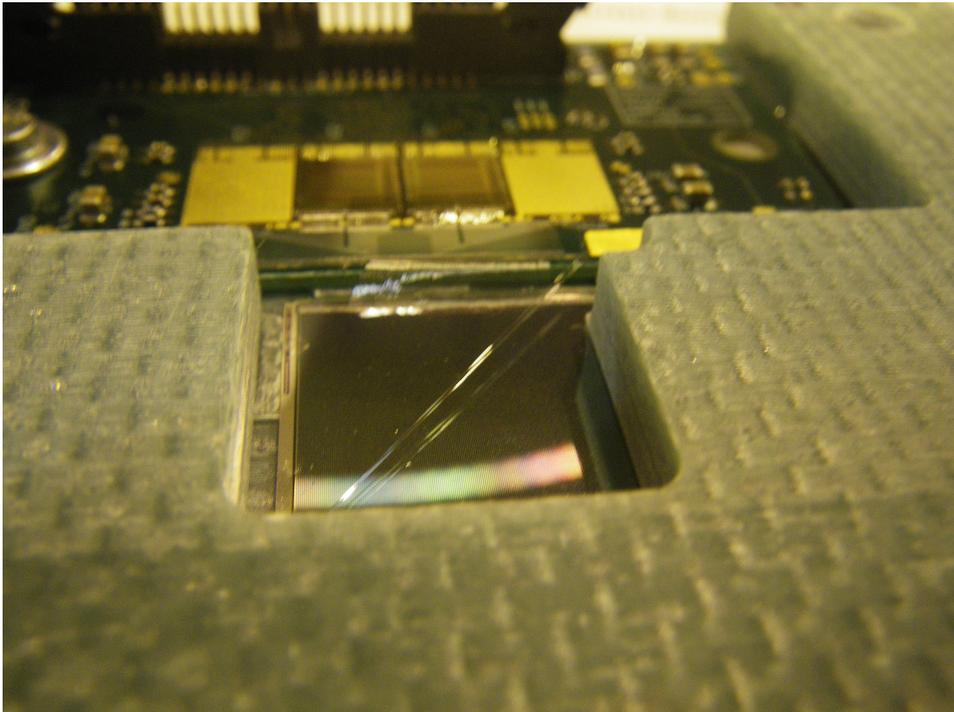


Abbildung 11: Halbleiter Teilchendetektor Modul

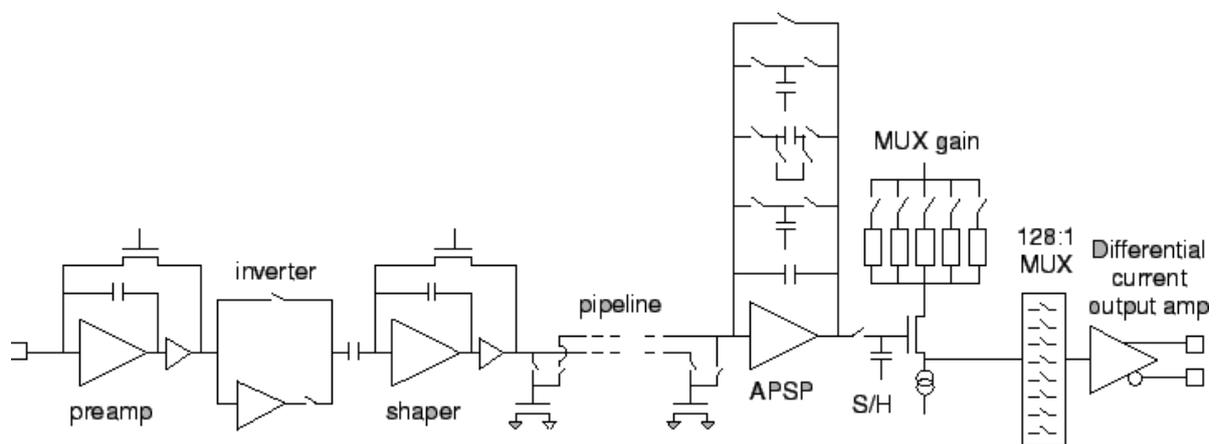


Abbildung 12: Blockdiagramm des APV25 Chips[12]

auf Twisted Pair Kabel übertragen wird. Die Konfiguration der Readout Chips (APV25) erfolgt über einen I<sup>2</sup>C Bus.

Wenn gerade keine Daten ausgelesen werden, senden die APV25 Chips alle 35 Taktzyklen einen Synchronisationspuls. Sobald ein Trigger ausgelöst wurde, wartet der Chip auf den Beginn der nächsten 35 Taktzyklen langen Periode, bevor er einen Header (3 Bits mit dem Wert 1 zur Synchronisation des Systems), eine Adresse (8 Bit), ein Error Bit sowie 128 analoge Datenwerte gefolgt von einem weiteren Synchronisationspuls überträgt. Im Fehlerfall kann das Fehlerregister über ein I<sup>2</sup>C Bussystem ausgelesen werden.

## 2.3 Trigger

Da ein Auslesen der APV25 Pipelines nur nach einer Triggerung erfolgt, existieren verschiedene Trigger-Modi. Eine Triggerung erfolgt entweder durch das Auslösen eines Szintillators (Hardware Triggerung), wobei die Signalisierung über den TRIG Eingang des APV25 erfolgt oder manuell durch Software über ein I<sup>2</sup>C Kommando. Der erste Modus dient der Datennahme von Ereignissen, der zweite Modus wird vor allem für die Kalibrierung des Systems (unter anderem des Rauschens, der ADC Empfindlichkeit, etc.) benötigt.

Da ein einzelner Photomultiplier zu hohes Rauschen aufweisen würde, wurde ein Koinzidenzsystem verwendet, das nur auslöst, wenn beide auf dem Szintillator eingesetzten Photomultiplier simultan ausgelöst werden.

## 2.4 FADC Board

Das *Flash Analog Digital Converter (FADC)* Board stellt das Herzstück des Readout Systems und damit das Interface zwischen dem *Versa Module Eurocard-Bus (VMEBus)*[13] sowie den Signalen der Detektoren dar. Die Datenübertragung von den Detektoren erfolgt über das Repeater Board. Die ankommenden Signale werden mit Hilfe von Flash Analog-Digital Wandlern (*FADC*) in Digitalsignale konvertiert.

Das FADC Board liest die Signale beginnend mit einem digitalen Synchronisationspuls und reicht sie nach einem Trigger, der entweder durch eine Hardwarekomponente wie einen Szintillator oder aber auch ein Softwareereignis ausgelöst werden kann, an den VME Bus weiter.

Das Board könnte in einer späteren Ausbaustufe auch Aufgaben wie die *Zero suppression* oder *Common mode correction* selbstständig durchführen. Auch eine Implementierung des *Hit time fittings*, auf das später (siehe Kapitel 3.2.1) noch genauer eingegangen wird, wäre auf Basis von Lookup Tabellen möglich. Diese Aufgaben wurden bei den hier beschriebenen Messungen komplett innerhalb der später beschriebenen Datenerfassungs- beziehungsweise Auswertsoftware offline realisiert, während der Messung erfolgte nur das Aufzeichnen von Rohdaten der Sensoren.

## 2.5 NECO Board

Um die Sensoren und das Triggersystem ansteuern zu können, kommt während des Tests eine weitere Komponente - das NECO Board - zum Einsatz. Über dieses Board können Komponenten über den I2C Bus programmiert und Einstellungen vorgenommen werden.

## 2.6 VME Interface

Um die Daten des Testsystems auslesen zu können, wurde ein 64 Bit VME Interface genutzt. Dieses erlaubt über eine PCI Express Karte im DAQ Computer Zugriff auf den VME Bus. Hierbei kam die Kombination der beiden CAEN Komponenten V2718 (VME Interface) und A2818 (PCI Express Karte) zum Einsatz.

Die Steuerung der Auslesevorgänge erfolgte nicht auf der Basis von VME Interrupts sondern mit Hilfe eines lokalen Timers auf dem DAQ System, mit dessen Hilfe periodisch Daten vom NECO Board angefordert wurden. Außerhalb des Testsystems würde dieses System die Daten selbstständig an ein Onlineanalyse- oder Datenverarbeitungssystem weiterreichen.

## 2.7 DAQ Software

Zur Online-Erfassung der Daten kam die Software APVDAQ[14] zum Einsatz, wobei mit Hilfe dieser Software die Decodierung der APV25 Datenströme aus den via VME übertragenen erfassten Daten der FADCs erfolgt. Die DAQ Software sucht innerhalb der ADC Samples nach den Headern der einzelnen Pakete der APVs, führt eine Synchronisation durch und ist dadurch in der Lage einzelne ADC Samples einzelnen ausgelesenen Streifen

zuzuordnen. Die Festlegung des optimalen Abtastzeitpunkts erfolgte manuell, indem die Verzögerung zwischen Beginn der Digitalisierung und den Synchronisationspulsen der APVs innerhalb eines Plots der erfassten Daten ausgewählt wurde.

Die Daten wurden in Binärdateien aufgezeichnet und zur späteren Analyse auf ein Analysesystem übertragen. Diese aufgezeichneten Daten wurden offline mit dem *Hephy Analysis Tools* (HAT) analysiert.

## 3 Datenauswertung

### 3.1 Hephy Analysis Tool (Übernommene Module)

Die Auswertung der mittels der DAQ aufgezeichneten Daten erfolgte offline mit dem *Hephy Analysis Tool (HAT)*, dessen Funktionsweise im Folgenden ebenfalls aus dem Quelltext rekonstruiert wurde. Die Events werden seriell eingelesen und in mehreren Stufen verarbeitet. Hierbei erfolgte zuerst eine Konvertierung in ein internes Datenformat, danach eine Korrektur der gemessenen ADC Werte um die Arbeitspunkte der Verstärker und ADCs zu korrigieren sowie eine Schätzung des Rauschens der einzelnen Kanäle. Darauf folgte die Erkennung von einzelnen getroffenen Streifen sowie örtliches (d.h. nach Streifennummer) sowie zeitliches Clustering der Treffer[15].

Nach der Lokalisierung der Cluster erfolgt das *Hit-time finding*, das zugleich die echte Amplitude sowie den echten Treffzeitpunkt aus den zu diskreten Zeitpunkten gemessenen Messwerten, die damit einem Quantisierungsfehler unterliegen, schätzt. Zuletzt werden Signal-Rauschabstände der einzelnen Sensormodule, einzelnen Bereichen innerhalb dieser Module sowie Streifen berechnet und eine für den Nutzer interpretierbare Ausgabe in Form einiger Plots erzeugt.

#### 3.1.1 Raw Data Reader

Der *Raw Data Reader* (dessen Implementierung sich in der Klasse `TRawDataReader` befindet) kümmert sich um das Einlesen der Messdaten aus den Datendateien. Hierbei wird zuerst der Event Header und danach die Rohdaten jedes ADCs aus der Datendatei gelesen. Da Datendateien auch auf Datenträgern mit FAT Dateisystem gespeichert werden können müssen, werden sie in Teile  $< 2\text{GByte}$  aufgespaltet, die fortlaufend durchnummeriert

riert werden. Der *Raw Data Reader* übernimmt hierbei die Auswahl der entsprechenden Datendateien.

Bei dem Event Header, der vor den entsprechenden Rohdaten gespeichert wird, handelt es sich um Informationen, die von der DAQ Software erzeugt wurden. Dieser enthält Informationen über die Ereignisnummer, den Triggerzeitpunkt, der durch das Trigger-system gemessen wurde, die Anzahl der *subitems*, das heißt wie oft die Messung nach der Triggerung wiederholt wurde, die Anzahl der ausgelesenen APV Chips sowie die Anzahl der verwendeten ADCs. Desweiteren sind Felder für den aktuellen FADC Modus (aktivierte Nullunterdrückung, Anwendung von Kalibrationskurven, etc.) vorgesehen, die im aktuellen System nicht verwendet und von der Datenauswertungssoftware ignoriert werden.

Da sowohl die Kalibrations-Events benötigt, als auch eventuelle Events zu Beginn der Messung übersprungen werden sollen, können 2 Parameter gesetzt werden, die das Verhalten des Filters kontrollieren:

**startevents** Gibt eine Anzahl von Events an, die zu Beginn (bereits vor der Kalibration) übersprungen werden sollen

**initevents** Geben an, wie viele Events für die Kalibrierung benötigt werden.

### 3.1.2 Raw Data Converter

Der Raw Data Converter wandelt unter anderem den erfassten Zeitpunkt des Ereignisses um. Die im Header angegebene Zeit wird in Einheiten der System Clock übergeben. Für Events außerhalb der zur Kalibration verwendeten Init-Events wird kein Triggerzeitpunkt berechnet.

Desweiteren verarbeitet der Raw Data Converter die von den APVs übertragenen Header-Daten, bildet die gemessenen Daten auf interne Datenstrukturen ab, bei denen Streifen der einzelnen Module abfolgend und nach Zonen sortiert gespeichert werden und speichert einige der übertragenen Headerdaten, die in der späteren Analyse benötigt werden.

### 3.1.3 Pedestal Evaluation

Die Pedestal Evaluation erfolgt für die ersten *initevnts*. Hierbei werden die Signale jedes einzelnen Kanals für diese Events summiert und ihr arithmetisches Mittel berechnet. Hierdurch wird der Arbeitspunkt der ADCs gemessen. Spätere Messdaten werden immer relativ zu diesem Arbeitspunkt interpretiert.

$$\text{pedestal}(k) = \sum_{i=1}^{\text{initevnts}} \frac{\text{signal}(k)}{\text{initevnts}} \quad (7)$$

### 3.1.4 Common Mode Correction

Das Common Mode Correction Modul kümmert sich in 2 Schritten um die Common Mode Korrektur, d.h. die Berechnung des Arbeitspunktes von jeweils 32 aufeinanderfolgenden Kanälen der APVs.

Im ersten Schritt werden die während der *pedestal evaluation* berechneten Arbeitspunkte der einzelnen Kanäle von den gemessenen Signalen subtrahiert. Daraufhin wird für jede Gruppe von 32 Streifen der Mittelwert aller während der Initialisierungsevents gemessenen Signale gebildet (die kleinsten und größten 2 bzw. 5 Messdaten werden hierbei jeweils verworfen, um Ausreißer nicht mit zu verarbeiten). Zuletzt erfolgt in diesem Schritt die Berechnung des Rauschens, indem für alle Initevnts die quadratische Abweichung der gemessenen Signale vom vorhin berechneten Mittelwert gebildet wird.

$$\text{pedsub}(k) = \text{signal}(k) - \text{pedestal}(k) \quad (8)$$

$$\text{cmdata}(k \gg 5)[i] = \text{pedsub}(k) \quad (9)$$

$$\text{cmcmean}(k) = \text{mean}(\text{cmdata}(k \gg 5)) \quad (10)$$

Im zweiten Schritt wird der vorhin berechnete Mittelwert des Arbeitspunktes von den Bereits um ihre *Pedestals* korrigierten Messdaten subtrahiert, um alle gemessenen Signale relativ zum selben Arbeitspunkt zu betrachten.

$$\text{pedsubcmc}(k) = \text{pedsub}(k) - \text{cmcmean} \gg 5 \quad (11)$$

Bei der Berechnung des Rauschens wird davon ausgegangen, dass das Detektormodul während der Datenaufzeichnung der Initialisierungsevents nicht von messbaren Teilchen getroffen wurde.

### 3.1.5 Noise Evaluation

Für jeden Streifen werden im ersten Schritt drei verschiedene Rauschgrößen berechnet:

$$\text{CommonModeNoise}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{\text{channels} * \text{apvs}} \text{cmcmean}^2(i)}{\text{channels} * \text{apvs}} \quad (12)$$

$$\text{SNoise}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{\text{channels} * \text{apvs}} \text{pedsubcmc}^2(i)}{\text{channels} * \text{apvs}} \quad (13)$$

$$\text{RawNoise}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{\text{channels} * \text{apvs}} \text{pedsub}^2(i)}{\text{channels} * \text{apvs}} \quad (14)$$

Strips deren Rauschen oberhalb eines konfigurierbaren Grenzwertes (z.B. bei den vorliegenden Analysen oberhalb des 2.5-fachen Rauschpegels aller Streifen innerhalb der Streifengruppe) liegt werden als *noisy strips* markiert und in der weiteren Analyse nicht mehr betrachtet.

Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung des modulweiten Rauschens. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Rauschen der Signale aufgrund seines thermischen Ursprungs der Gaußverteilung folgt. Es erfolgt ein Fit einer Gauß'schen Verteilungsfunktion. Streifen deren Rauschen oberhalb eines Grenzwertes (in den meisten Analysen mit einem Rauschen oberhalb des 2.5 fachen durchschnittlichen Rauschpegels) liegt, werden ebenfalls in der weiteren Analyse nicht mehr betrachtet.

### 3.1.6 Hit Detection

Um Signale vom Rauschen zu trennen, werden während der *Hit Detection* Streifen als getroffen markiert, die ein Signal oberhalb eines Vielfachen des Rauschens aufweisen. Bei den meisten Analysen wird hier für den Seed Streifen eines Clusters, das ist ein Streifen, von dem aus die Treffererkennung einen Cluster rekonstruiert (siehe Abschnitt 3.1.7), ein Signal oberhalb des fünffachen Rauschpegels vorausgesetzt, für alle anderen möglichen Streifen innerhalb eines Clusters das 3-fache des Rauschpegels.

