

Studien zur Ortsauflösung
bestrahlter
Silizium-Streifensensoren mit
geladenen Teilchen der kosmischen
Höhenstrahlung

Andreas Nürnberg

Diplomarbeit

Institut für Experimentelle Kernphysik
Fakultät für Physik
Karlsruher Institut für Technologie

Referent: Prof. Dr. Thomas Müller
Korreferent: Prof. Dr. Wim De Boer

9. November 2009

Prüfungserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder erlaubten Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche oder sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Karlsruhe, 9. November 2009

Andreas Nürnberg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	LHC & CMS	9
2.1	Large Hadron Collider	9
2.2	Das CMS-Experiment	11
3	Kosmische Höhenstrahlung	15
4	Halbleiter	19
4.1	Bändermodell	19
4.2	Dotierung	21
4.3	pn-Übergang	22
4.4	Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie	24
4.5	Streifensensor	25
4.6	Strahlenschäden	26
4.6.1	Leckstrom	26
4.6.2	Typ-Inversion	27
5	Das Teleskop	29
5.1	CMS Streifensensor	30
5.1.1	Modul	30
5.1.2	Hybrid-Platine	30
5.1.3	Analog-Opto-Hybrid	33
5.1.4	Front-End-Driver	33
5.1.5	Front-End-Controller	33
5.1.6	Trigger-Sequencer-Card	34
5.2	Triggersystem	34
5.3	Slow-Control	35
5.4	Voruntersuchungen zum Aufbau des Teleskops	37
5.4.1	Simulation der Vielfachstreuung mit Geant4	37
5.4.2	Untersuchungen zum Alignment	39
5.5	Das Teleskop	41
5.6	Kühlvorrichtung	45
6	Methode der Datenanalyse	47
6.1	Rekonstruktion	47

6.1.1	Pedestal	47
6.1.2	Rauschen	48
6.1.3	Common-Mode	49
6.1.4	Clustersuche	49
6.1.5	Signal-Rausch-Verhältnis	50
6.1.6	Rekonstruktion	51
6.2	Tracking	53
6.3	Ortsauflösung	53
6.4	Alignment	56
7	Datenanalyse	59
7.1	Kalibration der Module	59
7.1.1	Timing	59
7.1.2	Gain	59
7.1.3	Latency	60
7.2	Performance des Teleskops	60
7.2.1	Signal-Rausch-Verhältnis	60
7.2.2	Kühlung	61
7.2.3	Clustergröße	63
7.2.4	Ortsauflösung	64
7.2.5	Alignment	67
7.3	Untersuchung bestrahlter Module	67
7.3.1	Signal-Rausch-Verhältnis	68
7.3.2	Clustergröße	69
7.3.3	Eta-Verteilung	70
7.3.4	Ortsauflösung	73
7.3.5	Temperaturabhängigkeit der Ortsauflösung	77
7.3.6	Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bias-Spannung	78
7.3.7	Deconvolution-Modus	79
8	Zusammenfassung	83
	Abbildungsverzeichnis	87
	Tabellenverzeichnis	89
	Literaturverzeichnis	91

1 Einleitung

Die fundamentalen Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben. Die freien Parameter des Standardmodells, wie die Masse der Teilchen oder die Kopplungskonstanten der Wechselwirkung müssen experimentell ermittelt und in das Modell eingebaut werden [PRSZ09]. Dies geschieht durch Kollisionsexperimente an Teilchenbeschleunigern. Durch die Wechselwirkung hochenergetischer Primärteilchen entstehen bei der Kollision sekundäre Teilchen, die von den Detektoren registriert und analysiert werden. Aus den Eigenschaften der detektierten Teilchen kann auf die bei der Kollision entstandenen Teilchen und die wirkenden Austauschkräfte geschlossen werden.

Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN¹ bei Genf ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit einem Umfang von 27 km. In den Detektoren an den vier Wechselwirkungspunkten kollidieren alle 25 ns Protonenpakete, die aus ungefähr 10^{11} Teilchen bestehen. Einer der Detektoren ist CMS². Zur Spurrekonstruktion geladener Teilchen wurde ein Spurdetektor konstruiert, der aus Silizium-Pixel- und Streifensensoren besteht. Durch die Nähe zum Wechselwirkungspunkt und die hohe Kollisionsrate der Protonpakete sind die Detektormodule des Spurdetektors großen Flüssen von Teilchenstrahlung ausgesetzt. Durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Detektormaterial wird dessen Siliziumstruktur geschädigt und die Leistungsfähigkeit herabgesetzt. Der Spurdetektor muss daher nach 10 Jahren Betrieb am LHC ausgetauscht werden. Durch die geplante Erweiterung des LHC zum Super-LHC und die damit verbundene noch höhere Strahlenbelastung des Spurdetektors werden derzeit neuartige Halbleitermaterialien und Sensorgeometrien auf ihre Tauglichkeit für einen Einsatz im CMS-Spurdetektor am Super-LHC untersucht.

Einer der wichtigsten Parameter eines Spurdetektors ist die Ortsauflösung, mit der Teilchendurchgänge registriert werden können. Das Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe ist an der Entwicklung des Spurdetektors für das CMS-Experiment am Super-LHC beteiligt. In [Sus09] wurde im Rahmen dieser Studien der Prototyp eines Teleskopaufbaus zur Untersuchung der Ortsauflösung von Streifensensoren mit Hilfe elektrisch geladener Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung untersucht. Dieser Aufbau bot keine einfache Möglichkeit, ein weiteres, zu untersuchendes Modul in die Anordnung einzubringen. Des Weiteren war keine Kühlung der Module vorgesehen, weshalb nur unbestrahlte Sensoren vermessen werden konnten. Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war die Konstruktion eines bezüglich der erreichbaren Ortsauflösung optimierten Aufbaus, sowie

¹Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

²Compact Muon Solenoid

die Entwicklung einer Kühlvorrichtung, um auch bestrahlte Sensormodule vermessen zu können. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Teleskop wurde die Ortsauflösung eines unbestrahlten und zweier bestrahlter Streifensensoren aus der Produktion für den CMS-Spurdetektor untersucht.

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über den Large Hadron Collider und das CMS-Experiment. Außerdem wird auf die Herausforderungen eingegangen, die sich durch die geplante Erweiterung des LHC zum Super-LHC ergeben. Ein kurzer Überblick über den Ursprung der kosmischen Höhenstrahlung ist in Kapitel 3 gegeben. In Kapitel 4 werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Halbleiterphysik dargestellt. Die Unterschiede zwischen reinen und dotierten Halbleitern werden erläutert, ebenso wie der pn-Übergang, auf dem die Funktion eines Halbleiterdetektors basiert. Desweiteren wird der Aufbau eines Siliziumstreifensensors des CMS-Experiments dargestellt und auf die Schädigung von Halbleiterdetektoren durch Teilchenstrahlung eingegangen. In Kapitel 5 sind die einzelnen Komponenten des in dieser Arbeit konstruierten Teleskopaufbaus beschrieben, sowie die durchgeführten Voruntersuchungen erläutert. Kapitel 6 erläutert die einzelnen Schritte der Datenauswertung der mit dem Teleskop gewonnenen Rohdaten. Die Resultate der Untersuchung bestrahlter Detektormodule sind in Kapitel 7 dargestellt.

2 LHC & CMS

2.1 Large Hadron Collider

Der LHC ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit einem Umfang von 27 km am CERN bei Genf. Zwei gegenläufige Protonen-Strahlen werden nach dem Einschuss mit 450 GeV auf eine Energie von jeweils 7 TeV beschleunigt. Die Teilchenstrahlen verbleiben für mehrere Stunden bei dieser hohen Energie im Beschleuniger. Während dieser Zeit kollidieren die Teilchenstrahlen mit einer Rate von 40 MHz mit einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 14\text{ TeV}$ in den vier Wechselwirkungspunkten, an denen die vier LHC Hauptexperimente ATLAS¹, ALICE², CMS³ und LHCb⁴ liegen. Die Lage der Experimente ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung sinkt mit steigender Energie. Um dennoch genügend Reaktionen zu erhalten, beträgt die Luminosität⁵ des LHC $10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

ATLAS ist ein 45 m langer, zylindrischer Detektor mit einem Durchmesser von 22 m . Zweck des ATLAS-Detektors ist unter anderem die Suche nach dem Higgs-Boson und nach supersymmetrischen Teilchen [ATL].

Neben Proton-Proton-Kollisionen können mit dem LHC auch Schwerionen-Kollisionen untersucht werden. Der hierfür gebaute ALICE-Detektor untersucht die Physik stark-wechselwirkender Materie bei extremen Energiedichten, bei denen die Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas erwartet wird [ALI].

Der CMS-Detektor sucht - ebenso wie der ATLAS-Detektor - nach dem Higgs-Boson und nach supersymmetrischen Teilchen. Der Detektor ist mit einer Länge von 21 m , einem Durchmesser von 15 m und einem Gewicht von 12500 Tonnen kompakter als der ATLAS-Detektor [CMS]. Die Konzepte von ATLAS und CMS sind sehr unterschiedlich, was eine Überprüfung von wissenschaftlichen Resultaten, vor allem aber die Bestätigung oder Widerlegung von Entdeckungen ermöglicht [Mül08].

Das LHCb-Experiment sucht in den Zerfällen von B-Mesonen nach Asymmetrien zwischen Materie und Antimaterie [LHC].

¹A Toroidal LHC Apparatus

²A Large Ion Collider Experiment

³Compact Muon Solenoid

⁴LHC beauty Experiment

⁵ $\frac{dN}{dt} = \sigma L$. Dabei ist $\frac{dN}{dt}$ die Reaktionsrate, σ der Wirkungsquerschnitt und L die Luminosität.

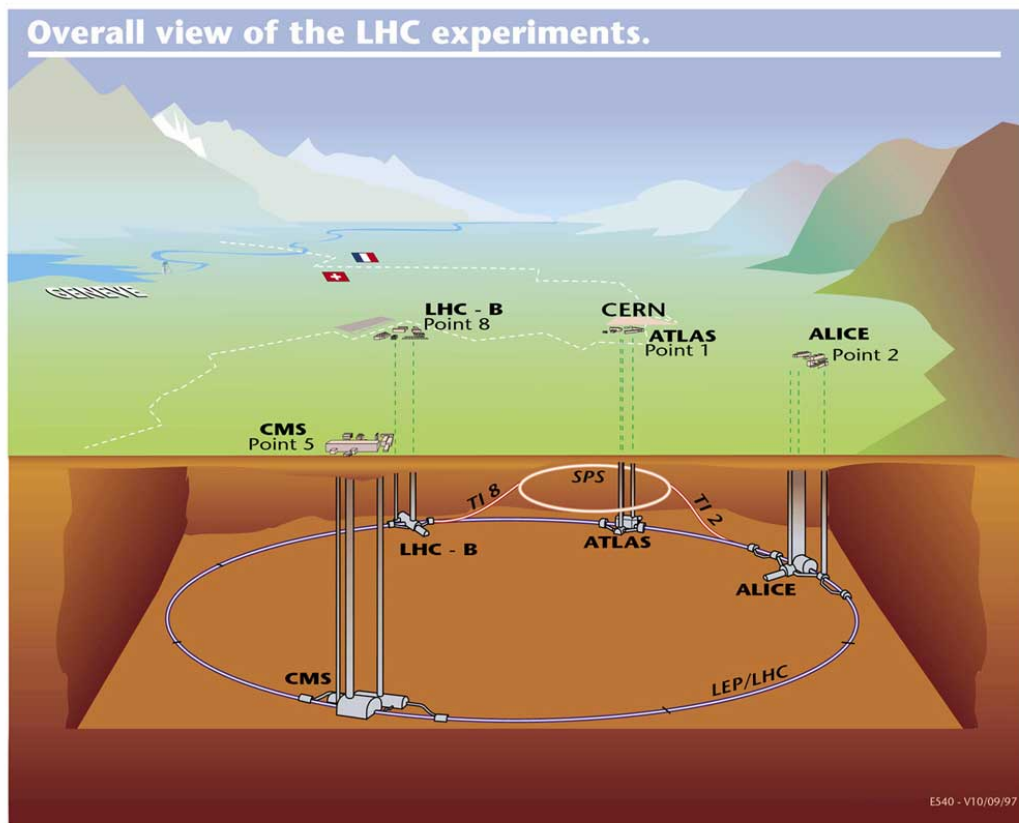


Abbildung 2.1: Lage der Experimente an den vier Kreuzungspunkten der Protonenstrahlen des LHC [cer]

Am 10. September 2008 wurde der LHC in Betrieb genommen. Die Teilchenstrahlen konnten so justiert werden, dass ein kompletter Umlauf in beiden Richtungen möglich war. Nach einem Zwischenfall am 19. September 2008 mussten jedoch ungefähr 50 supraleitende Magnete des Beschleunigers ausgetauscht werden. Der Neustart des LHC ist für November 2009 geplant.

Der Super Large Hadron Collider ist der geplante Nachfolger des LHC. Die Luminosität soll auf $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erhöht werden [Nas07]. Der Start des SLHC ist für 2019 vorgesehen, die ersten Modifikationen am Beschleuniger sollen 2012 parallel zum normalen Betrieb installiert werden [EL08]. Gründe für das Upgrade sind die präzisere Vermessung von neuen - mit dem LHC gefundenen - Phänomenen.

Um eine Steigerung der Luminosität um einen Faktor 10 zu erreichen, gibt es mehrere unterschiedliche Pläne. Neben einer höheren Einschussenergie durch verbesserte Vorbeschleuniger kann die Anzahl der Teilchenpakete verdoppelt werden. Die Rate, mit der die Kollisionen stattfinden würde sich von 40 MHz auf 80 MHz erhöhen. Ein anderer Ansatz

ist es, die Anzahl der Protonen in einem Teilchenpaket zu verdoppeln. Die Kollisionsrate würde dann bei 40 MHz belassen [EL08].

2.2 Das CMS-Experiment

Der CMS-Detektor besteht aus verschiedenen Sub-Detektoren, die in unterschiedlicher Entfernung zum Wechselwirkungspunkt angebracht sind. Ausgehend vom Wechselwirkungspunkt sind dies

- ein Silizium-Spurdetektor
- ein elektromagnetisches und ein hadronisches Kalorimeter
- sowie ein Myon-Detektor

Eine supraleitende Spule erzeugt ein 4T starkes Magnetfeld, in dem sich der Spurdetektor sowie die beiden Kalorimeter befinden. Die Myon-Detektoren befinden sich außerhalb der Spule und sind in das Rückführjoch des Magneten eingebettet. Abbildung 2.2 zeigt einen Querschnitt durch den Detektor.

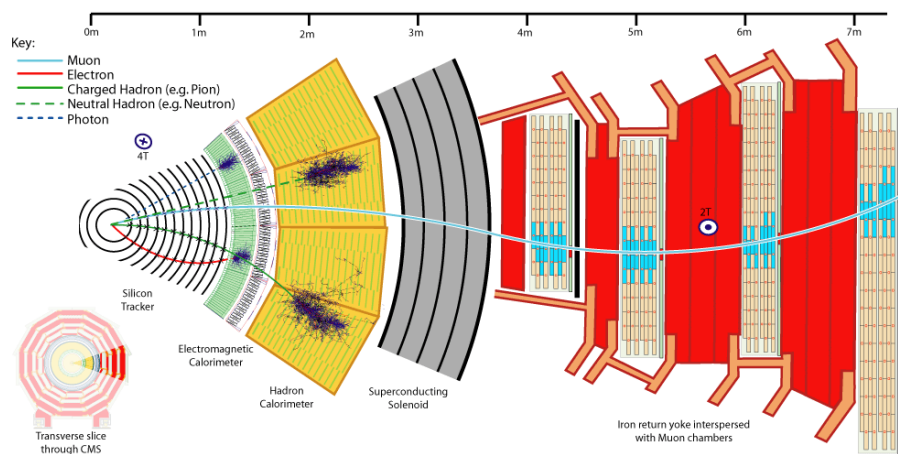


Abbildung 2.2: Querschnitt durch den CMS-Detektor [CMS]

Der Spurdetektor dient der Rekonstruktion der Flugbahn geladener Teilchen, die den Wechselwirkungspunkt verlassen. Durch das starke Magnetfeld im Inneren des Detektors sind die Flugbahnen geladener Teilchen auf Grund der Lorentz-Kraft gekrümmt. Aus der Stärke der Krümmung lässt sich auf den Impuls der Teilchen schließen.

Elektronen und Photonen sind für die Suche nach dem Higgs-Boson von besonderem Interesse. Ihre Energie wird im elektromagnetischen Kalorimeter bestimmt. Sie erzeugen in den Bleiwolframat-Szintillatoren des Kalorimeters Teilchenschauer. Die dabei entstehende

Lichtmenge wird von Photodetektoren gemessen. Sie ist proportional zur ursprünglichen Teilchenenergie.

Das hadronische Kalorimeter besteht aus sich abwechselnden Schichten von Messing-Absorbern und Szintillatoren. Hadronen werden im Kalorimeter vollständig absorbiert. Auf diese Weise kann ihre Energie bestimmt werden.

Wie der Name "Compact Muon Solenoid" vermuten lässt, ist die Detektion von Myonen eine der wichtigsten Aufgaben des CMS-Detektors. Myonen können mehrere Meter Eisen ohne Wechselwirkung durchfliegen, weshalb sie nicht von einem der Kalorimeter gestoppt werden. Deshalb sind die Myon-Detektoren ganz außen angebracht, denn hier sind Myonen die einzigen Teilchen, die die Detektoren erreichen können. Der Myon-Detektor besteht aus Driftröhren, Kathodenstreifenkammern und Widerstandsplattenkammern, die in das Rückführjoch des Solenoid-Magneten eingebettet sind. Da die Myon-Detektoren außerhalb der Solenoidspule sind, zeigt das Magnetfeld hier in die entgegengesetzte Richtung und ist mit 2T nur halb so stark, wie im Inneren des Detektors [CMS].

Abbildung 2.3 zeigt den geöffneten CMS-Detektor.

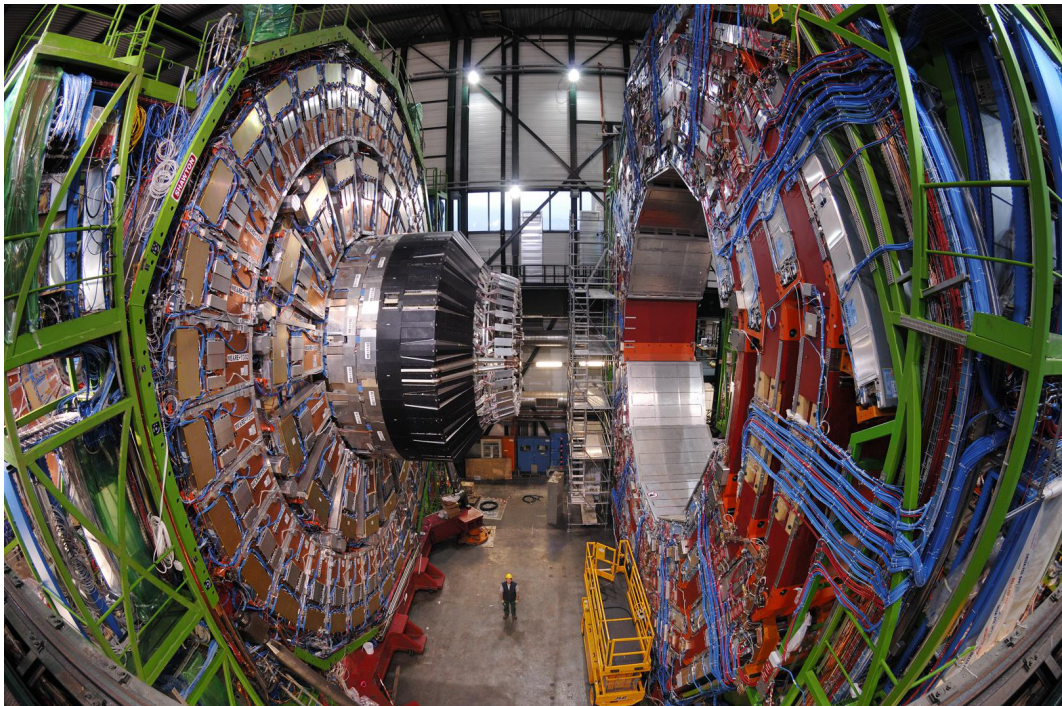


Abbildung 2.3: CMS-Detektor [CMS]

Der Spurdetektor des CMS-Experiments besteht vollständig aus Siliziumdetektoren, die in mehreren Untergruppen angeordnet sind. Der schematische Aufbau des Detektors ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die innersten drei Detektorschichten bestehen aus zylindrischen Lagen von Silizium-Pixel-sensoren, die im Abstand von 4 cm, 7 cm und 11 cm um das Strahlrohr angebracht sind. Zwei Endkappen schließen den Pixeldetektor in Vorwärtsrichtung ab. Der gesamte Pixeldetektor besteht aus etwa 65 Millionen Pixeln. Jedes Pixel hat eine sensitive Fläche von $100 \times 150 \mu\text{m}^2$. Durch die große Nähe zum Wechselwirkungspunkt und seine gute Ortsauflösung von $10 \mu\text{m}$ ist der Pixeldetektor für die Rekonstruktion von sehr kurzlebigen Teilchen besonders wichtig. Durch die große Nähe zum Strahlrohr ist der Pixeldetektor der Detektor, der der größten Strahlenbelastung ausgesetzt ist. In 8 cm Abstand zum Wechselwirkungspunkt wird der Pixeldetektor von 10 Millionen Teilchen pro cm^2 und Sekunde getroffen, weshalb er nach derzeitiger Planung 2013 ersetzt wird [Rad09].

Auf die drei Lagen des Pixeldetektors folgen 10 Lagen Silizium-Streifensensoren, die den Bereich bis zu einem Radius von 130 cm um das Strahlrohr abdecken.

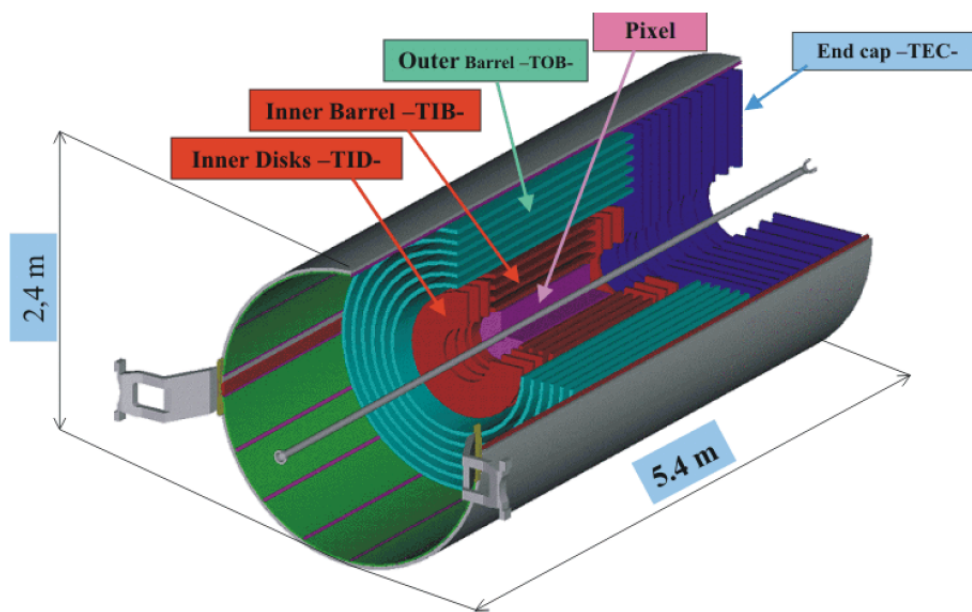


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau des Silizium Spurdetektors [Blo07]

Der Streifendetektor besteht aus vier inneren zylindrischen Lagen (TIB⁶) mit zwei inneren Endkappen (TID⁷). In den äußeren zylindrischen Lagen (TOB⁸) sind die Module in sechs konzentrischen Lagen angeordnet. Der Tracker wird von zwei Endkappen (TEC⁹) abgeschlossen. Der Streifendetektor ist aus 15.200 Modulen mit ungefähr 10 Millionen Streifen aufgebaut. Die Module decken dabei eine Fläche von über 200 m^2 ab [CMS].