### 3.1.7 Örtliches Clustering

Das örtliche Clustering sucht nach Streifen, die innerhalb eines einzelnen Subevents (das heißt zu einem einzelnen Zeitpunkt) zum selben Ereignis gehören. Hierzu wird zuerst ein Seed Streifen gesucht (siehe Abbildung 13, 1. Schritt), der den entsprechenden Grenzwert für Seed-Streifen überschritten hat. Von diesem ausgehend werden alle Streifen links und rechts ausgewählt, deren Messwerte oberhalb des gewählten Grenzwerts für als getroffen markierte Streifen liegen, und einem Cluster zugewiesen (Schritte 2, 3 und 4 in Abbildung 13).

Überlappen erkannte Cluster oder liegen diese zu nah aneinander (z.B. weniger als ein Streifen Abstand, wobei dieser Abstand konfigurierbar ist), werden beide Cluster verworfen, da keine eindeutige Zuordnung der Signale zu einem Cluster erfolgen kann (*Pile-up*).

### 3.1.8 Zeitliches Clustering

Nachdem das örtliche Clustering für jedes Subevent erfolgt, werden nun zusammengehörige Cluster in aufeinanderfolgenden Subevents, das heißt zu aufeinander folgenden Zeiten, gesucht. Hierzu werden die Clustergrenzen so gewählt, dass sie alle Streifen, die in mindestens einem der Subevents als getroffen markiert wurden, innerhalb dieser Clustergrenzen liegen, selbst wenn sie in anderen Subevents nicht als getroffen erkannt wurden (Abbildung 13, letzter Schritt).

Ist keine eindeutige Zuordnung der Cluster zueinander möglich (zum Beispiel, weil ein Cluster im ersten Subevent zu zwei Clustern in einem anderen Subevent gehören könnte), werden die entsprechenden Cluster verworfen.

		Streifen	n+0	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
1. Iteration	Subevent Index										S		
		0									S		
		1	T	S	T						S		
		2									S	T	
		3			T	S	T	T		T	S	T	T
		4			T	S	T						
	5				T	S							
2. Iteration		0									S		
		1	T	S	T						S		
		2									S	T	
		3			T	S	T	T		T	S	T	T
		4			T	S	T						
		5				T	S						
3. Iteration		0									S		
		1	T	S	T						S		
		2									S	T	
		3			T	S	T	T		T	S	T	T
		4			T	S	T						
		5				T	S						
4. Iteration		0									S		
		1	T	S	T						S		
		2									S	T	
		3			T	S	T	T		T	S	T	T
		4			T	S	T						
		5				T	S						
5. Iteration		0									S		
		1	T	S	T						S		
		2									S	T	
		3			T	S	T	T		T	S	T	T
		4			T	S	T						
		5				T	S						

Abbildung 13: Clustering Algorithmus (Streifen mit Signal über der Seed Schwelle mit S, Streifen mit Signal über dem Clustergrenzwert aber unterhalb der Seed Schwelle mit T gekennzeichnet, als getroffen erkannte Streifen, die einem Cluster zugewiesen werden sollen, sind grau hinterlegt). Im ersten Schritt werden Streifen über dem Seed Grenzwert als einzelne Cluster gewertet. Danach sucht der Algorithmus ausgehend von diesen in beide Richtungen weitere Streifen, die über der Cluster Schwelle liegen und fügt sie einem Cluster hinzu. Zuletzt (letzter Schritt) werden die Cluster so ausgedehnt, dass alle Streifen, die zumindest in einem einzelnen Subevent zum Cluster gehörten, dem Cluster zugeordnet werden.

## 3.2 Hephy Analysis Tool (Neue Module)

### 3.2.1 Hit Time Fitting

Da die Analog-Digital Wandler das Signal der Detektoren (nach der Formung durch den Shaper, siehe Kapitel 2.1) zu diskreten Zeitpunkten abtasten ist es nicht direkt möglich, aus den Zählwerten der Wandler direkt auf die genaue Form und die genauen Parameter des Signals zurück zu schließen. Aus diesem Grund wird das Signal der Detektoren durch eine Faltung einer Landau- und einer Gauß-Verteilung modelliert.

Die Parameter der Gauß-Verteilung werden durch den Triggerzeitpunkt (die Lage des *Maximum Probable Value - MPV*) sowie die Amplitude (das heißt, dem Wert der Funktion am Ort des *MPV*) festgelegt. Ein weiterer Parameter wäre die *Peaking Zeit*, d.h. die Anstiegsgeschwindigkeit des Signals. In den folgenden Messungen wurde dieser Wert als immer konstant angenommen, da es sich um einen Systemparameter des Shapers handelt.

Die Anpassung wurde mit Hilfe des *Migrad* Algorithmus, der im *Minut* Paket von ROOT implementiert ist, durchgeführt. Da es sich bei Migrad um einen Konjugierte-Gradienten Minimierungsalgorithmus handelt, ist vor Allem eine gute Wahl der Startwerte notwendig, die zum Beispiel durch eine Schätzung erfolgen kann.

Der Startwert für die *Peaking Time* wird aus den Kalibrationskurven extrahiert. Die Position und die Amplitude des *MPV* der Landau Funktion können durch den höchsten abgetasteten Wert der Analog-Digitalwandler angenähert werden. Über den Subevent-Index des Eintrags mit dem höchsten ADC Wert kann aufgrund der konstanten Abtastrate die *Peak Time* und mit Hilfe des Messwertes die *Amplitude* geschätzt werden.

### 3.2.2 Signal to Noise (SNR) Berechnung

Das *Signal to noise (SNR)* Modul berechnet das Signal-Rauschverhältnis für einzelne Streifen sowie konfigurierte Bereiche auf den Sensoren. Alle SNR Werte werden sowohl für Streifen gesamt als auch für die Clustergrößen von 1, 2 sowie 3 und mehr Streifen eingeteilt. Hierbei werden für jeden Bereiche die Clusterhöhen (d.h. die Höhen der Cluster in Einheiten des Analog Digitalwandlers vor dem *Hit Time Fitter*, um eine Aussage über das elektronische Verhalten des Sensors zu erhalten) sowie das Signal-zu-Rauschverhältnis der Cluster berechnet sowie in einem Plot (siehe Abbildung 14)

ausgegeben.

$$\text{NoiseZone} = \frac{\text{ClusterNoise}}{\text{ClusterWidth}} \quad (15)$$

$$\text{SNRZone} = \frac{\text{ClusterSignal}}{\text{NoiseZone}} \quad (16)$$

Die selben Daten werden pro Streifen erfasst, um das Verhalten einzelner Kanäle bzw. Streifen betrachten zu können (siehe z.B. Abbildung 15).

Um das SNR zu charakterisieren, wird zum Abschluss eine Faltung einer Landau und Gaußverteilung (*Langau* Funktion) über die gesammelten Daten angepasst, sofern mehr als 250 Events erfasst wurden. Die angepassten Parameter sind die Breite, der *Most Probable Value* (MPV) sowie die Fläche unterhalb der Landauverteilung sowie die Standardabweichung der Gaußverteilung.

$$\text{Langau}(x, \text{mpv}, \sigma_L, \sigma_G) = \int_{x-n*\sigma_G}^{x+n*\sigma_G} \text{Landau}(u, \text{mpv} + c_1 * \sigma_L, \sigma_L) * \text{Gauss}(u, x, \sigma_G) du \quad (17)$$

$$c_1 = 0.22278298 \quad (18)$$

Die Funktionen Landau und Gauß werden durch ROOT im TMath Namensraum zur Verfügung gestellt, die Integration erfolgt numerisch durch Bildung einer Untersumme in 200 Schritten.

Durch die Faltung mit einer Gaußverteilung wird das elektronische und thermische Rauschen des Messsystems berücksichtigt, da angenommen werden kann, dass es sich bei diesen Rauschquellen um weißes Rauschen, das heißt eine unkorrelierte Rauschquelle mit konstantem Leistungsdichtespektrum, handelt.

Während der Entwicklung wurden zum Vergleich mit den Ergebnissen anderer Experimente verschiedene Definitionen für das *Cluster Noise* verwendet:

- Die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes des Rauschens aller dem Cluster zugeordneten Streifen

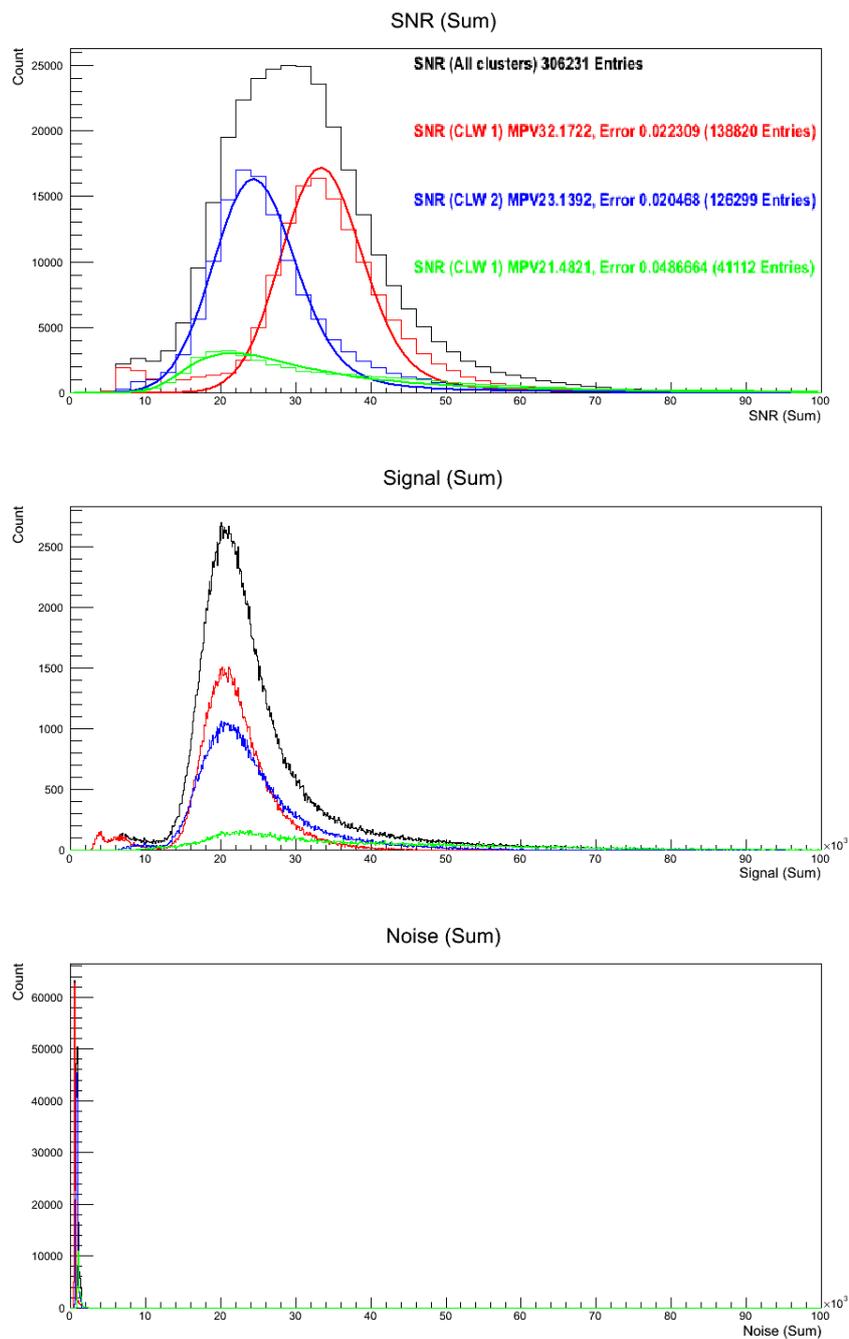


Abbildung 14: Signal-Rauschverhältnis (Oben), Signal (Mitte) und Rauschen (Unten) eines kompletten APVs (Run008, Sensor 07\_baby, APV1)

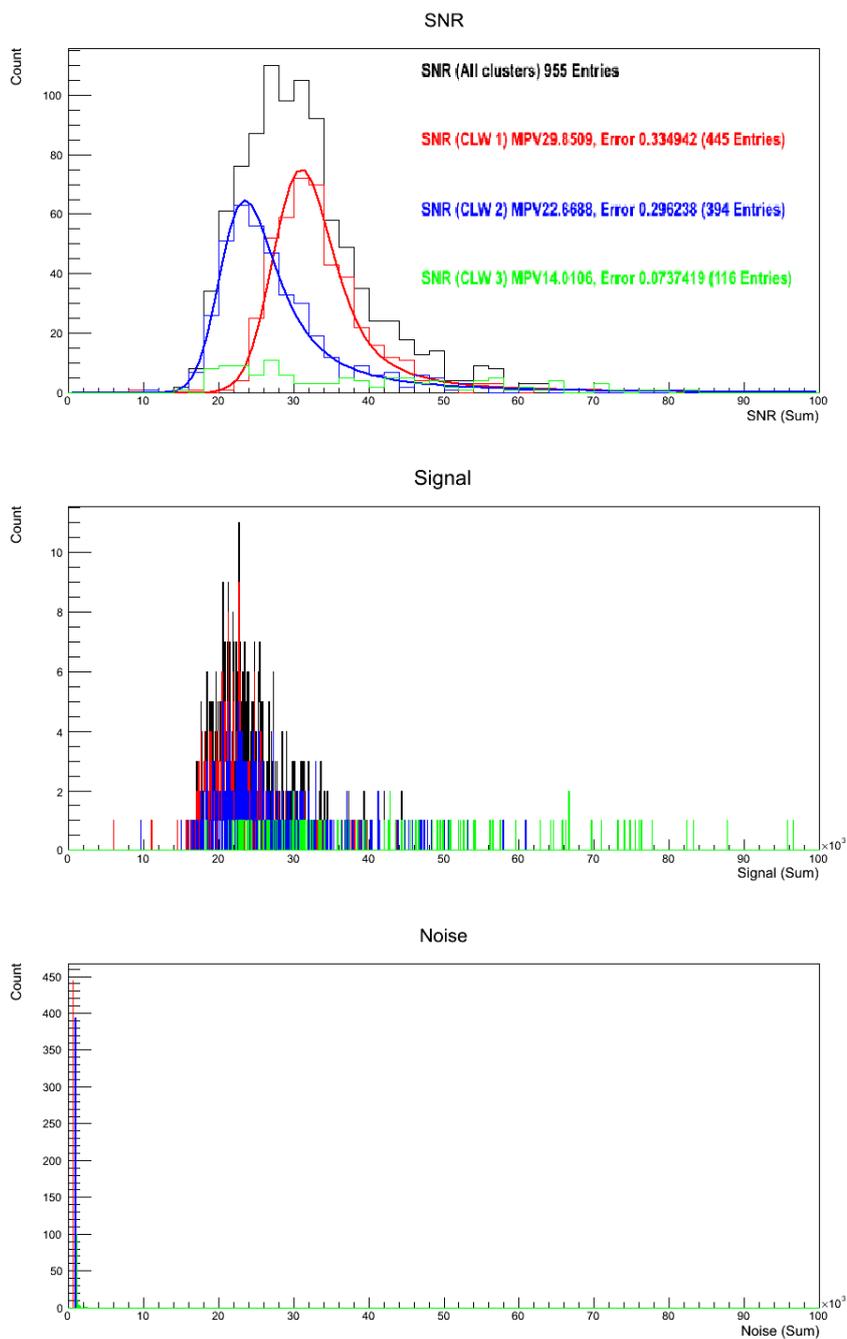


Abbildung 15: Signal-Rauschverhältnis (Oben), Signal (Mitte) und Rauschen (Unten) eines einzelnen Streifens (Run008, Sensor 07\_baby, APV1, Streifen 28)

- Die Berechnung des quadratischen Mittelwertes des Rauschens aller dem Cluster zugeordneten Streifen
- Die Verwendung des Rauschens des zentralen Streifens als Clusterrauschen

Für die weitere Betrachtung sowie zur Erstellung aller im Folgenden vorgenommenen Auswertungen wird immer der arithmetische Mittelwert des Rauschens gebildet.

### 3.2.3 Standard Plots

Zuletzt werden durch das Standard Plots Modul einige Plots der bereits berechneten Daten angelegt, wobei die Ausgabe pro eingestelltem Sensorbereich erfolgt. In der folgenden Arbeit erstrecken sich diese frei konfigurierbaren Bereiche entweder über die Streifen eines APV oder einen Teilstreifenbereich eines Sensormoduls.

Die Dateien `run008stdplotCalSplines*` enthalten die verwendeten Kalibrationskurven, anhand derer der Fit des zeitlichen Signalverlaufs erfolgt (d.h. die Kurven, die für die Rekonstruktion der eigentlichen Signalhöhe sowie des Trefferzeitpunktes verwendet werden).

In den Plots `run008stdplotClustersPerStrip*` werden die absoluten Zählraten von Clustern auf den jeweiligen Streifen abgebildet, wobei ein Streifen immer dem *Center Strip* zugewiesen wird (siehe z.B. Abbildung 16).