⁶Tracker Inner Barrel

⁷Tracker Inner Disc

⁸Tracker Outer Barrel

⁹Tracker End Cap

3 Kosmische Höhenstrahlung

Kosmische Teilchen werden - neben Lasern, radioaktiven Quellen und Teilchenstrahlen an Beschleunigern - verwendet um Teilchendetektoren zu testen. Verglichen mit anderen Signalquellen bieten kosmische Teilchen den Vorteil, auch größere Detektorflächen unter Laborbedingungen zu bestrahlen, allerdings mit niedriger Rate und ohne Kontrolle über die Teilchenenergie [Blo07].

Das Spektrum geladener Teilchen wird auf der Erdoberfläche von Myonen dominiert. Sie entstehen aus der Wechselwirkung hochenergetischer Primärteilchen - hauptsächlich Protonen und Alphateilchen - mit Molekülen der äußeren Atmosphäre. Das Spektrum der Primärteilchen reicht von einigen MeV bis zur derzeit maximalen nachgewiesenen Energie von 10^{20} eV, wie Abbildung 3.1 zeigt.

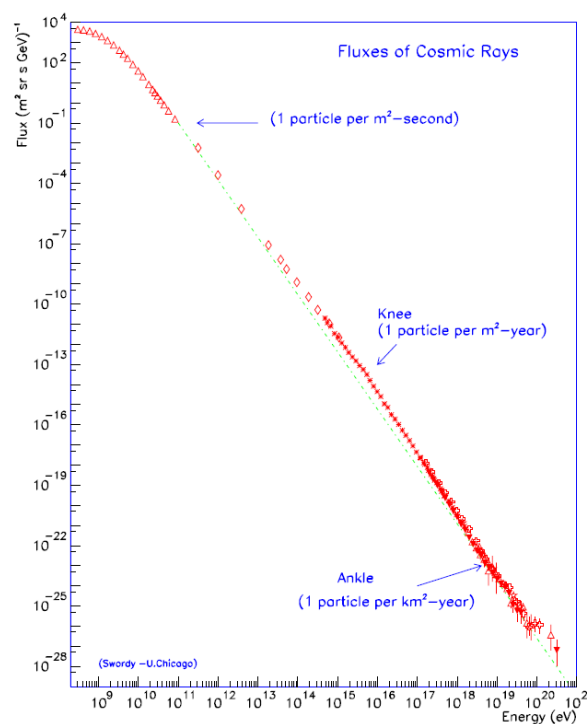


Abbildung 3.1: Fluss der geladenen Komponente der kosmischen Strahlung [Kol07]

Bei der Wechselwirkung hochenergetischer kosmischer Teilchen mit der Atmosphäre entstehen vorwiegend Pionen, welche durch die schwache Wechselwirkung fast ausschließlich in Myonen zerfallen [Blo07].

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (3.2)$$

Das Energiespektrum niederenergetischer Myonen wurde in Ballon-Experimenten vermessen, zum Beispiel dem CAPRICE94 Experiment, welches in [BCF⁺00] beschrieben ist. Abbildung 3.2 zeigt den differentiellen Fluss kosmischer Myonen auf Meereshöhe in Abhängigkeit von ihrer Energie. Das Maximum des Spektrums liegt bei 500 MeV, die mittlere Teilchenenergie beträgt 4 GeV.

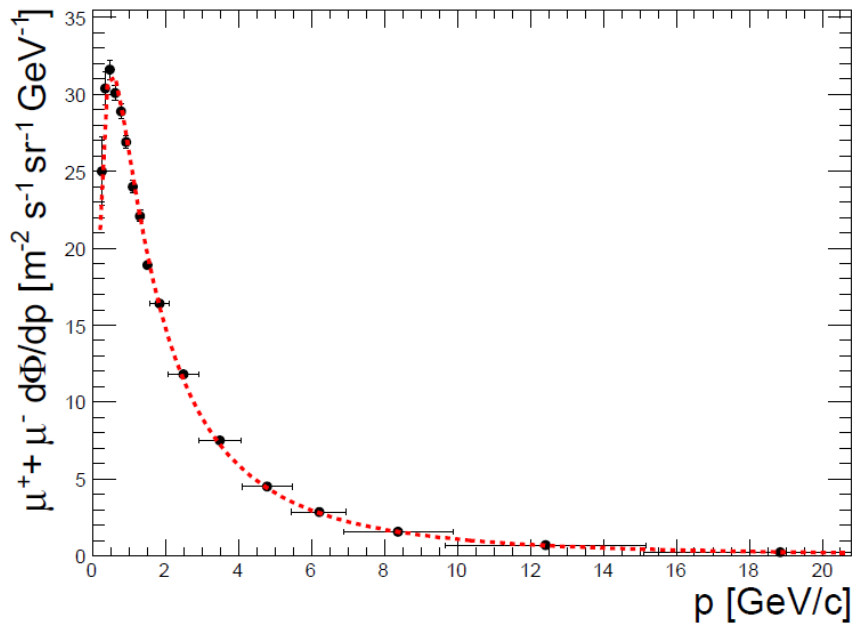


Abbildung 3.2: Differentieller Fluss kosmischer Myonen auf Meereshöhe [Blo07]

Gleichung 3.3 beschreibt die in Abbildung 3.2 gezeigte Parametrisierung des Spektrums.

$$\frac{dI}{dp} = p^{-1.5} e^{(3,266 + 0,946 \cdot \ln(p) - 0,402 \cdot \ln(p)^2 + 0,0187 \cdot \ln(p)^3)} \quad (3.3)$$

Durch den großen Anteil niederenergetischer Myonen spielt Vielfachstreuung der Teilchen an den Luftmolekülen und den Teleskopsensoren bei der Bestimmung der Ortsauflösung eine entscheidende Rolle. Gleichung 3.4 gibt den mittleren Streuwinkel θ_0 an, um den ein Teilchen mit Impuls p und Ladung z beim Durchtritt durch ein Material der Dicke x und der Strahlungslänge X_0 abgelenkt wird [Y⁺06].

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \quad (3.4)$$

Tabelle 3.1 zeigt die Materialeigenschaften für die in dieser Arbeit untersuchten $500 \mu\text{m}$ dicken Siliziumsensoren.

Dichte ρ	Strahlungslänge X_0	Dicke	x	$\frac{x}{X_0}$
$2.33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$21.82 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$	$500 \mu\text{m}$	$0.12 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.1: Strahlungslänge der Siliziumsensoren, Materialeigenschaften aus [Y⁺06]

Abbildung 3.3 zeigt den mittleren Streuwinkel beim senkrechten Durchtritt eines Myons durch $500 \mu\text{m}$ Silizium in Abhängigkeit des Teilchenimpulses, wie er durch Gleichung 3.4 gegeben ist.

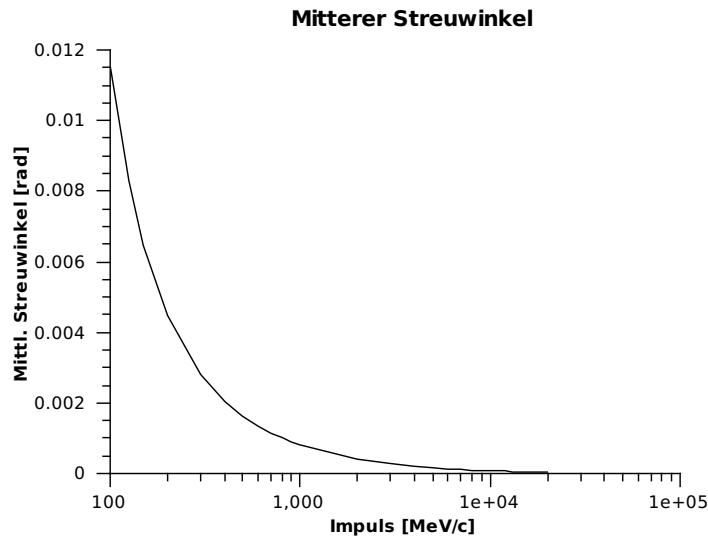


Abbildung 3.3: Mittlerer Streuwinkel

Ein Myon mit einem Impuls von 500 MeV/c wird im Mittel um $1,6 \text{ mrad} = 0,09^\circ$ abgelenkt, wenn es eine Sensorebene senkrecht durchtritt. Im später betrachteten Aufbau sind die Sensoren im Abstand von 3 cm angeordnet. Der Versatz der Teilchenspur von einem Sensor zum nächsten beträgt daher im Mittel $49 \mu\text{m}$. Myonen mit einem Impuls von 4 GeV/c werden im Mittel um $0,2 \text{ mrad} = 0,011^\circ$ abgelenkt. Dies entspricht einem Versatz der Teilchenspur um $6 \mu\text{m}$. Dieser Versatz der Teilchenspuren liegt in der gleichen Größenordnung wie die erwartete Ortsauflösung der Sensoren und wird somit bei der Bestimmung der Ortsauflösung eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Daher wird der Einfluss der Vielfachstreuung auf die Ortsauflösung in Kapitel 5.4.1 durch eine Simulation genauer untersucht.

4 Halbleiter

Auf Grund der sehr guten zeitlichen und räumlichen Auflösung verwendet man für die Spurrekonstruktion in modernen Hochenergieexperimenten häufig Halbleiterdetektoren. Als Detektormaterial kommt hauptsächlich Silizium zum Einsatz. Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe und steht in der dritten Periode. Die Ordnungszahl ist $Z = 14$. Es ist mit 25% das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Silizium kommt in der Natur jedoch nicht in reiner Form vor, sondern hauptsächlich als Silikat oder Siliziumdioxid.

Elementares Silizium kristallisiert in der Diamantstruktur, die in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Jedes Siliziumatom bildet vier sp^3 -Hybridorbitale aus, die unter $109,5^\circ$ tetraedrisch angeordnet sind und für die kovalente Bindung der Siliziumatome im Kristallgitter sorgen. Die Gitterkonstante beträgt $5,43 \text{ \AA}$.

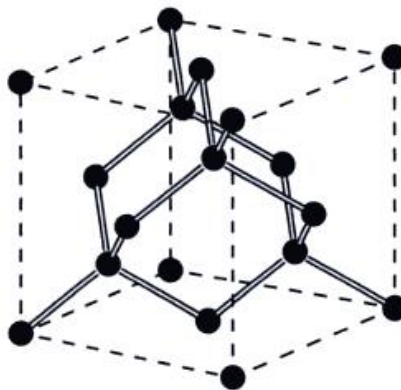


Abbildung 4.1: Diamantstruktur [Kit06]

4.1 Bändermodell

In freien Atomen können die Elektronen nur diskrete Energieniveaus besetzen. Im Festkörper sind die Atome so eng angeordnet, dass sich die Elektronenwellenfunktionen gegenseitig beeinflussen. Die diskreten Energiezustände spalten sich zu Energiebändern auf, die sehr viele dicht beieinanderliegende Niveaus enthalten. Zwischen den Bändern gibt es Bereiche, in denen keine erlaubten Niveaus liegen. Aus den diskreten $3s^2$ und $3p^2$ Valenz-Niveaus des

Silizium bilden sich das Valenzband und das Leitungsband. Die Aufspaltung und damit die energetische Lage der einzelnen Energiebänder ist vom Gitterabstand abhängig. Abbildung 4.2 zeigt die Bandstruktur von Silizium in Abhängigkeit des Gitterabstandes.