Auf den Plots `run008stdplotClusterWidth*` ist verzeichnet welche Clusterbreiten in den jeweiligen Zonen mit welcher Häufigkeit aufgetreten sind (siehe z.B. Abbildung 17).

Die Ladungsträgerverteilung zwischen den einzelnen Streifen kann der  $\eta$  Verteilung entnommen werden, die in den Plots in den `run008stdplotEtaDistribution*` Dateien dargestellt sind. Beispiele hierfür sind in Abbildung 18 dargestellt, wobei in Zone 3 ein Sensor mit *intermediate strips* dargestellt ist.

Bei einem Zwischenstreifen (*Intermediate Strip*) handelt es sich um einen Streifen, der zwischen den mit dem Auslesesystem verbundenen Streifen liegt, aber selbst nicht mit dem Auslesesystem verbunden ist. Das auf diesen Streifen entstehende Signal wird durch kapazitive Kopplung auf die benachbarten, mit dem Auslesesystem verbundenen Streifen übertragen. Hierdurch wird einerseits ein geringer Streifenabstand und damit eine hohe Positionsaufösung ermöglicht, andererseits werden sowohl die Anzahl der benötigten

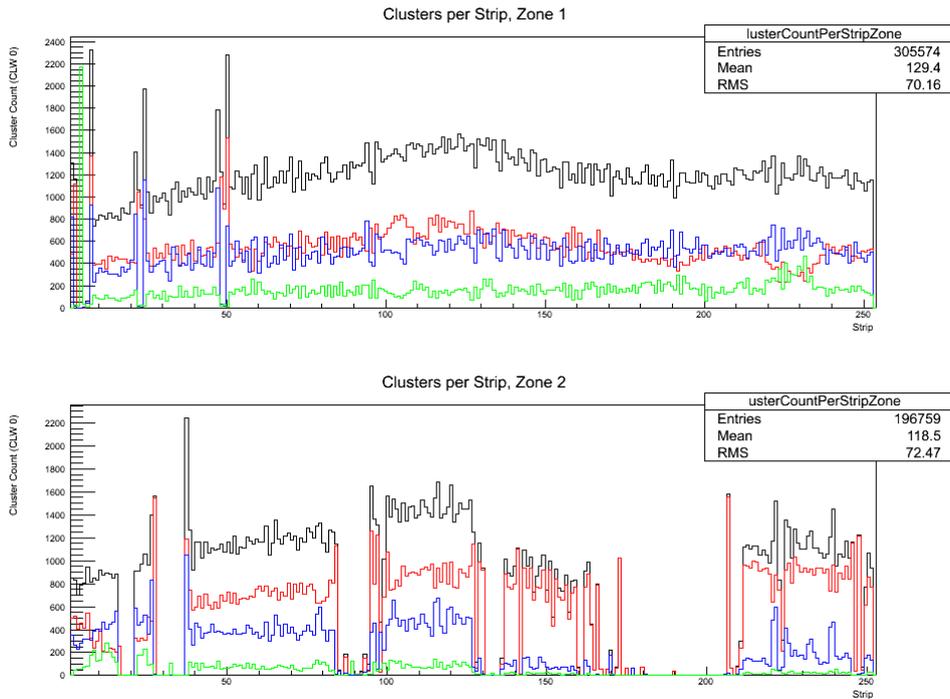


Abbildung 16: Cluster pro Streifen (Run008, Sensor 07\_baby)

Auslesekanäle und damit die Kosten sowie die benötigte Leistung und das Signal zu Rauschverhältnis niedriger gehalten[16].

Die Ausgabe des *Hit Time Fitters* (Amplitude, Trefferzeitpunkt - die *Peak Time* - sowie die Anstiegszeit des Shapers - die *Peaking Time*) wird in den `run008stdplotHitTimeFitter*` Plots dargestellt. Ein Beispiel aus einem der gemessenen Runs ist in Abbildung 19 dargestellt.

Um eventuelles Fehlverhalten bei der Ladungsträgerverteilung erkennen zu können, wurden des Weiteren die Verhältnisse der Clusterbreiten zueinander betrachtet, wobei hier die Clusterbreiten 2 und 1 betrachtet wurden. Diese Daten wurden in Plots in den Dateien `run008stdplotClusterSizeDifferencePerStrip*` visualisiert (siehe zum Beispiel Abbildung 20).

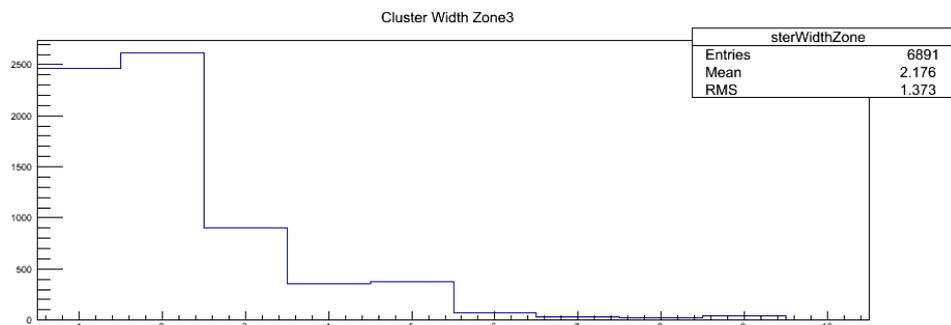


Abbildung 17: Clusterbreiten pro Zone (Run008, Sensor 07\_baby)

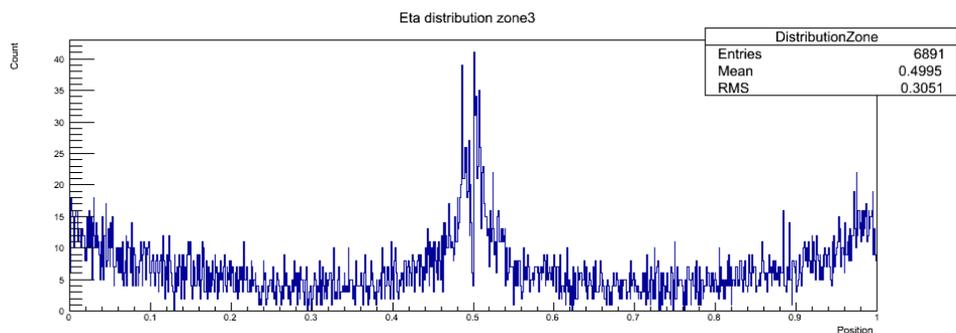
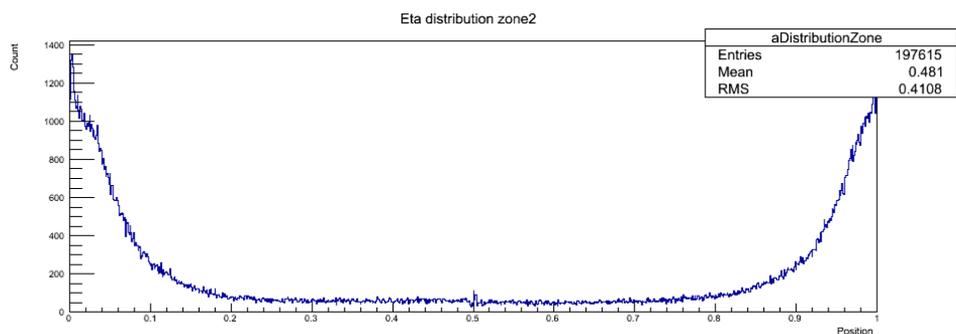


Abbildung 18: Ladungsträgerverteilung Run 008, Sensor 07\_baby (oben) sowie nicht weiter betrachteter Strixel Sensor mit Zwischenstreifen (unten)

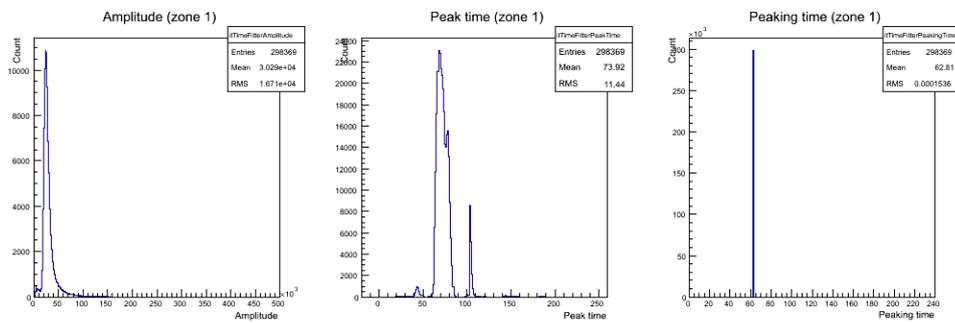


Abbildung 19: Hit Time Fitter Ausgabe Run 008, Sensor 07\_baby, APV 1

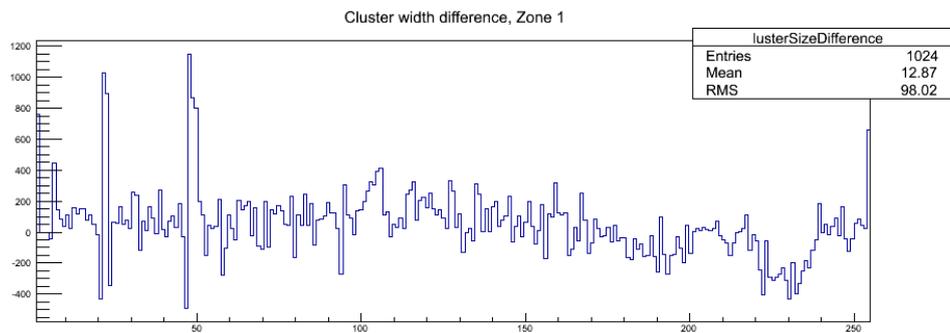


Abbildung 20: Differenzen der Clustergrößen in Abhängigkeit des Streifenindex (die zu erkennenden Streifen mit außergewöhnlich hoher beziehungsweise niedriger Differenz wurden durch wegen des hohen Rauschens nicht berücksichtigte Streifen hervorgerufen)

## 4 Versuchsaufbau und Durchführung

### 4.1 Messsystem und Strahlquelle

Um die Detektoren zu testen, wurde ein Stack aus zwei verschiedenen Detektortypen eingesetzt, wobei im Folgenden nur ein Typ (horizontale bzw. vertikale Streifen auf einer Seite, durchgehende Metallisierung auf der anderen Seite sowie parallele Streifen) betrachtet werden soll.

Der Sensorstack wurde in 6 APV-Zonen eingeteilt, wobei die Zonennummern den jeweiligen Auslesechips (APV) entsprechen. Bei den APV-Zonen 1 und 2 sowie 5 und 6 handelt es sich um die beiden betrachteten Module, wobei die Streifen bei allen Runs (008, 009 und 037) jeweils vertikal ausgerichtet wurden. Die APVs 1 und 2 gehören zu Sensormodul 1 (07\_baby, auf APV 1 werden die unteren/linken Streifen des Moduls angesprochen, auf APV 2 die oberen/rechten Streifen), APV 5 und 6 zu Sensormodul 2 (12\_baby, auf APV 5 werden die unteren/linken Streifen des Moduls angesprochen, auf APV 6 die oberen/rechten Streifen). Die Daten in APVs 3 und 4 werden im weiteren nicht mehr betrachtet, da es sich um Module anderen Bautyps (Strixel 1 und 2) handelt und die Module ebenfalls nicht komplett ausgelesen wurden (nur 2 statt aller 4 APVs).

Die Kalibrationsdaten wurden mit Hilfe eines Software Triggers zu zufälligen Zeiten aufgezeichnet.

Die Runs 008 und 009 wurden mit neuen Detektoren durchgeführt, Run 037 wurde nach einer Bestrahlung der Sensoren (siehe Kapitel 4.2) durchgeführt.

Die Biasspannung der Sensoren wurde bei den Runs 008 und 009 auf 300V gesetzt, der Dunkelstrom lag bei  $4\mu\text{A}$ . Bei Run 037 lag die Biasspannung ebenfalls bei 300V, der Dunkelstrom aufgrund der durch die Bestrahlung entstandenen Defekte (siehe Kapitel 1.3.4) bei  $162\mu\text{A}$ .

In den Runs wurden 339075 (Run 008), 150000 (Run 009) sowie 301382 (Run 037) Ereignisse erfasst.

Die Strahltests wurden am Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) am H6 Strahl des Super Proton Synchrotrons (SPS, siehe Abbildung 21) durchgeführt. Protonen werden mit Energien von bis zu  $450\frac{\text{GeV}}{c}$  auf ein primäres Target (T4) gelenkt. Hierbei werden im Schnitt  $10^{12}$  Protonen pro Extraktionszyklus verwendet. Nach dem

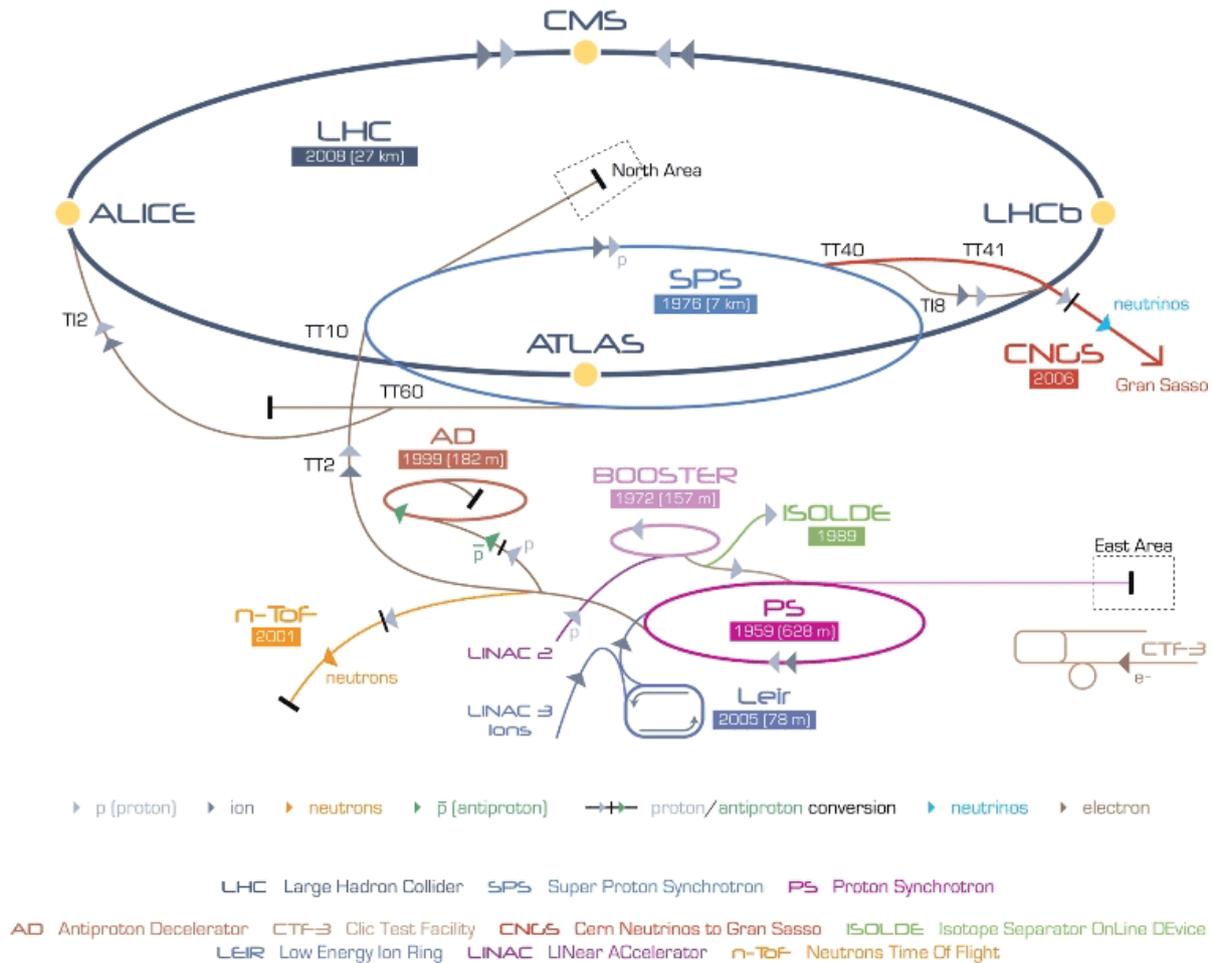


Abbildung 21: Der CERN Beschleunigerkomplex[18]

T4 Target werden 3 weitere experimentelle Beamlines abgeleitet (P4, H8 und H6), wobei es sich bei P4 für das NA60 Experiment um den primären Strahl handelt (siehe Abbildung 22. Der H8 Strahl kann Energien zwischen  $-10$  bis  $-400 \frac{\text{GeV}}{c}$  bzw. positive Momente bis  $180 \frac{\text{GeV}}{c}$  liefern. Der hier verwendete H6 Strahl verwendet die selbe Polarität wie H8, wobei die Energie typischerweise bei ca. 50% des H8 Strahls liegt[17].