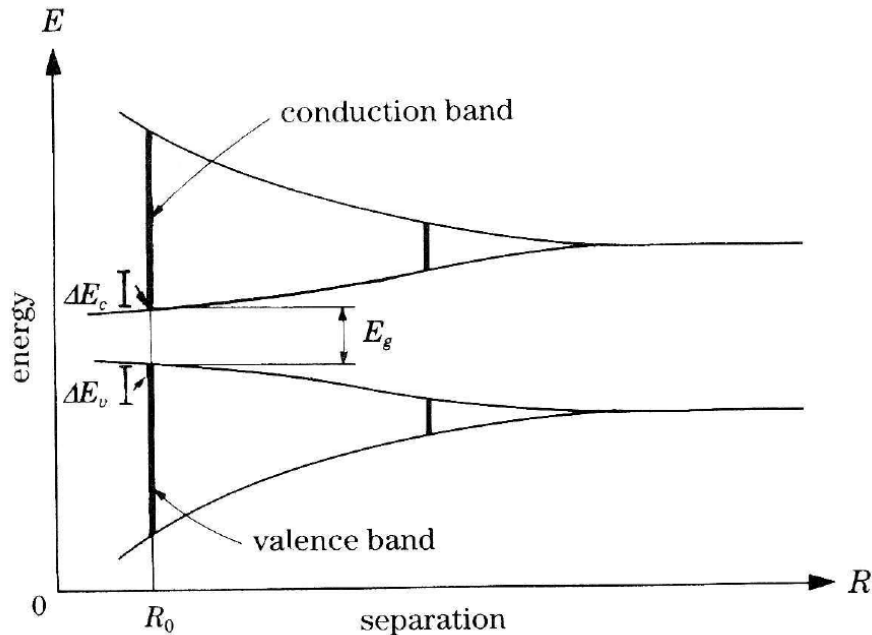


Abbildung 4.2: Aufspaltung der Energieniveaus von Silizium in Abhängigkeit des Gitterabstands [SH03].

Die erlaubten Zustände werden von den im Festkörper vorhandenen Elektronen besetzt. Begonnen wird bei den energetisch niedrigsten Zuständen. Auf Grund des Pauli-Prinzips müssen auch energetisch höher liegende Zustände besetzt werden. Im Grundzustand sind daher alle Energiezustände bis zu einer Maximalenergie besetzt, darüber liegende Zustände sind unbesetzt. Die Energie des Zustandes, dessen Besetzungswahrscheinlichkeit 0,5 beträgt, ist die Fermi-Energie. Das energetisch höchste voll besetzte Band wird als Valenzband bezeichnet, das energetisch niedrigste teilweise gefüllte oder leere Band ist das Leitungsband.

Zur elektrischen Leitung tragen nur Elektronen bei, die in teilweise besetzten Bändern liegen. Elektronen in voll besetzten Bändern und leere Bänder tragen nicht zur elektrischen Leitung bei. Festkörper lassen sich anhand ihrer Bandstruktur und Elektronenkonfiguration daher in drei Klassen einteilen:

- Metalle
- Halbleiter
- Isolatoren

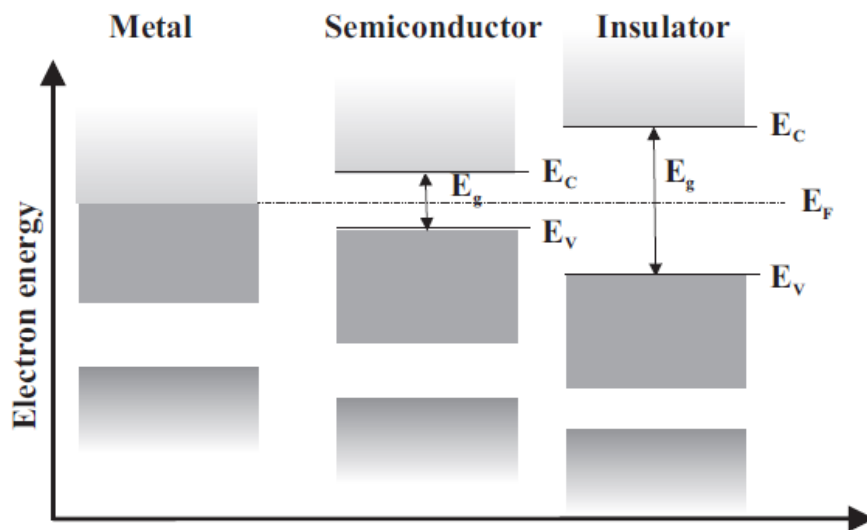


Abbildung 4.3: Vereinfachte Bandstruktur von Metallen, Halbleitern und Isolatoren

Bei Metallen liegt die Fermi-Energie E_F innerhalb des Leitungsbandes, wie Abbildung 4.3 zeigt. Sie haben daher am absoluten Nullpunkt ein teilweise gefülltes Leitungsband. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist groß. Bei Isolatoren liegt die Fermi-Energie in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Das Leitungsband ist nicht besetzt, die Leitfähigkeit ist gering. Darüber hinaus beträgt die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband mehrere Elektronenvolt, so dass eine thermische Anregung von Elektronen ins Leitungsband nur bei sehr hohen Temperaturen möglich ist. Auch bei Halbleitern liegt die Fermi-Energie in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Bei tiefen Temperaturen sind Halbleiter deshalb Isolatoren. Die Bandlücke ist im Vergleich zu den Isolatoren jedoch kleiner. Sie beträgt für Silizium $E_g = 1,1 \text{ eV}$. Elektronen können daher thermisch vom Valenzband ins Leitungsband angehoben werden. Wird die elektrische Leitung durch thermisch angeregte Elektronen dominiert, spricht man von Eigenleitung oder einem intrinsischen Halbleiter.

4.2 Dotierung

Die Leitfähigkeit von Halbleitern lässt sich durch gezieltes Einbringen von Fremdatomen ins Kristallgitter in weiten Bereichen steuern. Dieser Vorgang wird Dotierung genannt. Wird Silizium als Halbleitergrundmaterial verwendet, werden hauptsächlich Atome aus der dritten oder fünften Hauptgruppe in den Kristall eingebracht. Wird die Leitfähigkeit eines Halbleiters durch die Dotierung dominiert, spricht man von einem extrinsischen Halbleiter.

Ersetzt ein fünfwertiges Element ein vierwertiges Siliziumatom im Kristallgitter, steht ein zusätzliches Elektron für Bindungen zur Verfügung. Das eingebrachte Atom wird daher

Donator genannt. Das zusätzliche Elektron wird nicht für die Bindung der Atome untereinander benötigt und kann sich im Kristall von einem Atom zum nächsten bewegen, da es nur schwach an das Donatoratom gebunden ist. Am Ort des Donatoratoms bleibt eine ortsfeste positive Raumladung zurück, die durch die negative Ladung des beweglichen Elektrons ausgeglichen wird. Aufgrund der negativen Ladung der frei beweglichen Ladungsträger spricht man von n-Dotierung. Durch das Einbringen des Donatoratoms ist ein zusätzliches Energieniveau entstanden, welches dicht unterhalb der Unterkante des Leitungsbands innerhalb der Bandlücke liegt. Elektronen können sehr leicht thermisch aus dem Donatorniveau ins Leitungsband angehoben werden. Die Konzentration der Donatoren N_D ist üblicherweise deutlich höher als die intrinsische Elektronenkonzentration n_i . Die Elektronendichte n in n-dotiertem Silizium ist deshalb gleich der Donatorkonzentration $n = N_D$ [Kit06].

Wird ein dreiwertiges Atom in das Kristallgitter eingebracht, fehlt am Ort des Akzeptoratoms ein Elektron, um die Bindungen zu den benachbarten Siliziumatomen aufzubauen. Dieses fehlende Elektron wird als Loch bezeichnet. Das eingebrachte Atom wird Akzeptor genannt. Ein Elektron kann thermisch aus einer benachbarten Bindung ausgelöst werden und das Loch auffüllen. Es hinterlässt dabei ein neues Loch. An der Stelle des Akzeptoratoms ist eine ortsfeste negative Raumladung entstanden, die durch das positiv geladene, freibewegliche Loch ausgeglichen wird. Man spricht deshalb von p-Dotierung. Auch hier ist ein zusätzliches Energieniveau innerhalb der Bandlücke entstanden, welches dicht oberhalb des Valenzbandes liegt. Elektronen können leicht thermisch aus dem Valenzband in das Akzeptorniveau angehoben werden. Dabei bleibt ein frei bewegliches Loch im Valenzband zurück.

Durch die Dotierung kann die Konzentration einer Ladungsträgersorte dominieren. Diese Ladungsträger werden Majoritätsladungsträger genannt. Bei n-Dotierung sind dies die Elektronen, bei p-Dotierung die Löcher. Die jeweils andere Ladungsträgersorte wird Minoritätsladungsträger genannt.

4.3 pn-Übergang

Bringt man einen n-dotierten und einen p-dotierten Halbleiter in Kontakt, spricht man von einem pn-Übergang. Der Konzentrationsgradient der freien Ladungsträger führt dazu, dass die Ladungsträger ins jeweils andere Gebiet diffundieren und mit den dort vorhandenen freien Ladungsträgern des entgegengesetzten Typs rekombinieren. Auf diese Weise bildet sich ein Gebiet aus, in dem nur noch die ortsfesten Raumladungen vorhanden sind. Diese sind im n-Gebiet positiv geladen, im p-Gebiet negativ. Es bildet sich ein elektrisches Feld aus, das der Diffusion der Ladungsträger entgegenwirkt und im stationären Zustand vollständig kompensiert. Die so entstehende Diffusionsspannung zwischen p-Gebiet und n-Gebiet liegt bei Silizium zwischen 0,6V und 0,7V. Es entsteht eine Raumladungszone, die frei von beweglichen Ladungsträgern ist.

Durch den Kontakt und die damit verbundene Diffusion der Ladungsträger gleicht sich das Fermi-Niveau in beiden Teilen des Kristalls an. Im Bereich der Grenzschicht krümmen

sich Valenzband und Leitungsband. Diese Krümmung stellt für die Majoritätsladungsträger eine Potenzialbarriere dar, die überwunden werden muss, um ins jeweils andere Gebiet zu gelangen.

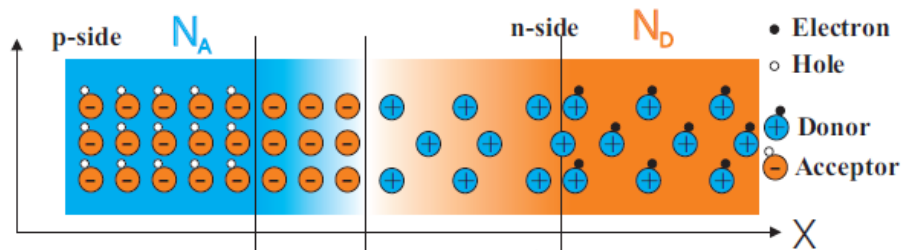


Abbildung 4.4: Donator- und Akzeptorverteilung in einem pn-Übergang [Fur06].