Experimente können in zwei Zonen (H6A und H6B) durchgeführt werden, wobei die hier vorgestellten Messungen in H6A vorgenommen wurden. Der für die Messungen genutzte Strahl wurde mit einer Energie von  $+120 \frac{\text{GeV}}{c}$  in H6 eingestrahlt. Der Fokuspunkt des Strahls lag in H6B, sodass in H6A von einem parallelen Strahl ausgegangen werden kann. Eine mit Hilfe einer *Delay Wire Chamber* durchgeführte Messung des horizontalen und vertikalen Strahlprofils wird in Abbildung 24 dargestellt.

Die Triggerung erfolgte während der Messung durch ein Szintillatorsystem, sodass die

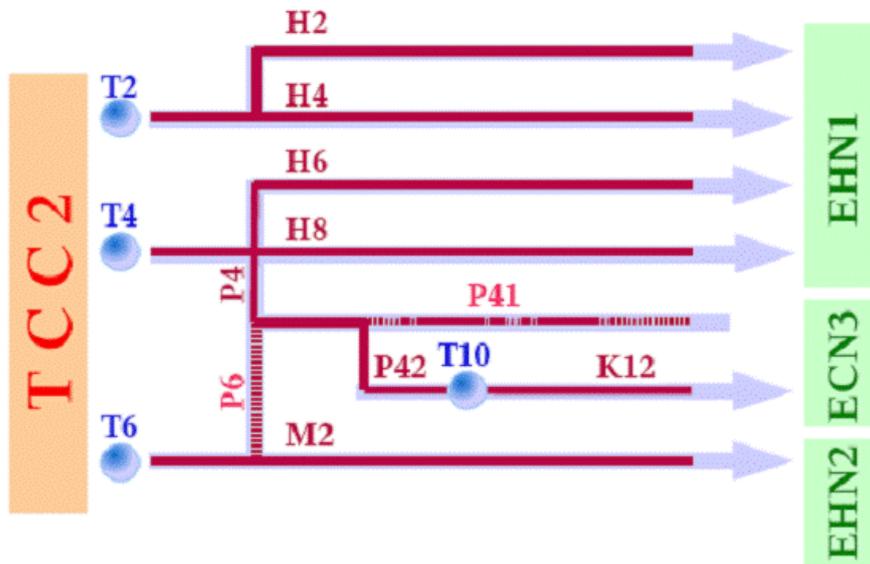


Abbildung 22: Schema der Targets und Beamlines in der SPS North Area[19]

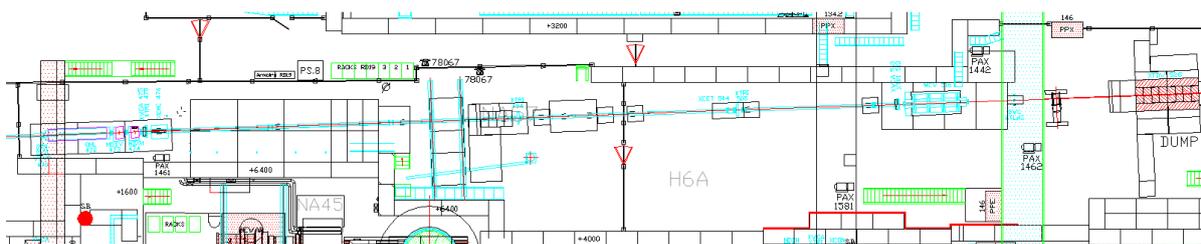


Abbildung 23: Layout der H6A Zone am SPS[17]

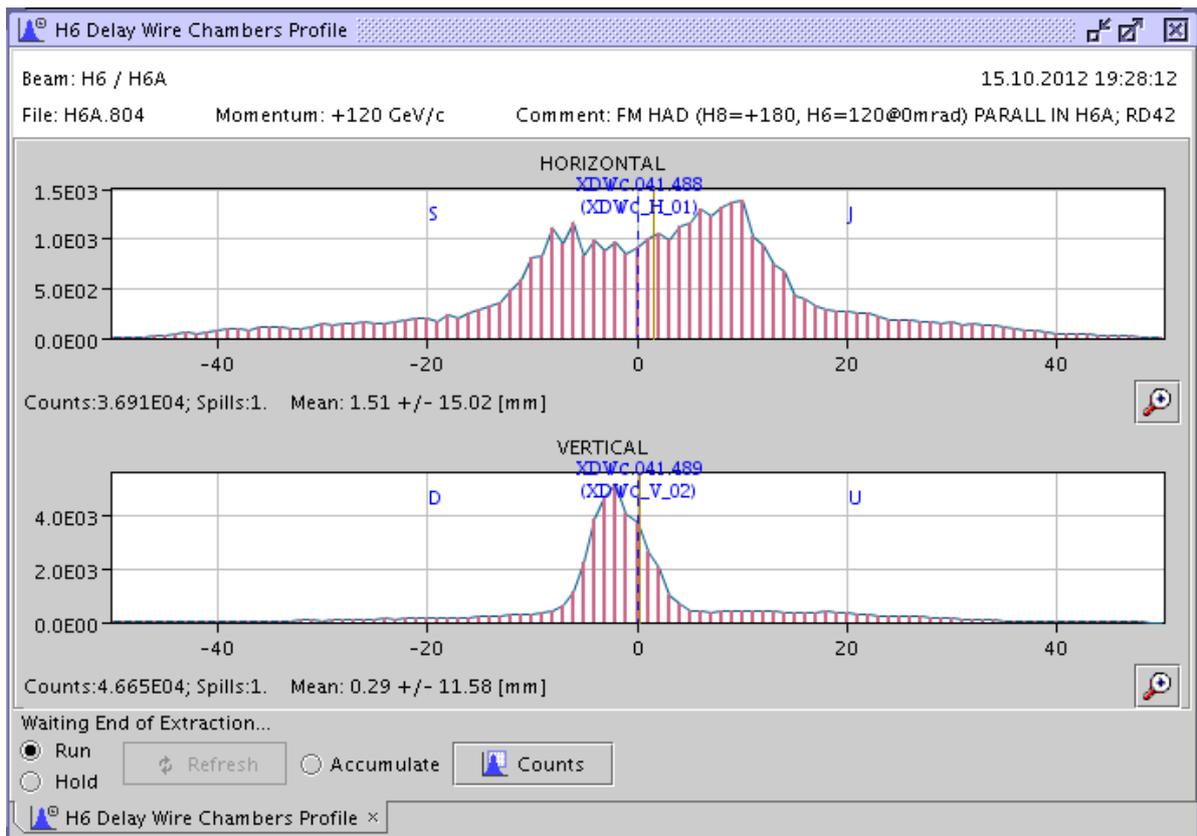


Abbildung 24: Strahlprofil in H6 ( $120\frac{\text{GeV}}{c}$ , Messung mit Hilfe einer *Delay Wire Chamber*)

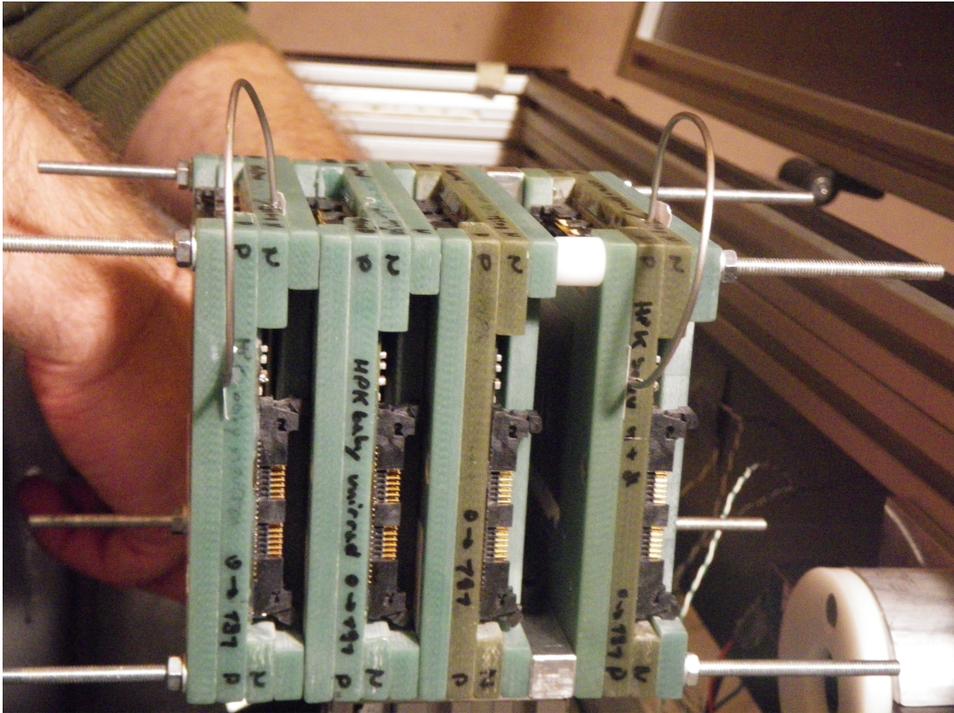


Abbildung 25: Sensorstack aus 4 Modulen

zum Zeitpunkt des Auftreffens in die APV25 Auslesepipeline kopierten analogen Messsignale ausgemessen wurden. Aufgrund des hohen Rauschens beim Einsatz eines einzelnen Photomultipliers (PMT), wurden in Kombination mit dem Szintillator zwei in Koinzidenz geschaltete Photomultiplier verwendet. Hierdurch erfolgt die Triggerung nur, wenn beide PMTs zur selben Zeit ein Triggersignal liefern.

Während des Experiments befanden sich die Detektoren in Form eines Detektorstacks hintereinander im Strahl (siehe Abbildung 25), wobei die dadurch verursachte Strahlabschwächung im Folgenden vernachlässigt werden kann. Die Detektoren konnten mit Hilfe eines Koordinatentisches, der sich innerhalb einer lichtdichten Box befand, in der Kalibrierungsphase verschoben werden (siehe Abbildung 26), um die Detektoren im Strahl positionieren zu können.

## 4.2 Bestrahlung

Die Bestrahlung der Module erfolgte mit Hilfe einer  $^{60}\text{Co}$  Gammaquelle am SCK-CEN<sup>4</sup>. Hierbei wurde die RITA (*Radio Isotope Test Arrangement*) Bestrahlungseinrichtung ge-

---

<sup>4</sup><https://www.sckcen.be/>



Abbildung 26: Koordinatentisch und lichtdichte Box

nutzt. RITA befindet sich unter Wasser im Abkling- und Lagerbecken des BR2 Reaktors, der Container hat einen Durchmesser von 380mm und eine Höhe von 600mm (siehe Abbildung 27). In diesem herrscht eine Dosisrate von  $0.6 \frac{\text{kGy}}{\text{h}}$ , wobei über einen Zeitraum einer Woche eine totale Dosisleistung von etwa 100kGy deponiert wurde.

Um den Betriebszustand zu simulieren und entstehende Ladungen im Substrat sowie an den Streifen des Detektors abführen zu können, wurden die Sensoren im verarmten Zustand (mit angelegter Bias-Spannung) betrieben.

Bei der Bestrahlung ist primär nicht mit relevanten Substratschäden zu rechnen sondern mit der Bildung von positiven Ladungen in der Oxidschicht (siehe Kapitel 1.3.4).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Detektoren vor der Bestrahlung

Im Folgenden werden nur die APV Kanäle des APV 1 und APV 6 betrachtet, da die durch die APV 2 und APV 5 abgedeckten Bereiche der Sensormodule nicht direkt im



Abbildung 27: Detektoren mit angeschlossener Bias-Spannungsversorgung in RITA (*Radio Isotope Test Arrangement*)

Strahl gelegen sind. Aus den Plots der Clusterzentren pro Streifenindex kann das horizontale Strahlprofil (siehe Abbildung 24) wie erwartet erkannt werden. Die Messungen sind in den Abbildungen 28 und 29 dargestellt.

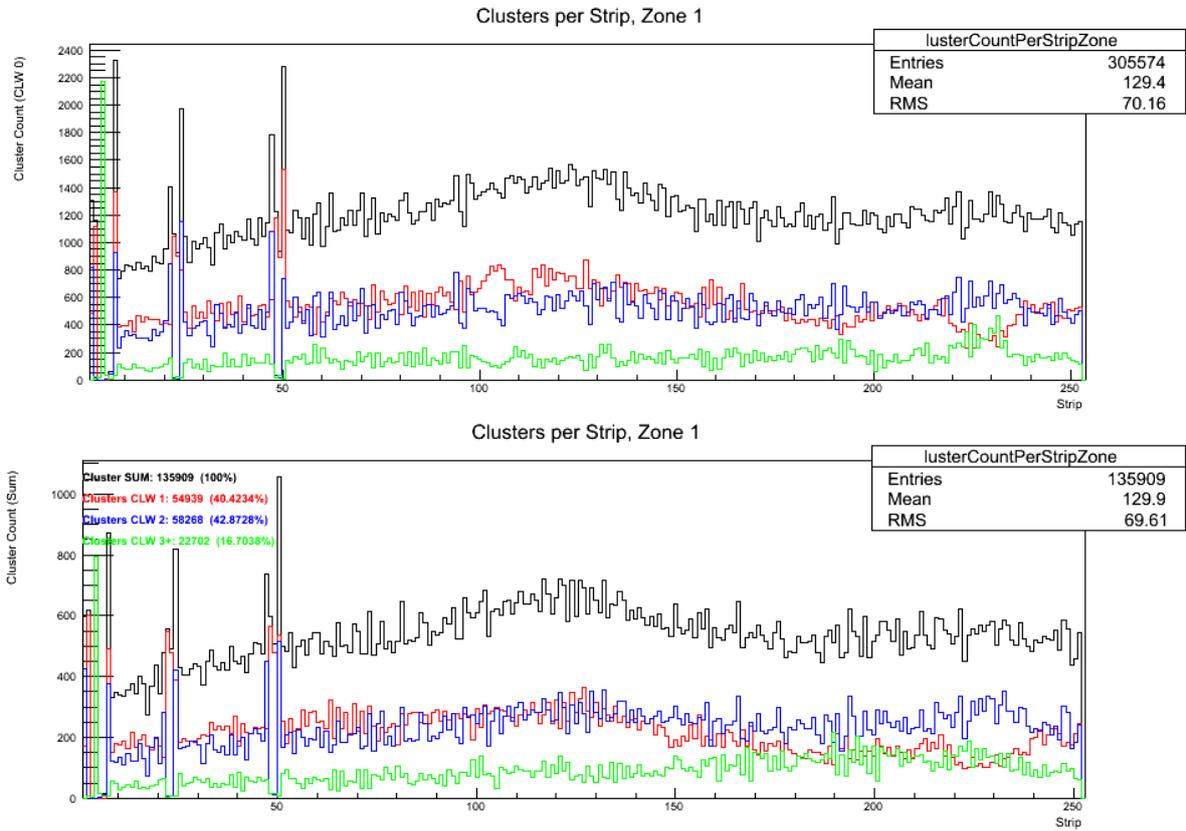


Abbildung 28: Clusterzentren pro Streifen, Runs 008 und 009 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby

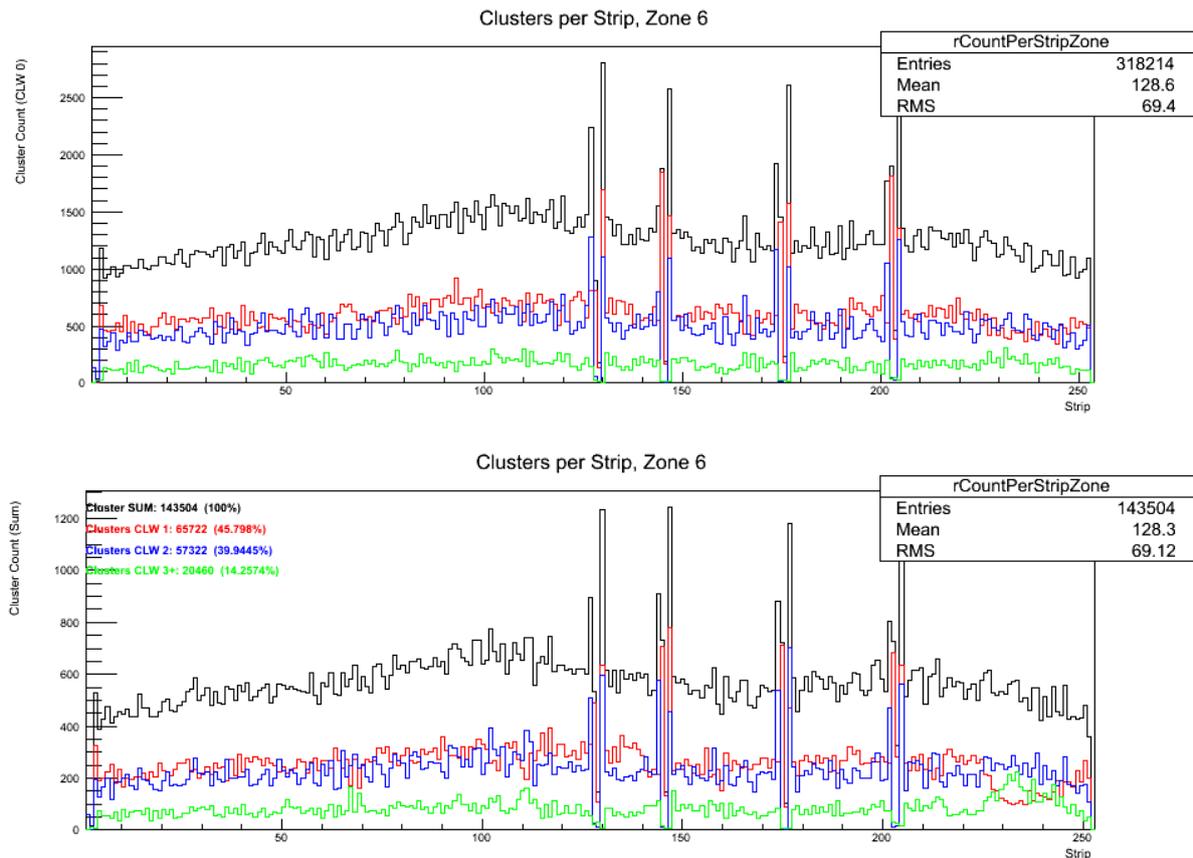


Abbildung 29: Clusterzentren pro Streifen, Runs 008 und 009 (unbestrahlt), Sensor 12\_baby

Die stark erkennbare hohe Anzahl der Ereignisse auf einzelnen Streifen, die über jede Messreihe vorhanden ist, weist auf einen systematischen Fehler hin, wobei die Kanäle im folgenden nicht manuell als fehlerhaft markiert (und damit einfach ausgeblendet) und deshalb in die Messungen mit einbezogen wurden. Diese Kanäle weisen unüblich hohes Rauschen auf, wodurch ausgeschlossen ist, dass sie als Seed-Streifen für die Clustererkennung erkannt werden.