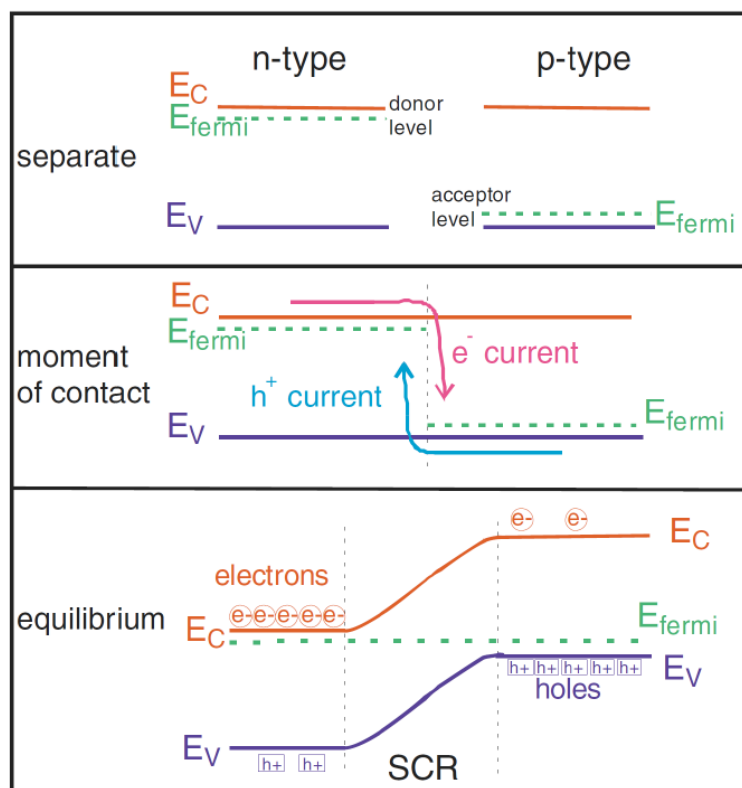


Abbildung 4.5: Bandstruktur eines pn-Übergangs [Har09]

Abbildung 4.4 zeigt schematisch die Rekombination der Ladungsträger. Abbildung 4.5 zeigt den dazugehörigen Bandverlauf vor und nach dem Kontakt.

Eine von außen angelegte Spannung kann das elektrische Feld innerhalb der Raumladungszone je nach Polung kompensieren oder verstärken. Wird das p-Material positiv, das n-

Material negativ aufgeladen, fließen die Majoritätsladungsträger in die Raumladungszone und rekombinieren dort. Dabei wird die Raumladungszone kleiner. Ist die angelegte Spannung größer als die Diffusionsspannung, wird die Raumladungszone komplett abgebaut und der pn-Übergang wird leitend. Es fließt ein großer elektrischer Strom.

Wird das p-Material negativ und das n-Material positiv geladen, verstärkt die angelegte Spannung das durch die Raumladungen entstandene elektrische Feld. Die Majoritätsladungsträger werden von der Raumladungszone weggezogen und die Raumladungszone dehnt sich aus. Es fließt nur ein geringer elektrischer Strom.

Die Spannung V_{fd} , bei der sich die Raumladungszone über das ganze Volumen der Diode erstreckt, nennt man Depletionsspannung¹. Sie ist abhängig von der effektiven Dotierkonzentration $N_{eff} = N_D - N_A$ und der Dicke D der Diode [Har09]:

$$V_{fd} = \frac{q_{el}}{2\epsilon\epsilon_0} |N_{eff}| D^2 \quad (4.1)$$

4.4 Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie

Geladene Teilchen, die einen Halbleiterdetektor durchfliegen, wechselwirken mit dem Detektormaterial und geben dabei Energie an das Material ab. Hauptsächlich geschieht dies durch elektromagnetische Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen. Die Atome im Material werden dabei angeregt oder ionisiert. In einem Halbleiterdetektor, der im Wesentlichen ein vollständig verarmter pn-Übergang ist, werden durch Ionisation Elektron-Loch-Paare erzeugt, welche von der Ausleseelektronik nachgewiesen werden. Die Bethe-Bloch-Gleichung 4.2 beschreibt den Energieverlust dE eines geladenen Teilchens durch Ionisation:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{nz^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} - \beta^2 \right] \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (4.2)$$

Hierbei bedeuten ze die Ladung des Teilchens, v seine Geschwindigkeit, n die Elektrodichte im Medium und $I = 16eV \cdot Z^{0.9}$ das mittlere Anregungspotential der Atome². Der Energieverlust hängt also von der Geschwindigkeit und Ladung des Teilchens ab, nicht aber von seiner Masse [PRSZ09]. Den niedrigsten Energieverlust in Silizium haben Elektronen mit einer kinetischen Energie von 1,5 MeV. Sie werden daher *minimal ionisierende Teilchen* (MIP³) genannt.

Um in Silizium ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen, müssen im Mittel 3,6 eV deponiert werden. Ein minimal ionisierendes Teilchen erfährt in Silizium einen durchschnittlichen

¹engl.: depletion = Verarmung

²Gültig für $Z > 1$

³MIP = minimal ionizing particle

Energieverlust von $390 \frac{eV}{\mu m}$, es erzeugt entlang seiner Flugbahn somit 108 Elektron-Loch-Paare pro μm [Har09]. In dieser Diplomarbeit werden Sensoren mit einer Dicke von $500 \mu m$ untersucht, in denen ein minimal ionisierendes Teilchen bei senkrechtem Durchtritt durch den Sensor ungefähr 54000 Elektron-Loch-Paare erzeugt.

4.5 Streifensensor

Ein Streifensensor beruht auf dem Prinzip eines in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergangs. Abbildung 4.6 zeigt den Aufbau eines Streifensensors, wie er im Spurdetektor des CMS-Experiments zum Einsatz kommt.

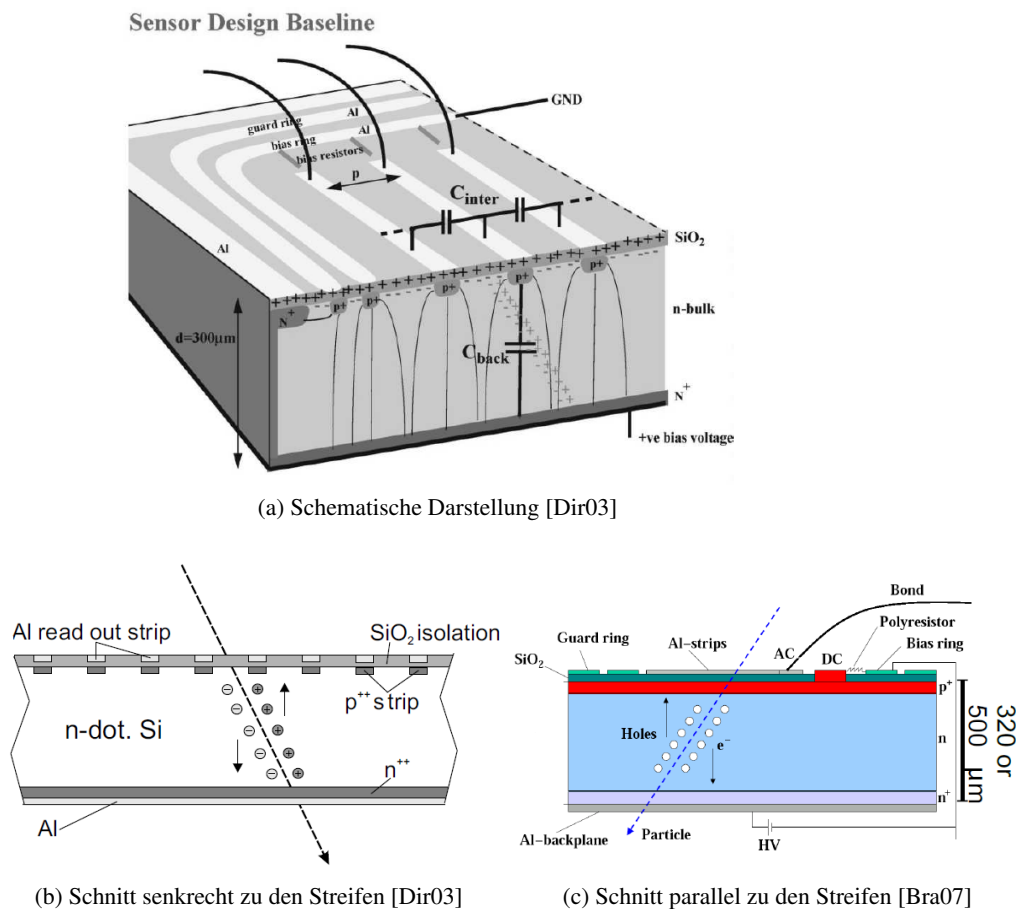


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau eines Silizium-Streifensensors

In ein n-dotiertes Silizium-Grundmaterial⁴ sind p^+ -Streifen implantiert. Über den implantierten Streifen befinden sich Aluminiumstreifen, über die das Signal von einem Ladungs-

⁴Bulk

verstärker kapazitiv ausgelesen wird. Die Aluminiumstreifen sind durch eine dünne Schicht SiO_2 von den p^+ -Streifen getrennt. Die Rückseite des Sensors ist stark n-dotiert, um einen guten Kontakt zur Rückseitenelektrode zu erhalten. Die Sensorrückseite wird während des Betriebs mit der Hochspannung verbunden. Die p^+ -Streifen sind über Widerstände aus polykristallinem Silizium mit dem Bias-Ring verbunden. Der Bias-Ring liegt während des Sensorbetriebs auf Masse-Potenzial, so dass die p^+ -Streifen zusammen mit dem Grundmaterial einen gesperrten pn-Übergang bilden. Um den Bias-Ring verläuft ein weiterer Aluminiumring, der sogenannte Guardring. Er dient der Feldformung am Rande, um die dort befindlichen Streifen in die gleiche Feldkonfiguration zu hüllen wie die inneren [Fre04].

Die durch einen Teilchendurchgang erzeugten Ladungsträgerpaare rekombinieren mit den im Material in großer Zahl vorhandenen freien Ladungsträgern, wenn diese nicht vorher durch eine Sperrspannung aus dem Material abgezogen worden sind. Die minimale Spannung, bei der im kompletten Sensorvolumen keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind und sich die Raumladungszone über den gesamten Sensor erstreckt, ist die durch Gleichung 4.1 gegebene Depletionsspannung. Durch das elektrische Feld innerhalb der Raumladungszone werden die erzeugten Ladungsträgerpaare getrennt und zur Unter- und Oberseite abgezogen, wo sie von der Ausleseelektronik detektiert werden können.

4.6 Strahlenschäden

In modernen Hochenergieexperimenten sind die Halbleiterdetektoren starken Flüssen von Teilchenstrahlung ausgesetzt. Deren Wechselwirkung mit dem Sensormaterial führt zu Defekten in der Kristallstruktur, die sich negativ auf die Eigenschaften des Detektors auswirken. Für diese Diplomarbeit sind insbesondere die Erhöhung des Leckstroms und die Typ-Inversion relevant. Der Anstieg des Leckstroms macht eine Kühlung des untersuchten Moduls notwendig. Durch die Typ-Inversion bildet sich die Raumladungszone von der Sensorrückseite her. Dies bedeutet, dass das Material vollständig verarmt werden muss. Nur dann können Signale aus dem Sensor ausgelesen werden, da nur dann die Raumladungszone die Auslestreifen erreicht. Des Weiteren führt die Bestrahlung zu einem Anstieg der Depletionsspannung, wodurch für die vollständige Verarmung des Sensorvolumens eine immer höhere Spannung an die Sensorrückseite angelegt werden muss.

4.6.1 Leckstrom

Defekte in der Kristallstruktur können zusätzliche Energieniveaus innerhalb der Bandlücke erzeugen. Liegen diese Energieniveaus ungefähr in der Mitte der Bandlücke, können sie Elektronen aus dem Valenzband einfangen und ins Leitungsband emittieren. Dieser Vorgang existiert ebenso für Löcher aus dem Leitungsband, die ins Valenzband emittiert werden können. Dies führt zu einem erhöhten Leckstrom. Ein höherer Leckstrom führt dazu, dass mehr Leistung über dem Modul abfällt und damit zu einer Erwärmung des Materials. Wird die zusätzliche Verlustwärme nicht abgeführt, kann der Strom immer weiter ansteigen,

da er exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Man spricht deshalb von einem *thermal runaway*.

4.6.2 Typ-Inversion

Geladene Defekte tragen genau wie absichtlich eingebrachte Dotieratome zur effektiven Ladungsträgerkonzentration bei. Sie wirken entweder wie zusätzliche Donatoren oder wie zusätzliche Akzeptoren. Da hierbei die akzeptorartigen Defekte überwiegen, nimmt die effektive Dotierkonzentration des n-dotierten Grundmaterials zunächst ab, bis die ursprünglich vorhandene Dotierung ausgeglichen ist. Eine weitere Zunahme der Defekte hat eine effektive p-Dotierung zur Folge. Ein n-dotierter Halbleiter wird somit in einen p-dotierten Halbleiter umgewandelt, was man als Typinversion bezeichnet [Fre04].