Die Breiten der hierbei auftretenden Cluster bewegen sich zum Großteil im Bereich von 1 bis 3 Streifen (siehe Abbildung 33 sowie Abbildung 34).

Im Streifenbereich von Streifen 220 bis 250 zeigt sich eine starke Änderung der Clusterbreitenverteilung. Aus diesem Grund wurde der erste Sensor in weitere 3 Bereiche eingeteilt, die jeweils die Streifen von Streifennummer 1-119, 220-250 sowie 251-256 enthalten (siehe Abbildung 35). Da der Dritte Bereich (Streifen 251-256) sehr schmal ist

und deshalb sehr niedrige Statistik aufweist, wurden die Messergebnisse nicht mehr in die Interpretation der Ergebnisse mit einbezogen.

In Run 008 zeigte sich, wie aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich, eine starke Änderung der Clusterbreitenverteilung:

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	42.15%	41.87%	15.98%
220-250	28.21%	50.92%	20.87%
251-256	51.11%	44.11%	4.79%

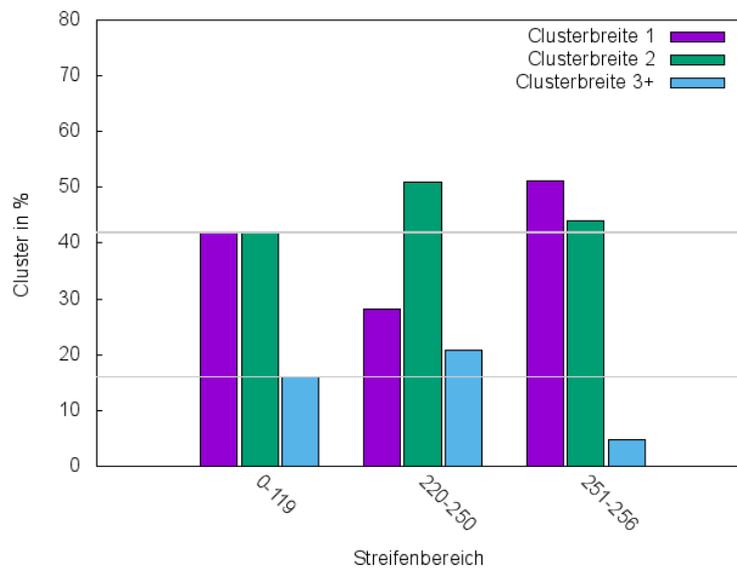


Tabelle 1: Clusterbreitenverteilung Run008 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	47.28%	39.59%	13.14%
220-250	32.16%	44.03%	23.81%
251-256	60.85%	35.27%	3.88%

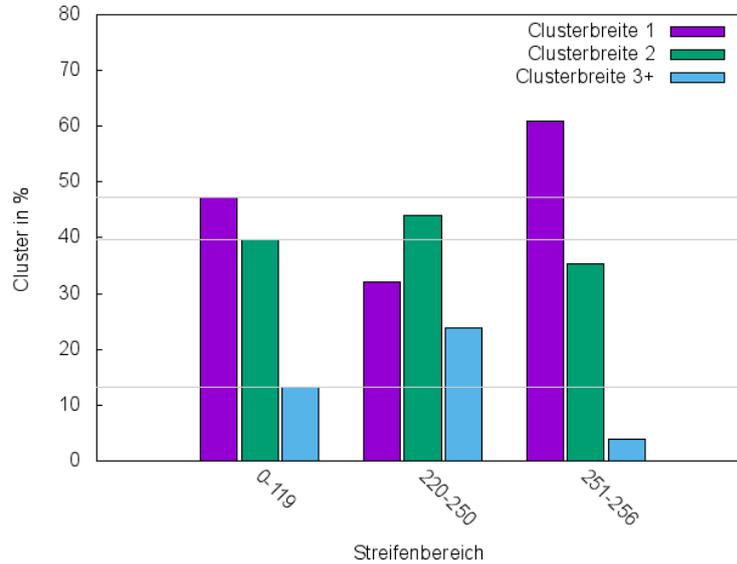


Tabelle 2: Clusterbreitenverteilung Run008 (unbestrahlt), Sensor 12\_baby

In Run 009 zeigt sich, wie in den Tabellen 3 und 4 erkennbar, ebenfalls eine ähnlich signifikante Änderung der Clusterbreiten:

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	42.15%	41.87%	14.98%
220-250	28.21%	50.92%	20.87%
251-256	51.11%	44.11%	4.79%

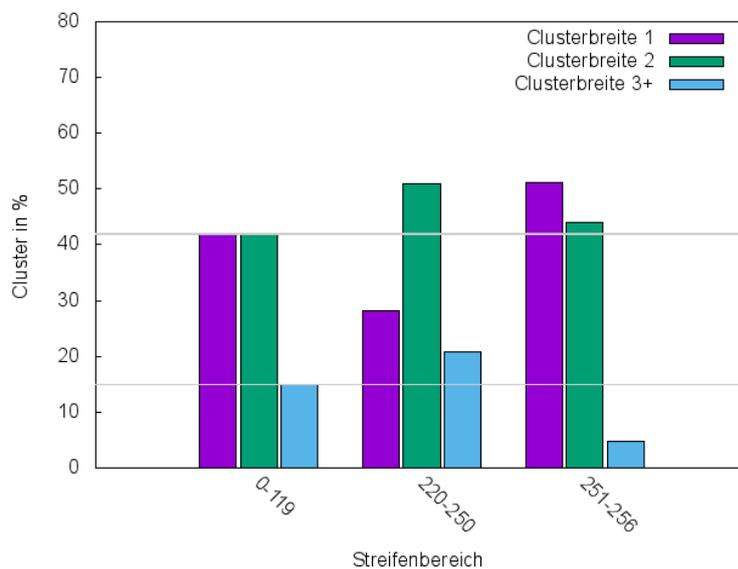


Tabelle 3: Clusterbreitenverteilung Run009 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	47.28%	39.59%	13.14%
220-250	32.16%	44.03%	23.81%
251-256	60.85%	35.27%	3.88%

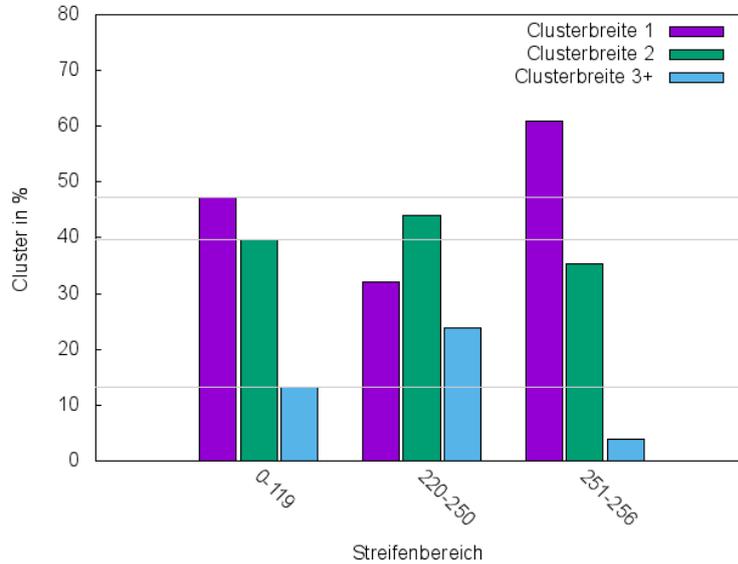


Tabelle 4: Clusterbreitenverteilung Run009 (unbestrahlt), Sensor 12\_baby

Die Abweichung des Bereichs 251-256 bei Clustern mit Breiten von 3 oder mehr Streifen kann auf die geringe Breite des dritten Bereichs sowie niedrigere Statistik aufgrund daraus folgender niedrigerer Clusteranzahl zurückgeführt werden. Die Abweichung im Bereich der Streifen 220-250 deutet aufgrund der signifikant geringeren Anzahl an Ereignissen mit Clusterbreite 1 im Vergleich zu Ereignissen mit Clusterbreite 2 auf einen Effekt wie einen möglichen elektrischen Kurzschluss oder einen Kopplungseffekt (siehe Kapitel 1.3.4) zwischen den Streifen innerhalb des Streifenbereichs hin.

Um die Leistungsfähigkeit der Detektoren sowie diesen Effekt näher zu betrachten, wurde das Signal-Rauschverhältnis in den verschiedenen Bereichen untersucht. Hierbei fanden sich (siehe Abbildungen 36 bis 41) folgende Werte in Tabellen 5 bis 7:

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	$31.68 \pm 0.08$	$22.92 \pm 0.10$	$21.22 \pm 0.21$
220-250	$32.00 \pm 0.28$	$21.06 \pm 0.24$	$19.23 \pm 0.39$
251-256	$31.53 \pm 0.18$	$21.13 \pm 0.24$	$20.45 \pm 0.47$

Tabelle 5: Signal-Rauschverhältnis Run008 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	$32.53 \pm 0.04$	$22.82 \pm 0.32$	$20.47 \pm 0.07$
220-250	$30.98 \pm 0.12$	$20.16 \pm 0.09$	$18.75 \pm 0.13$
251-256	$33.53 \pm 0.30$	$25.48 \pm 0.34$	$18.75 \pm 0.13$

Tabelle 6: Signal-Rauschverhältnis Run009 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	$34.32 \pm 0.04$	$26.13 \pm 0.03$	$26.69 \pm 0.12$
220-250	$32.73 \pm 0.12$	$21.04 \pm 0.11$	$20.30 \pm 0.13$
251-256	$32.54 \pm 0.25$	$23.82 \pm 0.34$	$20.30 \pm 0.13$

Tabelle 7: Signal-Rauschverhältnis Run009 (unbestrahlt), Sensor 12\_baby

Eine Betrachtung des Signal-Rauschverhältnisses des Sensors 12\_baby war in Run 008 leider nicht möglich, da nicht genügend Ereignisse vorhanden waren, um eine verlässliche Anpassung der verwendeten Langau Funktion bei der Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses durchzuführen (siehe Kapitel 3.2.2).

Die Verteilung der Clusterbreiten war in beiden Messdurchgängen ident. Im Streifenbereich der Streifen 220-250 zeigte sich eine Abnahme der Ereignisse mit Streifenbreite 1 um 33% (Modul 07\_baby) bzw. 32% (Modul 12\_baby) sowie eine Zunahme der Ereignisse mit Streifenbreite 2 um 22% bzw. 11%. Ereignisse mit einer Breite von 3 oder mehr Streifen nahmen um 31% bzw. 81% zu.

## 5.2 Detektoren nach der Bestrahlung

Nach den ersten Messungen erfolgte eine Bestrahlung der Detektoren mit Gammastrahlung an einer  $^{60}\text{Co}$  Quelle (siehe Kapitel 4.2).

Darauf hin erfolgte ein weiterer Messdurchgang (Run 036), wobei 301.382 Ereignisse erfasst wurden. Die erfassten Clusterbreiten wurden in Abbildung 42 dargestellt, wobei der schräge Verlauf der Gesamtclusteranzahl nicht auf die Bestrahlung sondern darauf zurückzuführen ist, dass der Sensor fehlerhafter Weise nicht mittig im Strahl positioniert wurde.

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	58.76%	30.86%	9.39%
220-250	57.78%	31.41%	10.72%
251-256	66.48%	28.41%	5.10%

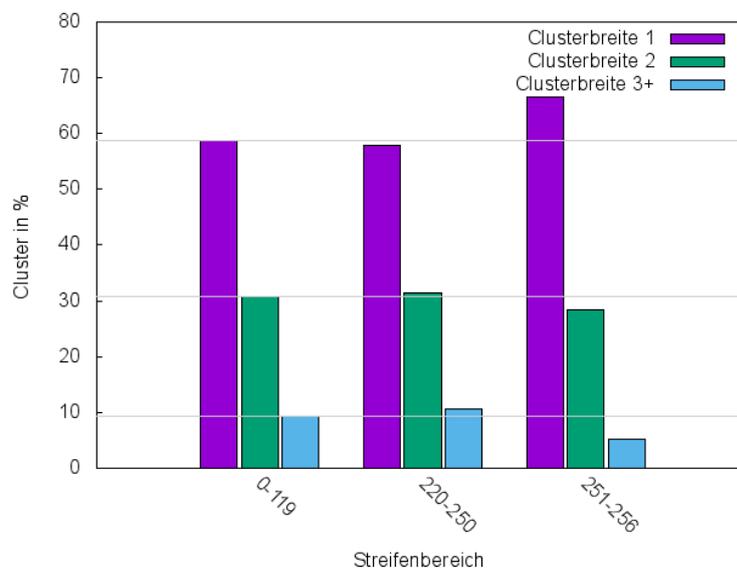


Tabelle 8: Clusterbreitenverteilung Run039 (bestrahlt), Sensor 07\_baby

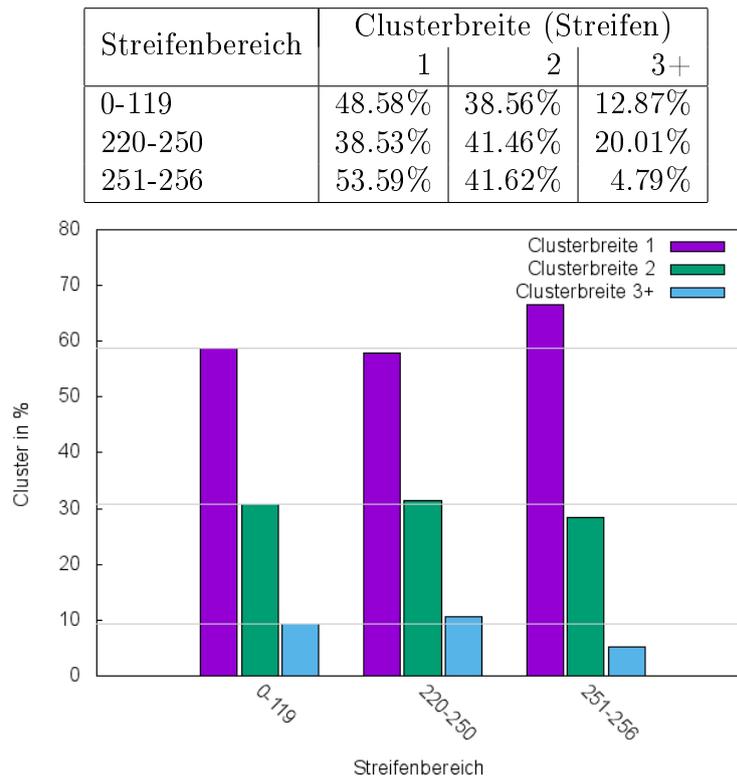


Tabelle 9: Clusterbreitenverteilung Run039 (bestrahlt), Sensor 12\_baby

Im Gegensatz zu einer  $\geq 30\%$  Abnahme der Ereignisse mit Clusterbreite 1 bei den unbestrahlten Messungen zwischen dem Streifenbereich 0-119 und 220-250 zeigt sich, wie aus den Daten in Tabellen 8 und 9 ersichtlich ist, nach der Bestrahlung nur eine Änderung um 2% auf dem Sensor 07\_baby sowie 21% auf dem Sensor 12\_baby (verglichen mit den Änderungen um 33% bzw. 32% bei unbestrahlten Sensoren), wobei pro Streifen weniger als 1000 Cluster gemessen werden konnten, weshalb keine Einzelbetrachtung des Signal-Rauschabstandes der einzelnen Streifen vorgenommen werden konnte.

Auf dem Sensor 07\_baby zeigte sich zwischen dem ersten und zweiten Streifenbereich eine Zunahme der Events mit Streifenbreite 2 von 2%, der Events mit Streifenbreite 3 oder mehr um 14%. Auf dem Modul 12\_baby zeigte sich eine Zunahme der Events mit Streifenbreite 2 von 8%, breitere Events mit Streifenbreite 3 oder mehr um 55%.

Eine Betrachtung des Signal-Rauschabstandes (Tabellen 10 und 11, Abbildungen 43 bis 46) zeigte keine signifikante Änderung ( $\leq 5\%$ ) des Signal-Rauschverhältnisses für Clusterbreiten von 1 und 2 Streifen, jedoch eine deutliche Abnahme des SNR für Clusterbreiten von 3 oder mehr Streifen um 13% im Bereich der Streifen 220-250.

In Abbildungen 30 sowie 31 wird die Veränderung der Clusterbreiten durch die Bestrahlung der Sensoren nochmals dargestellt. Um den Effekt der Bestrahlung auf die Clusterbreiten besser betrachten zu können, wurde desweiteren das Verhältnis der Ereignisse mit einer Clusterbreite von einem einzelnen Streifen zu Ereignissen mit einer Clusterbreite von zwei oder mehr Streifen Breite betrachtet (siehe Abbildung 32).

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	$32.17 \pm 0.02$	$24.60 \pm 0.03$	$26.88 \pm 0.09$
220-250	$31.92 \pm 0.09$	$23.34 \pm 0.01$	$26.73 \pm 0.38$
251-256	$31.19 \pm 0.25$	$23.34 \pm 0.11$	$26.73 \pm 0.38$

Tabelle 10: Signal-Rauschverhältnis Run037 (bestrahlt), Sensor 07\_baby

Streifenbereich	Clusterbreite (Streifen)		
	1	2	3+
0-119	$34.10 \pm 0.02$	$25.78 \pm 0.03$	$28.30 \pm 0.14$
220-250	$33.99 \pm 0.10$	$24.68 \pm 0.10$	$24.76 \pm 0.14$
251-256	$34.33 \pm 0.29$	$25.19 \pm 0.25$	$24.76 \pm 0.14$

Tabelle 11: Signal-Rauschverhältnis Run037 (bestrahlt), Sensor 12\_baby

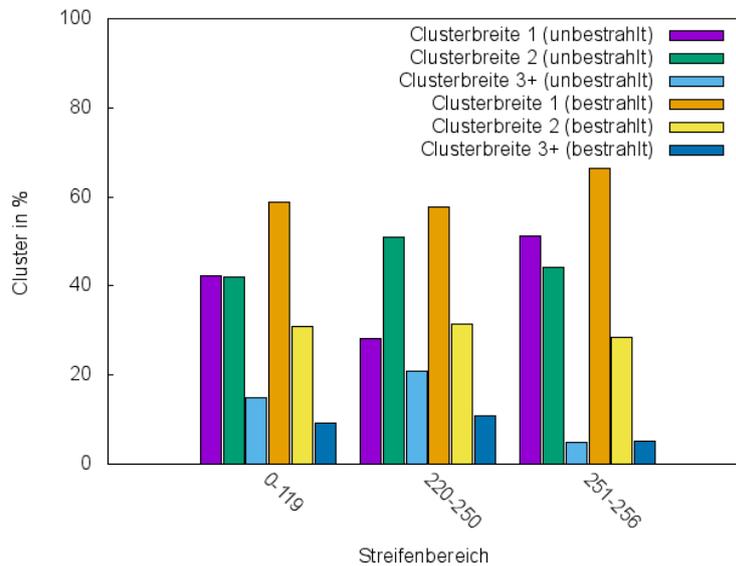


Abbildung 30: Vergleich der Clusterbreiten zwischen bestrahltem und unbestrahltem Sensor (Sensor 07\_baby)

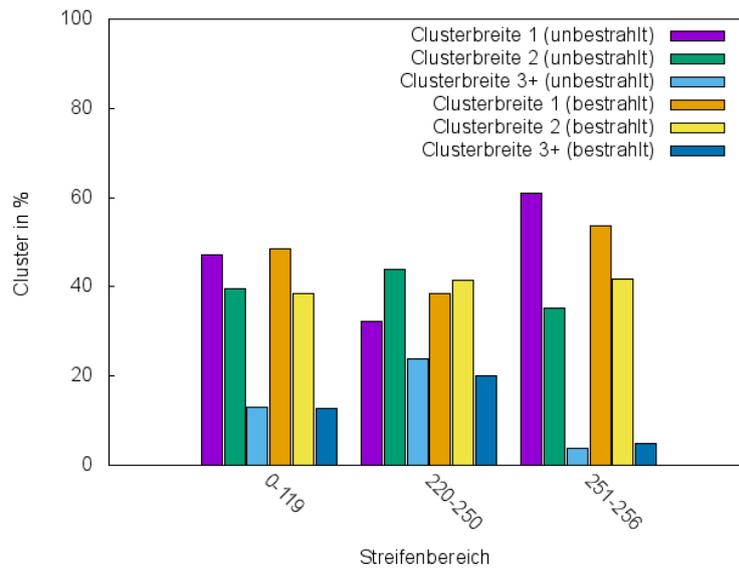


Abbildung 31: Vergleich der Clusterbreiten zwischen bestrahltem und unbestrahltem Sensor (Sensor 12\_baby)

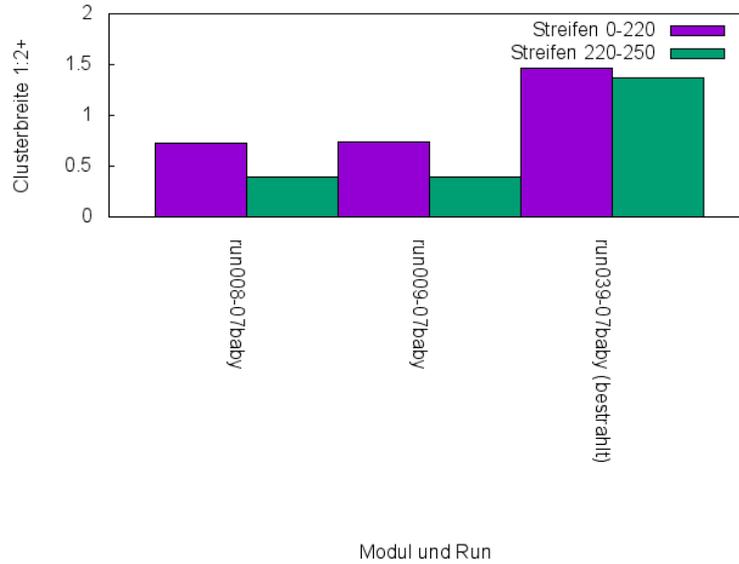


Abbildung 32: Verhältnisse der Ereignisse mit Clusterbreite 1 zu Ereignissen mit Clusterbreite 2 oder mehr (Sensor 07\_baby)

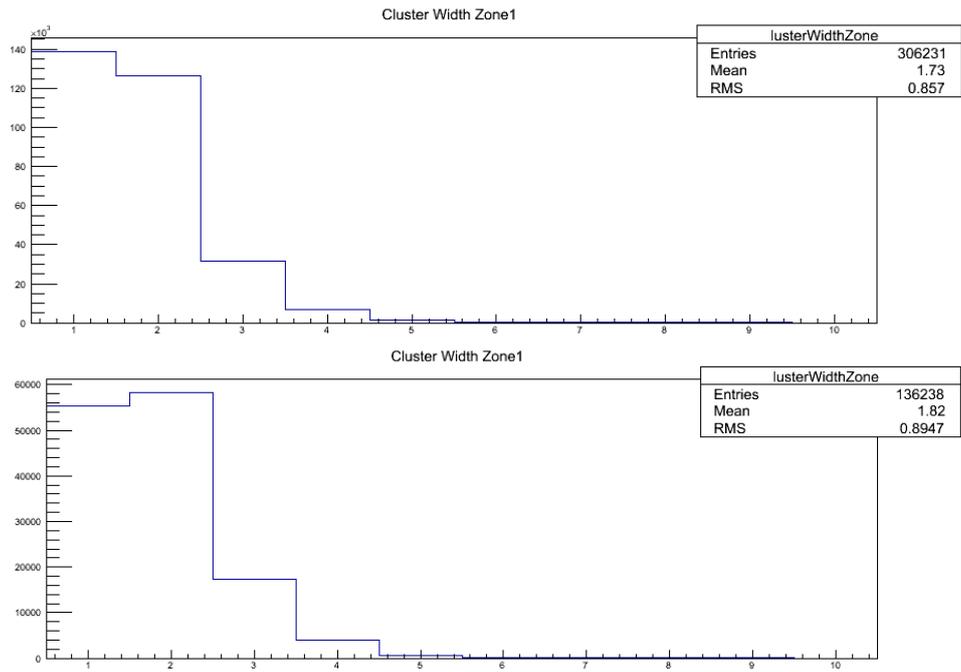


Abbildung 33: Clusterbreiten auf Sensor 07\_baby, Run 008 und 009 (unbestrahlt)

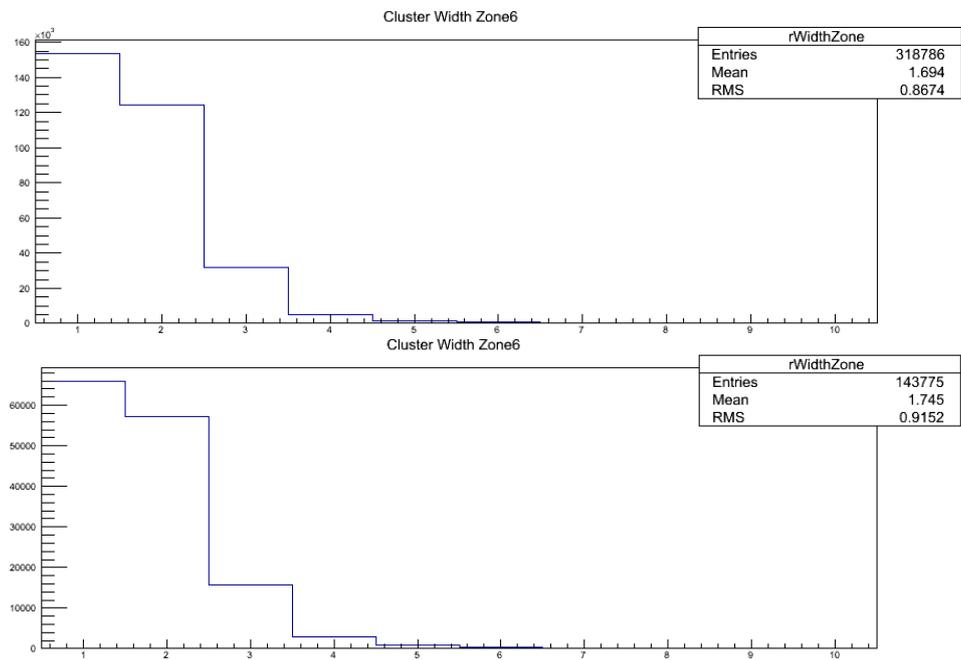


Abbildung 34: Clusterbreiten auf Sensor 12\_baby, Run 008 und 009 (unbestrahlt)

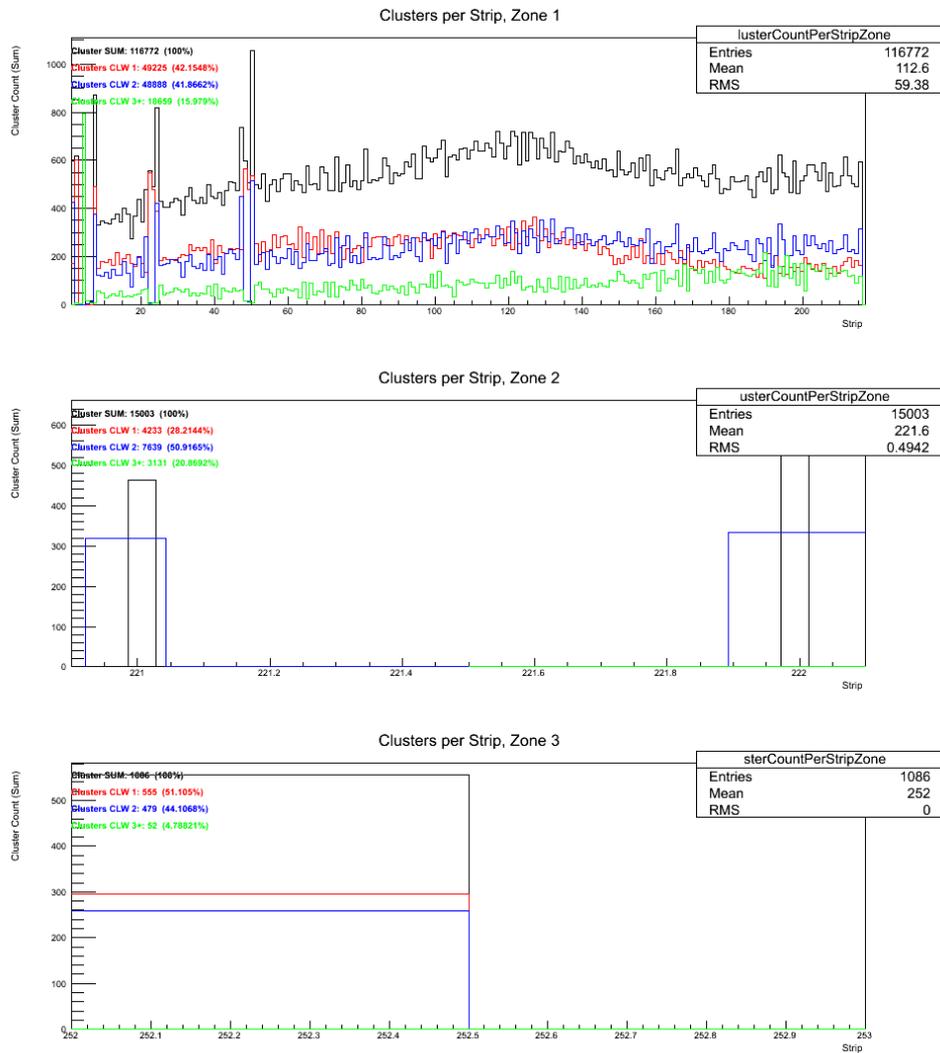


Abbildung 35: Clusterbreiten Sensor 07\_baby, Run 008 (unbesraht), Streifenbereiche 0-119, 220-250, 251-256

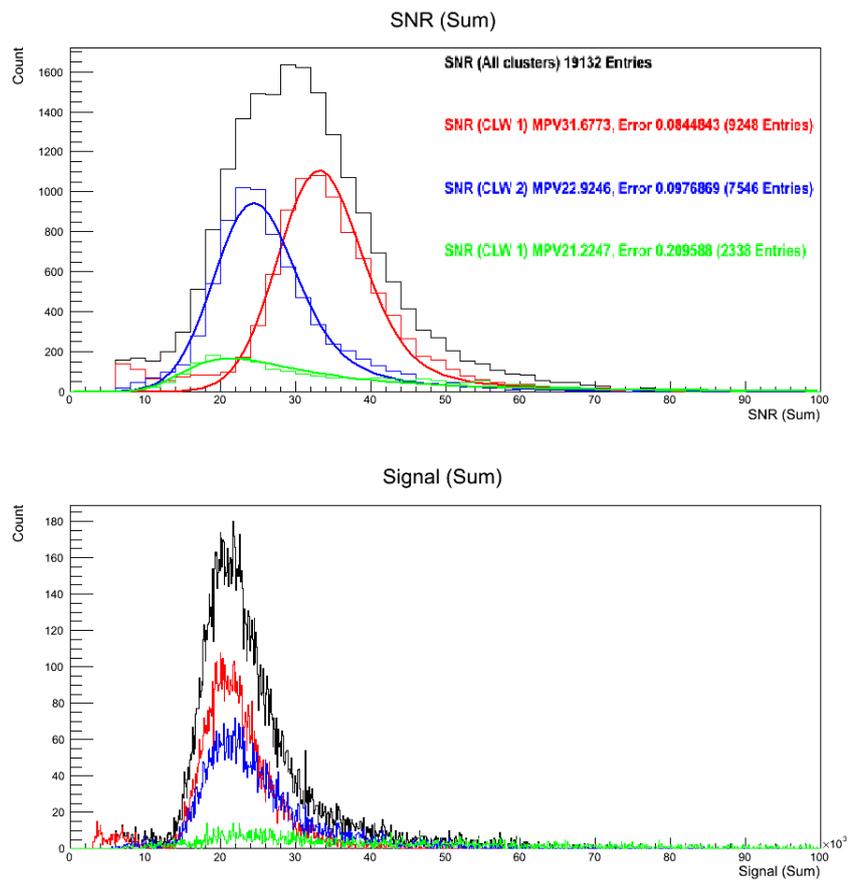


Abbildung 36: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 008 (unbestraht), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 0-119