Nach Gleichung 4.1 hängt die Depletionsspannung direkt vom Betrag der effektiven Dotierkonzentration ab. Durch die Bestrahlung nimmt die Depletionsspannung zunächst ab, um nach der Typinversion wieder anzusteigen. Der Detektor kann trotz der Typinversion noch betrieben werden. Die Verarmungszone bildet sich dann jedoch von der Sensorrückseite her. Deshalb ist es nötig, den Sensor vollständig zu verarmen, um das Signal auslesen zu können [BDF⁺07].

Abbildung 4.7 zeigt den Verlauf der Depletionsspannung und der effektiven Ladungsträgerdichte in Abhängigkeit von der Bestrahlungsfluenz⁵.

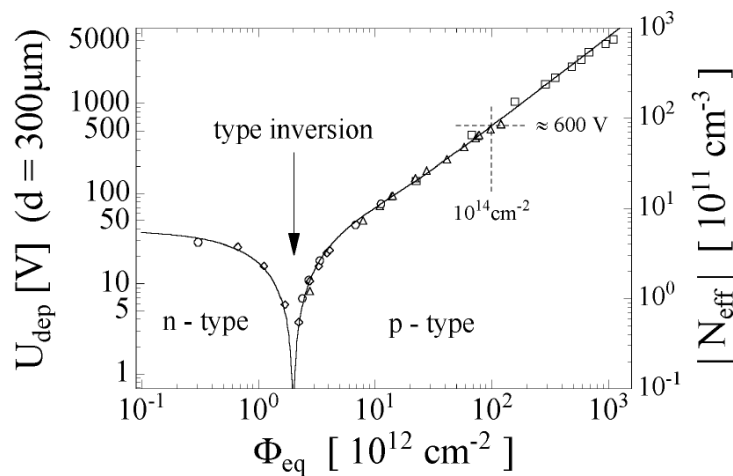


Abbildung 4.7: Änderung der Depletionsspannung bzw. der effektiven Dotierkonzentration in Abhängigkeit der Fluenz [Mol99]

⁵Die Strahlenbelastung wird in n_{eq}/cm^2 angegeben. Diese Einheit entspricht der äquivalenten Strahlenschädigung durch Neutronen einer Energie von 1 MeV [Neu09].

Nach der geplanten Betriebsdauer des CMS-Spurdetektors von 10 Jahren wird der Anstieg des Leckstroms und der Depletionsspannung soweit fortgeschritten sein, dass die Schädigung der Detektormodule zu einer nicht mehr tolerierbaren Minderung der Leistungsfähigkeit des Detektors führt [Lin03].

5 Das Teleskop

Zur Untersuchung der Ortsauflösung von Streifensensoren verwendet man ein *Teleskop*. In einem Teleskop sind Referenzsensoren bekannter Qualität so hintereinander angeordnet, dass damit Teilchenspuren rekonstruiert werden können. Zwischen die Referenzmodule kann ein zu untersuchendes Modul eingebracht werden. Für die Synchronisation der Datenerfassung mit dem Durchgang von kosmischen Teilchen durch das Teleskop sorgt ein Auslösesystem. Um die Umgebungstemperatur variieren zu können, ist die hier betrachtete Anordnung in einem Kühltank montiert worden. Das zu testende Modul wird zusätzlich auf einer Peltier-Kühlvorrichtung montiert um die Verlustwärme abzuführen.

Die Anordnung der Detektormodule ist schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt. Modul 1 und Modul 5 sind gegen die anderen um 90° in der Sensorebene gedreht. Auf diese Weise kann eine dreidimensionale Teilchenspur rekonstruiert werden. Sensor 3 ist das Modul, dass mit dem Teleskop untersucht werden soll.

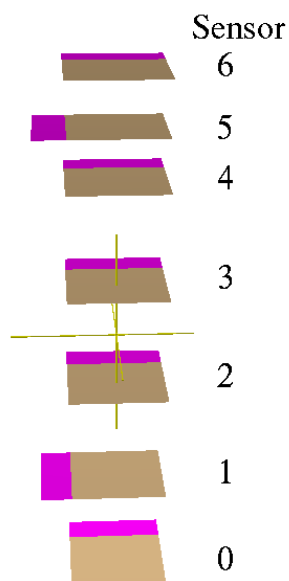


Abbildung 5.1: Grundlegender Aufbau des Teleskops

Im folgenden Abschnitt werden die für den Aufbau verwendeten Komponenten eingehend beschrieben.

5.1 CMS Streifensensor

Die für den Aufbau des Teleskops verwendeten Silizium-Streifensensoren und Datenerfassungskomponenten sind in weiten Teilen mit Prototypen des CMS-Spurdetektors identisch. Die CMS Spurdetektorauslese besteht im Wesentlichen aus zwei großen Komponenten. Die unidirektionale Auslekette überträgt die aufgenommenen Daten aus dem Detektor in den Kontrollraum. Die bidirektionale Kontrollkette überträgt die Takt- und Triggersignale zu den einzelnen Detektoren und tauscht Kontrollinformationen, wie Konfigurationsdaten und Temperaturmesswerte, zwischen dem Kontrollraum und den Detektormodulen aus [Fri01].

5.1.1 Modul

Um die Streifensensoren verwenden zu können, werden sie zu einem Modul verbaut. Der Halbleitersensor ist zusammen mit der für den Betrieb benötigten Ausleseelektronik auf einen Kohlefaserrahmen geklebt. Abbildung 5.2 zeigt ein Modul, wie es im äußeren Barrel-Bereich des CMS Spurdetektors eingesetzt wird.

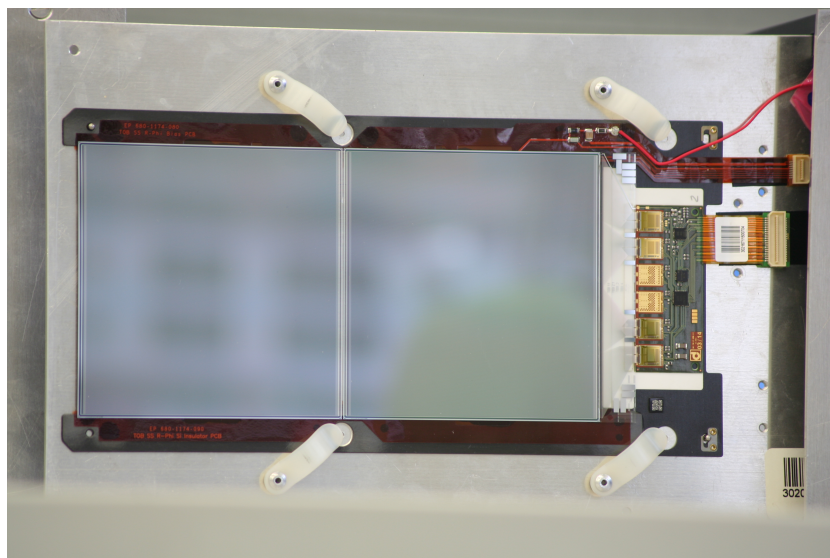


Abbildung 5.2: TOB Modul mit 512 Streifen

5.1.2 Hybrid-Platine

Die auf dem Modul vorhandene Platine enthält die Auslesechips (APV25¹) und die Chips für die Steuerung der Module. Dies sind im Einzelnen ein Multiplexer (APVMUX), ein

¹APV = Analoge Pipeline Voltage, 25 steht für einen 0,25 μm Fertigungsprozess

PLL-Chip der die Verzögerung zum Taktsignal einstellt und die Detector Control Unit (DCU). Die DCU hat 8 analoge Eingänge und liest darüber Temperaturen, Sensorleckstrom und Versorgungsspannung aus. Da der Streifenabstand der Sensoren nicht mit dem Abstand der Eingangspads auf den Auslesechips übereinstimmt, ist zur Anpassung ein Pitch-Adapter zwischen Sensor und Hybridplatine montiert. Abbildung 5.3 zeigt eine Hybridplatine eines Moduls mit 512 Streifen.

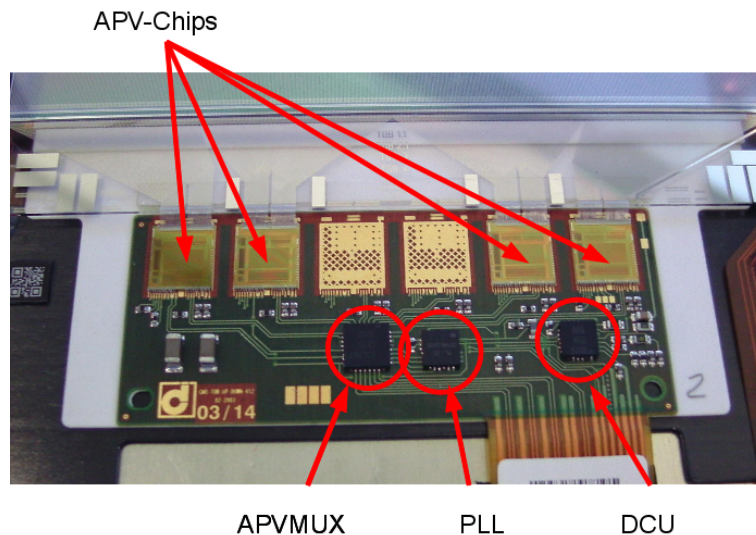


Abbildung 5.3: Hybrid-Platine

APV25

Das Auslesen der Streifen erfolgt durch APV25-Chips. Jeder APV-Chip liest parallel 128 Streifen aus, verstärkt deren Signale und speichert diese analog zwischen [Dir03].

Abbildung 5.4 zeigt die Verarbeitungskette eines APV-Kanals.

Das ausgelesene Signal wird von einem integrierenden Ladungsvorverstärker in ein Spannungssignal umgewandelt. Über einen zuschaltbaren Inverter gelangt das Signal zu einem CR-RC-Pulsformer mit einer Peaking-Zeit von 50 ns. Der Ausgang des Pulsformers wird mit einer Frequenz von 40 MHz² abgetastet und in einer Pipeline zwischengespeichert. Tritt eine Triggerbedingung auf, werden die Signale aus der Pipeline ausgelesen.

Im Peak-Modus wird der Wert einer einzelnen Speicherstelle ausgegeben. Mit einer Peaking-Zeit von 50 ns ist der APV25 jedoch nicht schnell genug, um eine ausreichende zeitliche Trennung der Ereignisse am LHC zu erreichen, da die Kollision der Protonenpakete im Wechselwirkungspunkt von CMS im Abstand von 25 ns auftreten. Eine eindeutige Zuordnung der Teilchenspuren zu einer Kollision wäre nicht möglich. Deshalb wird

²dies entspricht der Rate der Kollisionen am LHC

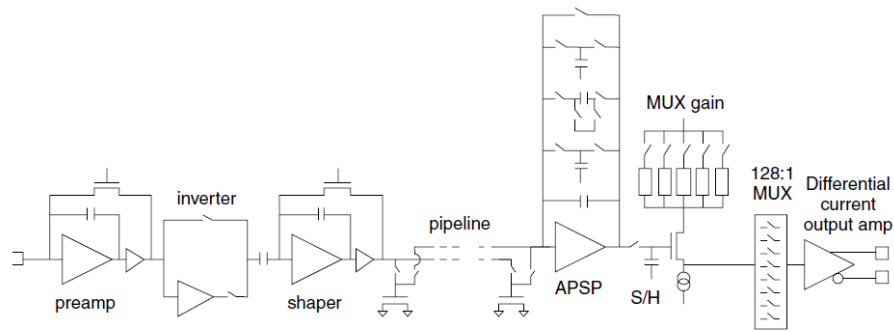


Abbildung 5.4: Verarbeitungskette eines APV-Kanals [Fri01]

im Deconvolution-Modus durch den APSP³ mit den Signalen aus drei Pipeline-Zellen eine Entfaltung durchgeführt. Abbildung 5.5 zeigt das Ausgangssignal im Peak- und im Deconvolution-Modus. Der Deconvolution-Modus ist die Standard Betriebsart im LHC Betrieb [Blo07].