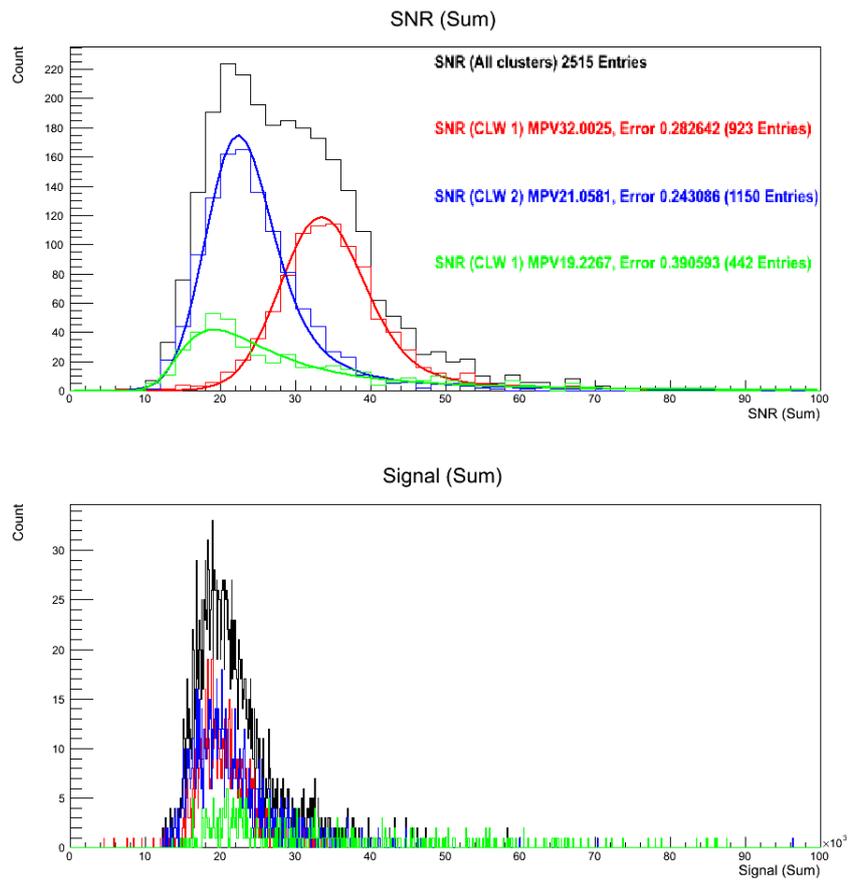


Abbildung 37: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 008 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 220-250

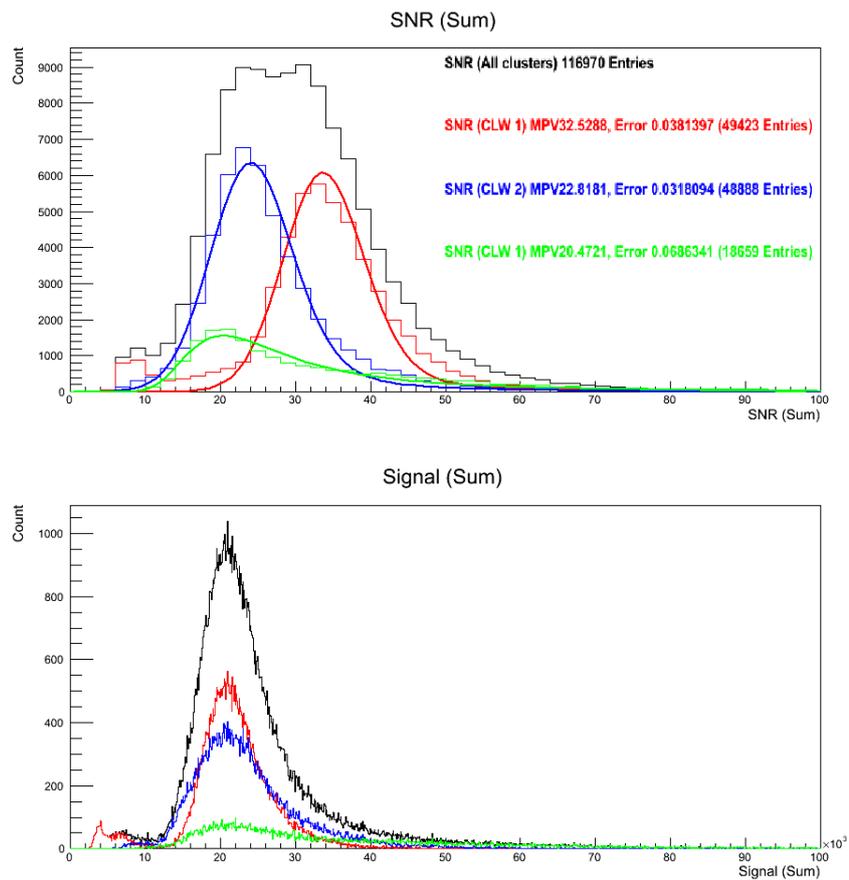


Abbildung 38: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 009 (unbestrahlt), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 0-119

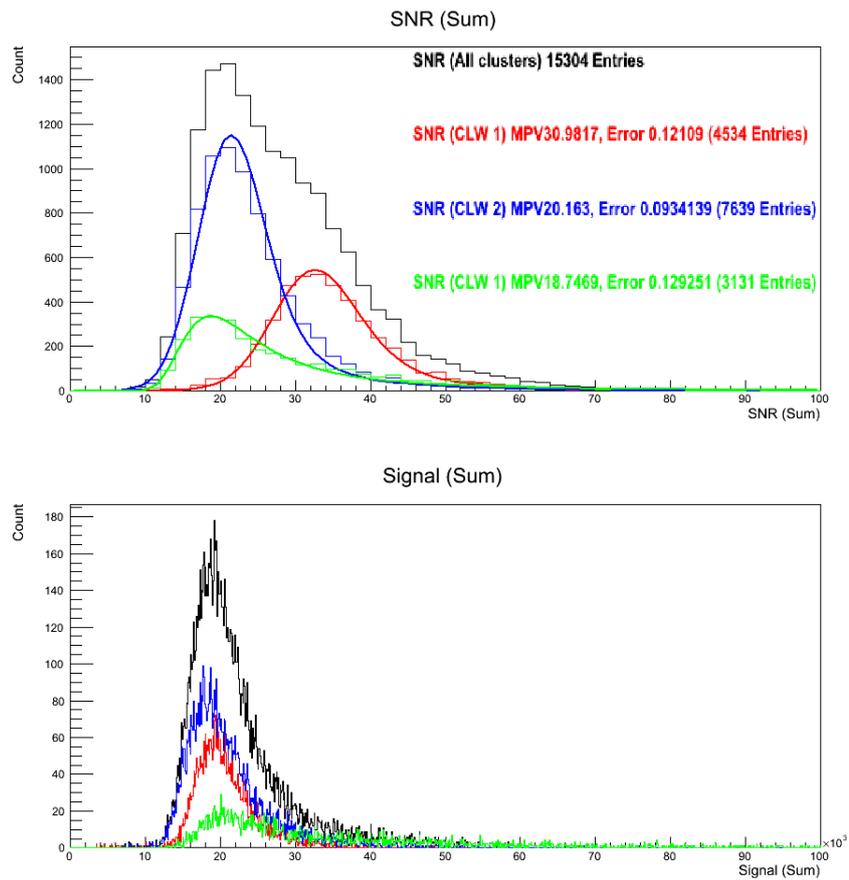


Abbildung 39: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 009(unbestraht), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 220-250

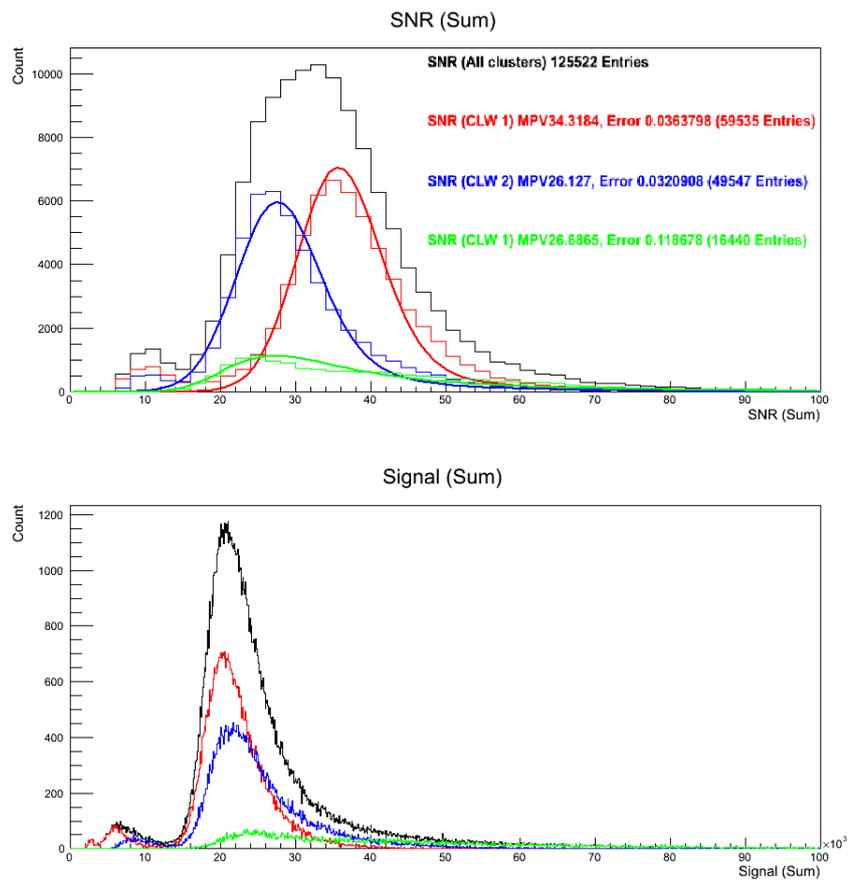


Abbildung 40: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 009 (unbestrahlt), Sensor 12\_baby, Streifenbereich 0-119

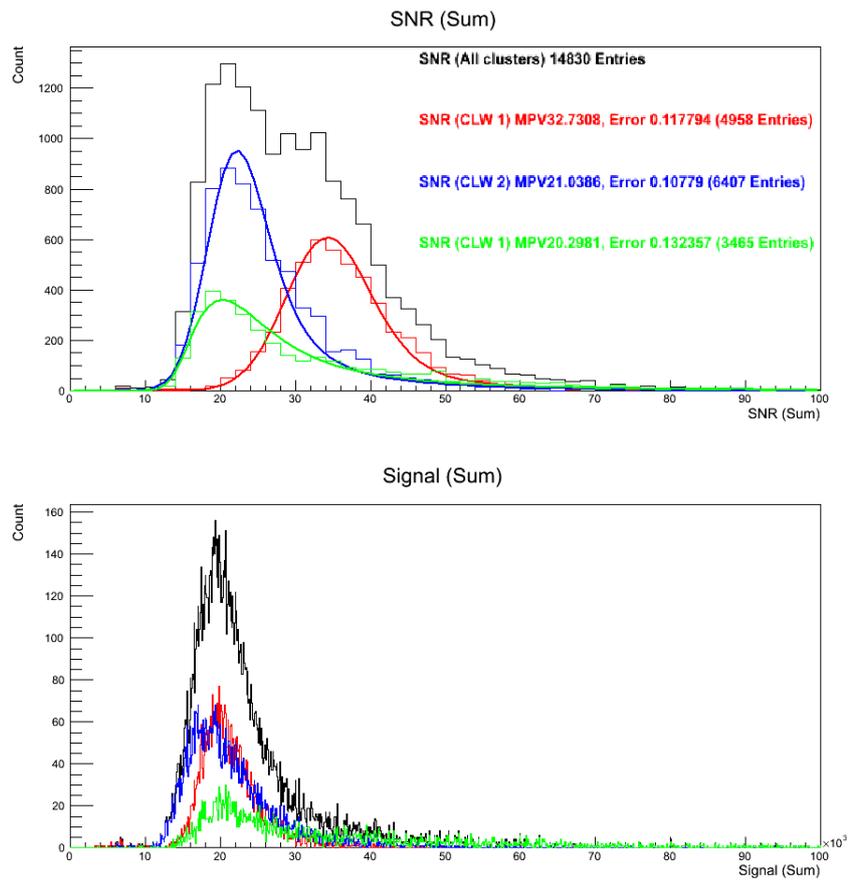


Abbildung 41: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 009 (unbestraht), Sensor 12\_baby, Streifenbereich 220-250

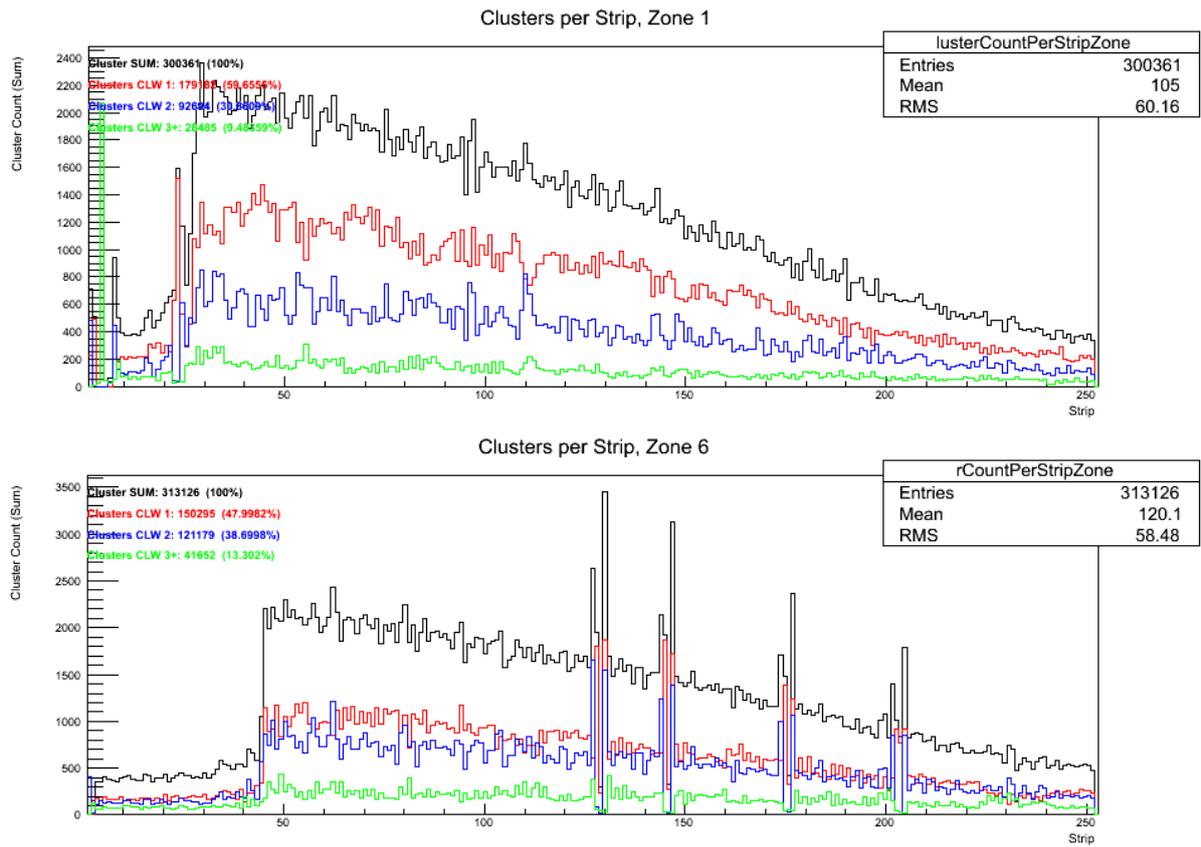


Abbildung 42: Clusterzentren pro Streifen, Runs 037 (bestrahlt), Sensoren 07\_baby und 12\_baby

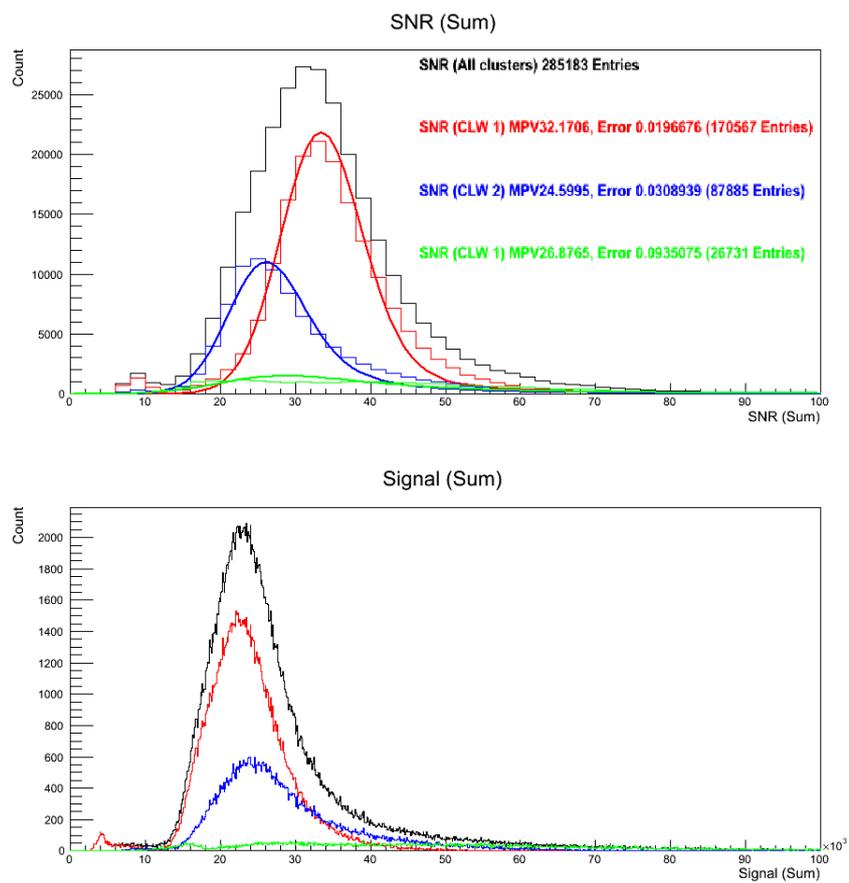


Abbildung 43: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 037 (bestrahlt), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 0-119