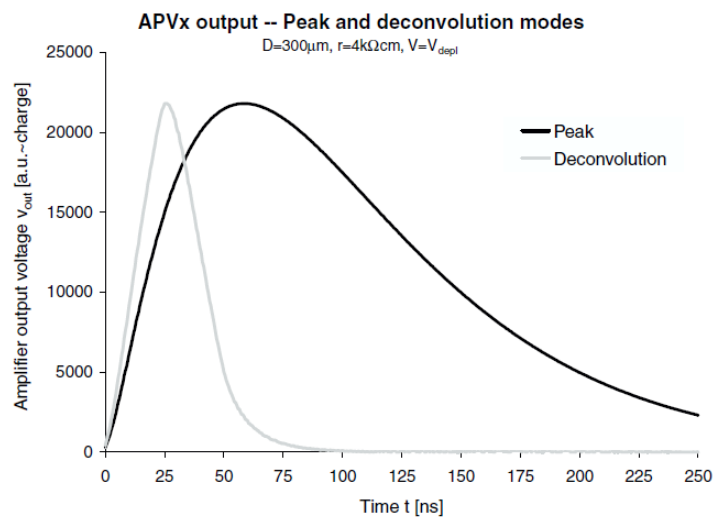


Abbildung 5.5: APV-Ausgangssignal im Peak- und Deconvolution-Modus [Fri01]

Nach der Pulsformung folgt eine Sample-and-Hold Stufe⁴ und ein Verstärker mit stufenweise einstellbarer Verstärkung. Am Ende der Kette steht ein 128:1 Multiplexer, der die Signale aller 128 Kanäle auf eine einzige Ausgangsleitung führt [Fri01].

³APSP = Analog Pulse Shape Processor = Analoger Pulsformer

⁴Sample-and-Hold = Abtast-Halte-Glied

5.1.3 Analog-Opto-Hybrid

Durch den APVMUX werden die Ausgangssignale von jeweils 2 APV-Chips, also die Signale von insgesamt 256 Streifen, über eine optische Verbindung aus dem Detektorvolumen geführt. Die Platine, die die Lasertreiber trägt, wird Analog-Opto-Hybrid (AOH) genannt. Es gibt im äußeren Barrel des CMS-Streifendetektors zwei Sorten von AOHs. AOHs mit zwei Lasertreibern übertragen die Signale von Modulen mit 512 Streifen, AOHs mit 3 Lasertreibern übertragen die Signale von Modulen mit 768 Streifen. Abbildung 5.6 zeigt eine AOH-Platine. Im Teleskopaufbau werden insgesamt 7 AOHs mit jeweils 3 Lasertreibern verwendet.

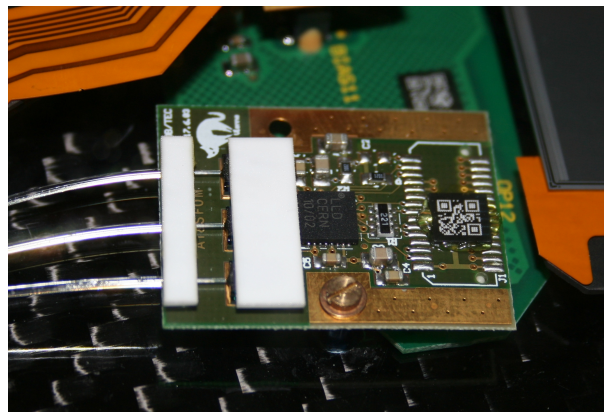


Abbildung 5.6: Analog-Opto-Hybrid

5.1.4 Front-End-Driver

Die Digitalisierung der Signale erfolgt durch den Front-End-Driver (FED). Dieser tastet die Signale der 256 Kanäle pro optischer Faser zum richtigen Zeitpunkt ab und speichert die digitalisierten Daten.

Für den Teleskopaufbau werden 3 FEDs (PCI-Steckkarten) mit jeweils 8 elektrischen Eingangskanälen verwendet. Dies macht eine Wandlung der optischen Signale in elektrische Signale nötig. Im CMS-Experiment kommen hingegen FEDs mit optischem Eingang zum Einsatz, die eine vorige Wandlung der optischen Signale überflüssig machen.

5.1.5 Front-End-Controller

Die Konfiguration der Module erfolgt durch den Front-End-Controller (FEC). Diese PCI-Steckkarte ist über den Kontrollring, einen redundanten Ring-Bus, mit den Communication

& Control Units (CCU) verbunden. In jedem Rod⁵ ist eine CCU vorhanden, die die Steuerbefehle des FEC dekodiert und an die Komponenten innerhalb eines Rods weiterreicht. Die Kommunikation zwischen der CCU und den einzelnen Komponenten des Rods erfolgt über das I^2C -Protokoll.

5.1.6 Trigger-Sequencer-Card

Die Trigger-Sequencer-Card (TSC) erzeugt einen 40 MHz-Takt für die Synchronisation der Module und der Auslesekomponenten. Sie reicht außerdem die Auslöseentscheidungen an die Module und die Auslekette weiter. Auslöseentscheidungen werden von der TSC durch das Auslassen eines Taktimpulses kodiert.

5.2 Triggersystem

Als Auslösesystem werden zwei Szintillatoren verwendet. Ein Szintillator befindet sich über der Teleskopanordnung, der andere ist unterhalb der Anordnung angebracht. Der Abstand zwischen beiden Szintillatoren beträgt ungefähr 30 cm. Die aktive Fläche eines Szintillators ist $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Geladene Teilchen regen beim Durchgang durch das Szintillatormaterial die Atome im Material in einen energetisch höheren Zustand an. Beim anschließenden Übergang in den nicht angeregten Zustand entsteht ein kurzer Lichtblitz, der von der Elektronik erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Abbildung 5.7 zeigt die Verarbeitungskette, die die Szintillatorsignale durchlaufen. Nach einer Pegelanpassung werden die Signale von einem Diskriminator ausgewertet. Überschreitet das analoge Eingangssignal eine einstellbare Schwelle, erzeugt er einen digitalen Ausgangsimpuls definierter Länge. Eine Koinzidenzeinheit vergleicht die zeitliche Lage der beiden Impulse zueinander. Treffen beide Impulse innerhalb eines kurzen Zeitfensters ein, erzeugt die Koinzidenzeinheit einen Auslöseimpuls der über die Trigger-Sequencer-Card das Auslesen der Sensoren startet.

Die Rate, mit der die Koinzidenz durch kosmische Teilchen auftritt, beträgt bei dieser Anordnung der Szintillatoren ungefähr 0,4 Hz. Die tatsächliche Track-Rate ist niedriger, da die aktive Fläche der Szintillatoren mit 225 cm^2 deutlich größer ist, als die aktive Fläche der Module mit 90 cm^2 . Deshalb kann es vorkommen, dass Teilchen von den Szintillatoren erfasst werden, die die Module nicht durchfliegen. Außerdem können zufällige Koinzidenzen nicht ausgeschlossen werden. Abhängig von den Bedingungen, die an die Teilchenspuren gestellt werden, werden zwischen 10% und 25% der aufgenommenen Ereignisse für die Analyse verwendet.

⁵Rods sind aus Kohlefaser gefertigte Haltevorrichtungen für Module. Sie sind die mechanischen Untereinheiten im äußeren zylindrischen Bereich des CMS Spurdetektors. Sie enthalten darüber hinaus die Bus-Verbindung zwischen den einzelnen Modulen und die Lasertreiber für die optische Übertragung der Daten zum Datenerfassungssystem. Ein Rod kann sechs oder zwölf Module aufnehmen und versorgen.

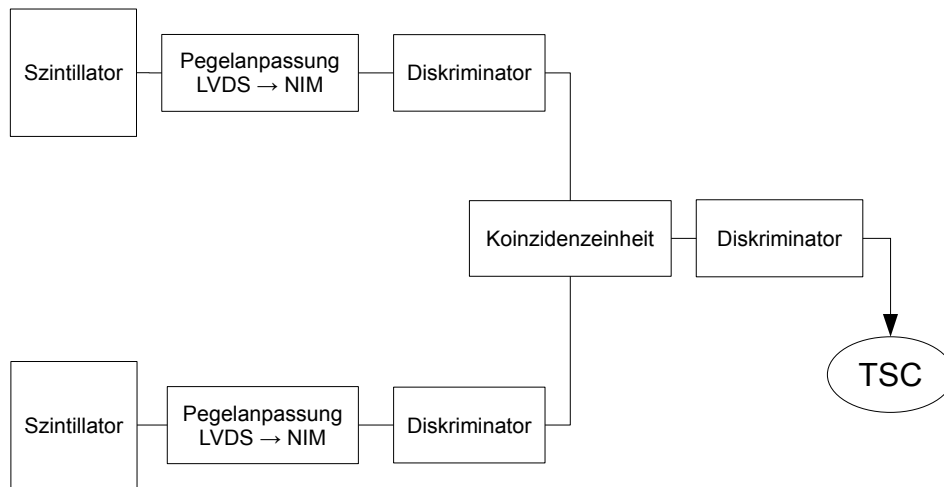


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung des Auslösesystems

5.3 Slow-Control

Zur Steuerung und Überwachung der Umgebungsbedingungen im Kühltank wird ein Slow-Control⁶-System [Mil] und Interlock⁷-System verwendet. Es besteht aus einem Hardwareteil, der die Türsensoren überwacht und die Spannungsversorgung des Kühltanks, der Kühlanlage, der Peltierelemente und des Hochspannungsnetzteils schaltet. Tritt eine der folgenden Bedingungen ein, wird der Kühlvorgang abgebrochen, der Kühltank auf Raumtemperatur erwärmt sowie die Spannungsversorgung der Peltierelemente sowie das Hochspannungsnetzteil deaktiviert:

- Öffnen der Kühltanktür
- Panic-Taste wird betätigt
- Kühlanlage meldet Fehler
- Ausbleiben des alive-Signals von der SlowControl Software

⁶Steuerung und Überwachung von Umgebungsparametern, die sich nur langsam ändern

⁷dt.: Verriegelung

Die Hardware-Verriegelung wird durch ein Labview-Programm um folgende Funktionen ergänzt:

- Auslesen der Temperatursensoren im Kühlschrank
- Auslesen der Luftfeuchtesensoren im Kühlschrank
- Setzen der Kühlschranktemperatur
- Setzen der Kühlmitteltemperatur
- Temperaturregelung der Kühlvorrichtung
- Ansteuerung des Hochspannungsnetzteils / Kopplung mit Datenerfassung

Abbildung 5.8 zeigt die Oberfläche der neu in die SlowControl integrierten Temperaturregelung für die Peltierkühlung.