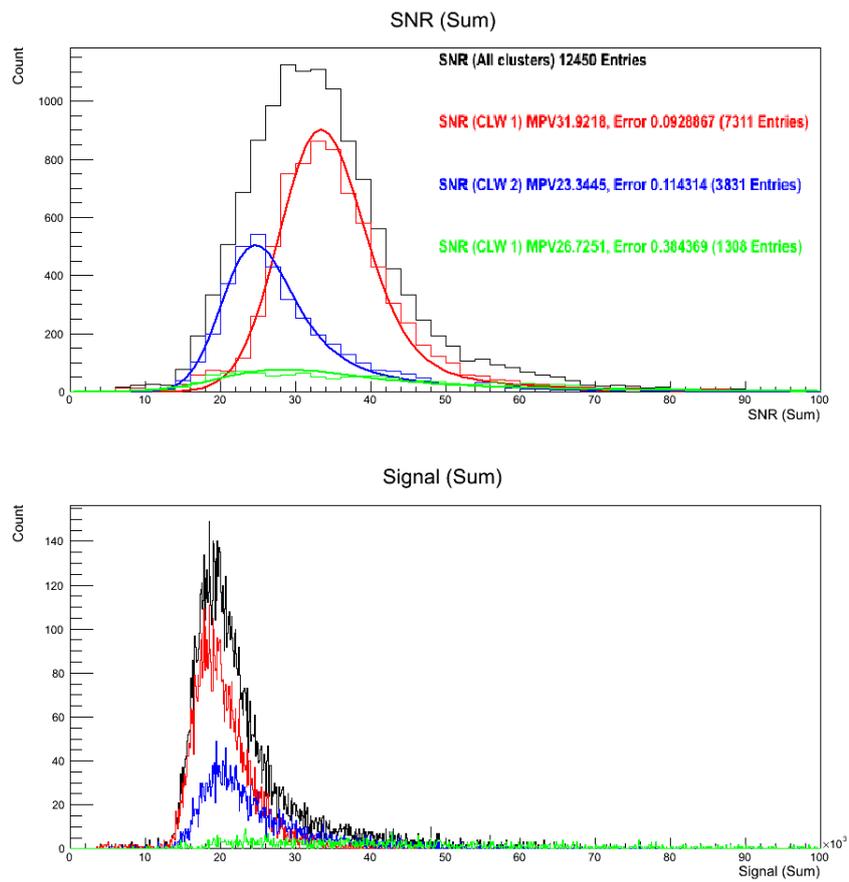


Abbildung 44: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 037 (bestrahlt), Sensor 07\_baby, Streifenbereich 220-250

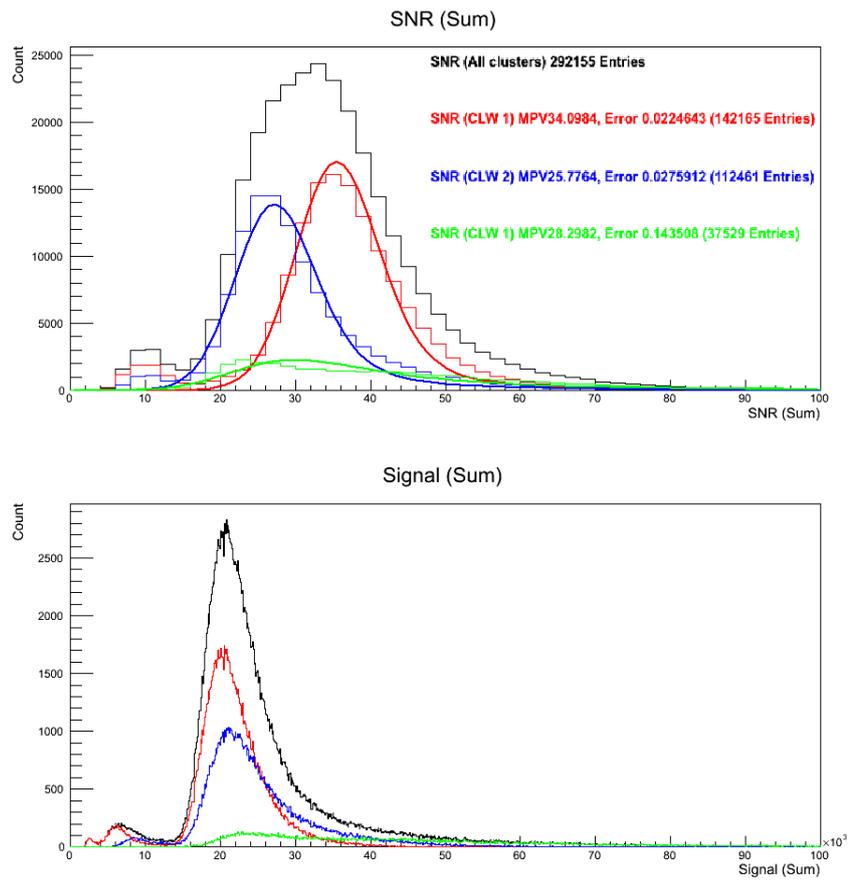


Abbildung 45: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 037 (bestrahlt), Sensor 12\_baby, Streifenbereich 0-119

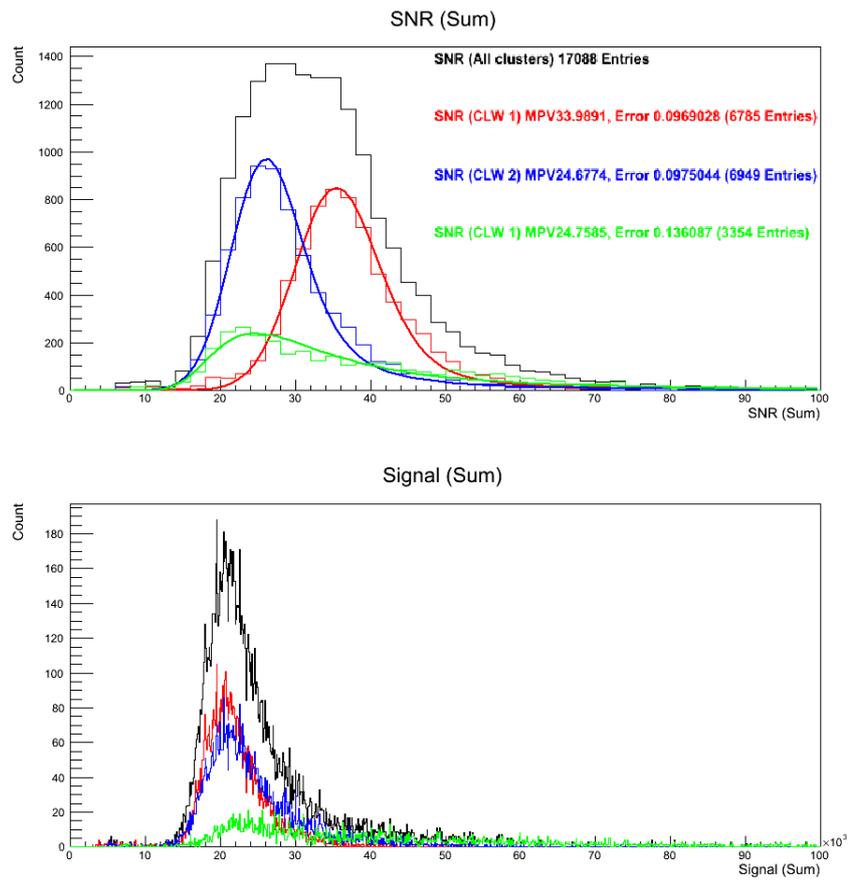


Abbildung 46: Signal-Rauschverhältnis (oben) und Signal (unten), Run 037 (bestrahlt), Sensor 12\_baby, Streifenbereich 220-250

## 6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der hohen Anzahl der Ereignisse mit einer Clusterbreite von 3 Streifen oder mehr innerhalb des Bereichs der Streifen 220-250 im unbestrahlten Zustand der Detektormodule gegenüber dem Bereich der Streifen 0-119 kann auf eine Kopplung zwischen den einzelnen Auslestreifen geschlossen werden. Diese Abweichung könnte entweder durch Abweichungen bei der Breite der Streifenimplantate im Detektorsubstrat, Abweichungen der Dicke der aufgetragenen Oxidschicht oder einer abweichenden Konzentration der implantierten Akzeptoratome beziehungsweise zusätzliche eingebrachte Ladungsträger im Bereich dieser Streifen hervorgerufen werden.

Dieser Effekt wurde durch die Bestrahlung - wie in Kapitel 5.2 beschrieben (und besonders gut in Abbildung 32 erkennbar) - von einem Verhältnis der Anzahl der Ereignisse mit einer Clusterbreite von einem Streifen zu der Anzahl der Ereignisse mit einer Clusterbreite von zwei oder mehr Streifen von  $1 : 0.7286$  auf  $1 : 1.4258$  auf dem Modul 07\_baby beziehungsweise  $1 : 0.8968$  auf  $0 : 0.9448$  auf dem Modul 12\_baby reduziert, wodurch einerseits ein metallischer Kurzschluss ausgeschlossen und desweiteren darauf geschlossen werden kann, dass durch die Entstehung von Oberflächenschäden, also primär durch das Einbringen von quasistationären positiven Ladungen in die Oxidschicht des Detektors (siehe Kapitel 1.3.4), die entsprechende kapazitative Kopplung zwischen den Streifen des Sensors reduziert wird. Dies deutet darauf hin, dass sich im Bereich der Streifen 220 bis 250 im Bereich des Oxids eine erhöhte Ansammlung negativer Ladungsträger befindet, die durch die auftretenden Strahlungsschäden kompensiert wird.

Parallel zu den Strahltests erfolgten sowohl mit baugleichen als auch den selben Sensormodulen unabhängige Messungen des Dunkelstroms sowie der Koppelkapazität der einzelnen Streifen[20]. Desweiteren wurde der Streifenstrom  $I_{\text{strip}}$  zwischen dem Gleichstrom-Pad des Streifens und der Erdreferenz gemessen und daraus der Widerstand  $R_{\text{poly}}$  berechnet (siehe Abbildungen 47 und 48). Wie aus den Messungen erkennbar ist, konnte durch diese ebenfalls ein erhöhter Streifenstrom festgestellt, beziehungsweise daraus auf einen reduzierten Widerstand im Streifenbereich 220 bis 250 geschlossen werden[20].

In nachfolgenden Arbeiten wurde gezeigt, dass das Einbringen von weiteren negativen Ladungsträgern in die Oxidschicht der Sensoren zu einer weiteren Erhöhung des Stroms  $I_{\text{strip}}$  führt, wodurch es auch zu einer stärkeren Verteilung des Signals auf benachbarte Streifen kommt[21]. Im Rahmen dieser weiteren Arbeiten wurde auch gezeigt, dass der hier gemessene Effekt durch den Fertigungsprozess hervorgerufen wurde, bei dem

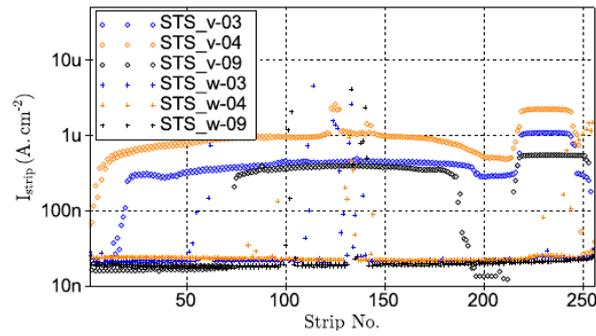


Abbildung 47: Streifenstrom  $I_{\text{strip}}$  zwischen DC Pad und Erdreferenz[20]

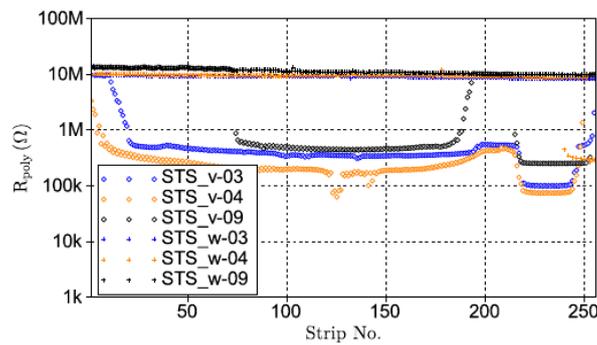


Abbildung 48: Berechneter Widerstand  $R_{\text{poly}}$ [20]

durch den Sägeprozess der Wafer sowie der während des Sägens eingesetzten Wasserkühlung durch Ionisation der Wassermoleküle negative Ladungen in das Oxid eingebracht wurden[21]. Durch Modifikationen des Kühlprozesses konnte der Effekt bei neu produzierten Detektoren vermieden werden[21].

## Literatur

- [1] Emmy Noether. Invarianten beliebiger Differentialausdrücke. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, pages 37–44, 1918.
- [2] Cottingham and Greenwood. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge University Press, 2007.
- [3] Julian Schwinger. The theory of quantized fields. *Physical Review Letters*, 82:914, 1951.
- [4] C.S. Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes, and R.P. Hudson. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical Review Letters*, 105:1413, 1957.
- [5] J. Beringer. Review of particle physics. *Physical Review D*, 86:01001, 2012.
- [6] Z. Dolezal and S. Uno. Belle II technical design report. *arXiv:1011.0352 [physics.ins-det]*, 2010.
- [7] Manfred Krammer. Silicon detectors (lecture slides). [http://www.hephy.at/fileadmin/user\\_upload/Lehre/Unterlagen/Praktikum/Halbleiterdetektoren.pdf](http://www.hephy.at/fileadmin/user_upload/Lehre/Unterlagen/Praktikum/Halbleiterdetektoren.pdf). Abgerufen: 24.11.2013.
- [8] Root documentation, tf1: 1-dim function class, <http://root.cern.ch/root/html/TF1.html>. Abgerufen: 24.11.2013.
- [9] Michael Moll. *Dissertation: Radiation Damage in Silicon Particle Detectors*. Universität Hamburg, 1999.
- [10] Gerhard Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [11] Lawrence Jones. *APV25-S1: User guide version 2.2, RAL Microelectronics Design Group*, <http://cds.cern.ch/record/1069892>. Chilton, 2001.
- [12] Markus Friedl. *Dissertation: The CMS Silicon Strip Tracker and its Electronic Readout*. Technische Universität Wien, 2001. <http://www.hephy.at/user/friedl/diss/diss.pdf>.
- [13] American National Standard for VME64 (ANSI/VITA 1.0-1994).

- [14] Christian Irmler. *Diplomarbeit: Upgrade studies for the Belle silicon vertex detector*. Technische Universität Wien, 2008. [http://www.hephy.at/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/diploma\\_thesis\\_irmler.pdf](http://www.hephy.at/fileadmin/user_upload/Publikationen/diploma_thesis_irmler.pdf).
- [15] Erik Huemer. *Diplomarbeit: Performance studies on stacked silicon strip sensors*. Institut für Hochenergiephysik der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2014. [http://www.hephy.at/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/AC11082022.pdf](http://www.hephy.at/fileadmin/user_upload/Publikationen/AC11082022.pdf).
- [16] S. Haensel, T. Bergauer, Z. Dolezal, M. Dragicevic, Z. Drasal, M. Friedl, J. Hrubec, C. Irmler, W. Kiesenhofer, M. Krammer, and P. Kvasnicka2. Resolution studies on silicon strip sensors with fine pitch. *arXiv:0901.4903 [physics.ins-det]*, 2009.
- [17] *Short Introduction to the use of the H6 beam*. <http://sba.web.cern.ch/sba/BeamsAndAreas/h6/H6manual.pdf>, Abgerufen: 5.1.2014.
- [18] Accelerators and Technology Sector. <https://espace.cern.ch/acc-tec-sector/default.aspx>. Abgerufen: 5.1.2014.
- [19] Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire. *How to control the North Area Beam Lines*, 2012. <http://sba.web.cern.ch/sba/Documentations/How2controlNAbeams.htm>.
- [20] Wolfgang Treberspurg. *Dissertation: Development of prototype silicon strip sensor for the upgrade of the CMS experiment at CERN*. Technische Universität Wien, 2014.
- [21] Axel König. *Masterarbeit: Electrical characterisation and aging studies of silicon strip sensors*. Universität Wien, 2014.