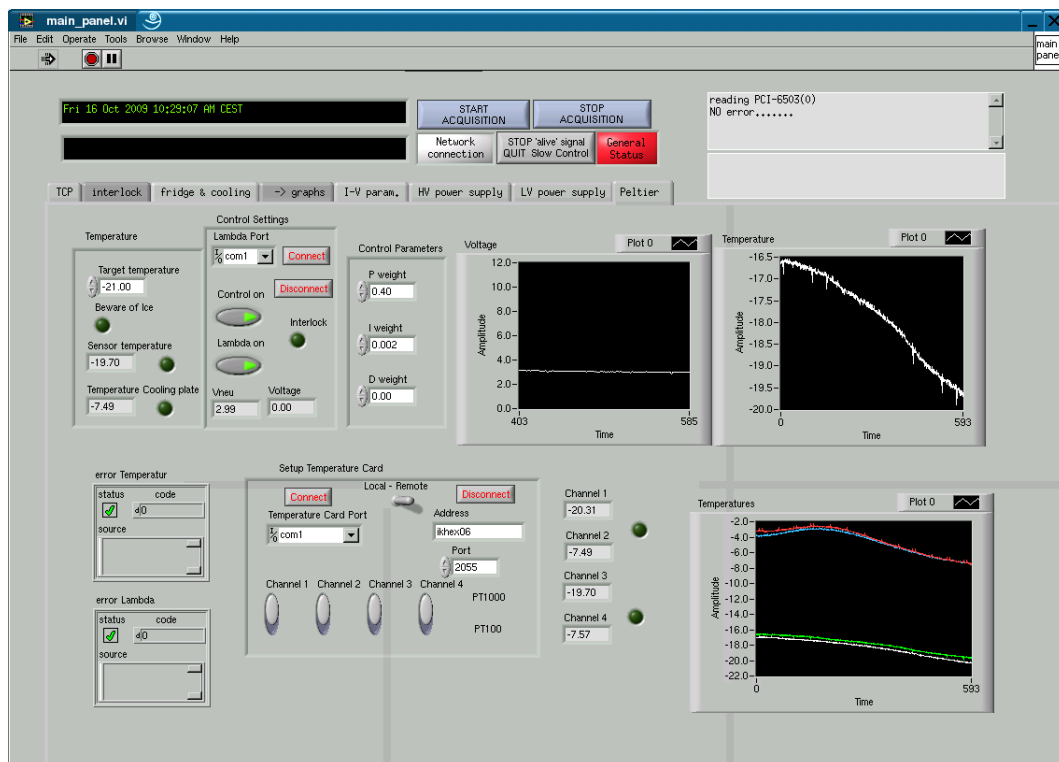


Abbildung 5.8: Oberfläche der Temperaturregelung der Peltierkühlung

In [Sus09] ist eine Kopplung zwischen dem Datenerfassungssystem, und dem Hochspannungsnetzteil entwickelt worden. Mit dieser Kopplung ist es möglich, nach einer bestimmten Anzahl an aufgenommenen Ereignissen, die Hochspannung eines oder mehrerer Module schrittweise zu verändern. Diese Kopplung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in die SlowControl Software integriert.

Zur Auswertung der auf diese Weise gewonnenen Daten wurde ein ROOT-Skript entwickelt, welches zunächst die eingestellten Spannungsschritte aus der Datendatei extrahiert und anschließend für die Ereignisse jedes Spannungsschritts getrennt die Clustereigenschaften bestimmt. Hierzu wird die AC1-Analyse verwendet, eine Sammlung aus ROOT-Skripten zur Analyse von Daten aus dem äußeren CMS-Tracker (TOB und TEC⁸) [Bra].

Durch die Softwarearchitektur der SlowControl ist es möglich, Geräte verschiedener Hersteller über unterschiedliche Schnittstellen und Protokolle anzusteuern. Dies wird durch eine einheitliche Softwareschnittstelle zwischen der SlowControl und dem verwendeten LabView-Gerätetreiber erreicht.

Die SlowControl enthält in der Version, die von [Mil] bezogen werden kann, keinen Treiber für das im Teleskopaufbau verwendete Hochspannungsnetzgerät der Firma ISEG. Deshalb wurde ein Treiber zur Ansteuerung des Netzgerätes über die RS232-Schnittstelle entwickelt.

5.4 Voruntersuchungen zum Aufbau des Teleskops

Für den Teleskopaufbau müssen grundlegende Parameter, wie zum Beispiel der Abstand der Module, festgelegt werden. Um die Auswirkungen des Modulabstands auf die zu erwartende Ortsauflösung des Teleskops abschätzen zu können, wurde eine Simulation des Teleskopaufbaus durchgeführt.

5.4.1 Simulation der Vielfachstreuung mit Geant4

Geladene kosmische Teilchen wechselwirken auf ihrem Weg durch das Teleskop mit den Molekülen der Luft und den Sensormodulen. Diese Wechselwirkungen führen zu leichten Abweichungen von einer exakt geraden Flugbahn, wie in Kapitel 3 gezeigt. Dieser Effekt führt zu einer Verschlechterung der Ortsauflösung. Um den Einfluss der Streuung auf die Ortsauflösung des Teleskops zu untersuchen, wurde eine Simulation des Teleskops mit Geant4 durchgeführt. Geant4 ist ein Simulationswerkzeug für den Durchgang von Teilchen durch Materie [gea].

In der Simulation werden mehrere Siliziumschichten von der Größe der Teleskopsensoren ($10 \times 10 \text{ cm}^2 \times 500 \text{ }\mu\text{m}$) übereinander angeordnet. Der Abstand zwischen den Modulen wird vor einem Durchlauf festgelegt. Der Aufbau wird anschließend von einer Seite mit Myonen beschossen. Die Koordinaten der Durchtrittspunkte der simulierten Teilchen durch die Sensoren werden dabei in einer Textdatei abgespeichert. Die Energieverteilung $\rho(E)$ der simulierten Teilchen entspricht dem Spektrum kosmischer Myonen, wie es durch Gleichung 3.3 gegeben ist. Abbildung 5.9 zeigt die Energieverteilung von 10000 simulierten Teilchen.

⁸TOB=Tracker Outer Barrel, TEC = Tracker EndCap

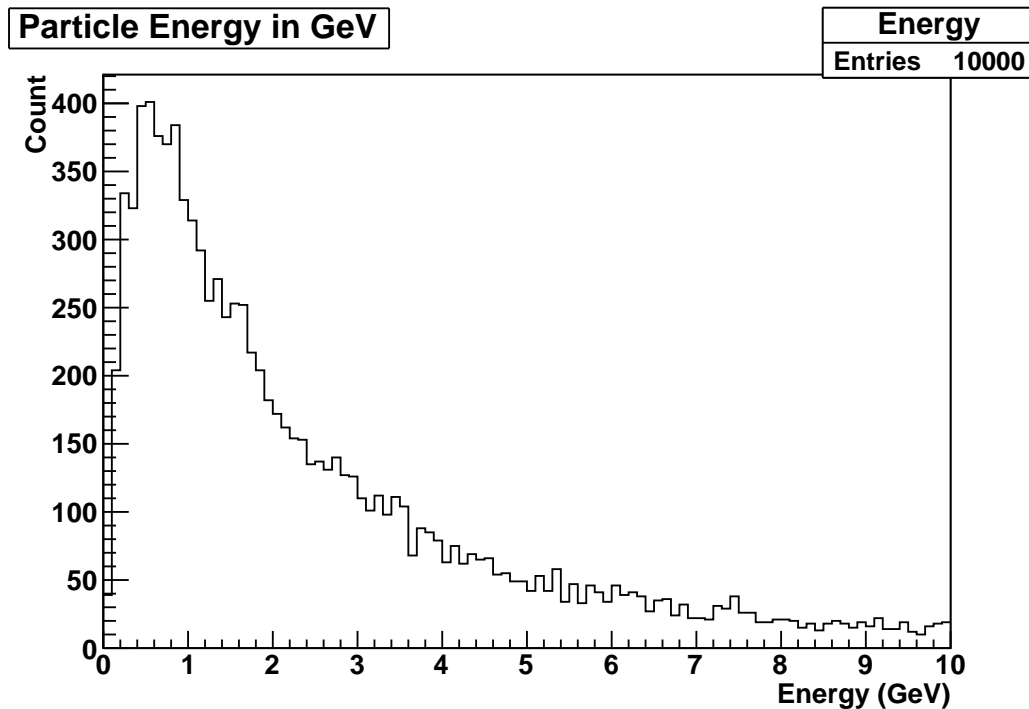


Abbildung 5.9: Energieverteilung der simulierten Myonen

Die in dieser Arbeit verwendete Analysesoftware SiBTStAR, die in Kapitel 6 näher beschrieben ist, bietet die Möglichkeit, an beliebigen Positionen auf einem Streifensensor simulierte Ladungscluster zu erzeugen. Diese simulierten Ladungsansammlungen durchlaufen dieselben Rekonstruktions- und Analyseschritte wie tatsächliche Daten. Diese sind ebenfalls in Kapitel 6 genauer beschrieben. Auf diese Weise kann einerseits die Rekonstruktion und Analyse getestet werden, andererseits können verschiedene Teleskopgeometrien und deren Einfluss auf die Ortsauflösung des Teleskops schon vor dem Aufbau simuliert werden. SiBTStAR bietet hierzu die Möglichkeit, die Daten aus der Geant4-Simulation einzulesen.

Die Abstände der Sensoren wurden schrittweise zwischen 3 cm und 25 cm verändert. Für jede Anordnung wurde die Ortsauflösung der vier nicht gedrehten Teleskopmodule mit 5000 simulierten Myonen bestimmt. Die so erhaltene Ortsauflösung der einzelnen Module für jeden Durchlauf ist in Abbildung 5.10 gegeben. Mit zunehmendem Abstand der Sensoren verschlechtert sich die Ortsauflösung. Dies ist einerseits auf die Vielfachstreuung der Myonen an den Molekülen der Luft zurückzuführen, andererseits tritt auch am Silizium der Sensoren selbst Streuung auf. Die Streuung macht sich umso stärker bemerkbar, je länger der Weg der Teilchen durch das Teleskop ist. Aus diesem Grund ist eine möglichst dichte Anordnung der Module zu bevorzugen. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Vielfachstreuung wäre es, den kompletten Teleskopaufbau im Vakuum zu betreiben. Dies ist jedoch mit den vorhandenen Komponenten nicht experimentell umzusetzen.

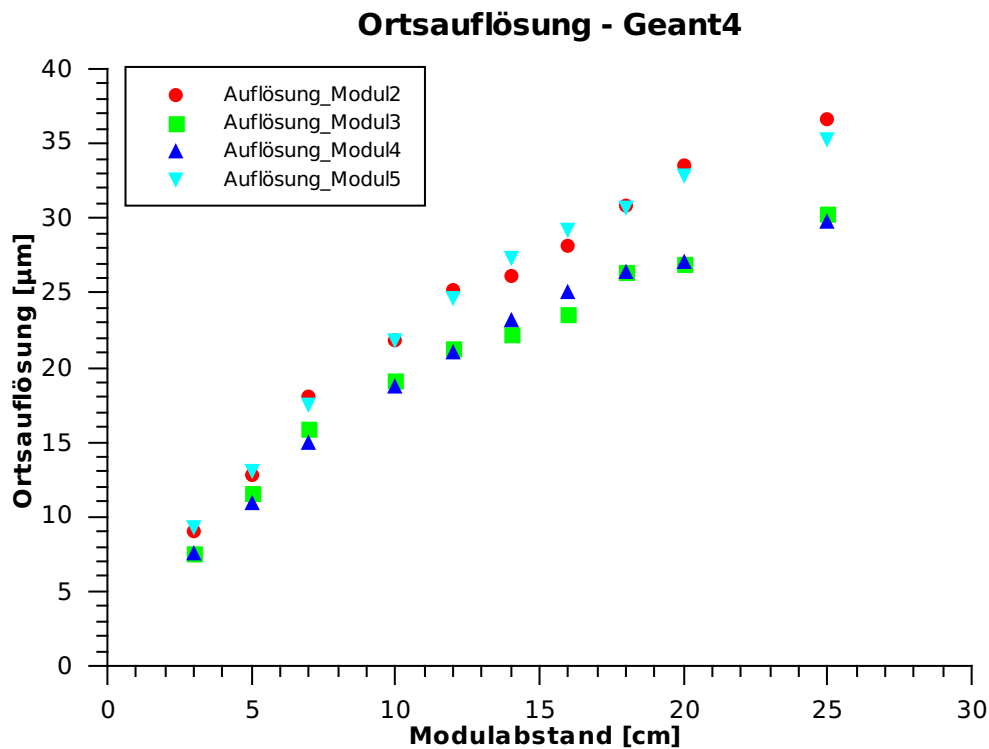
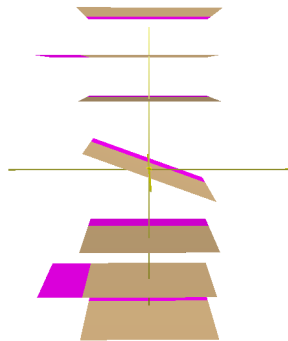


Abbildung 5.10: Ortsauflösung in Abhängigkeit des Modulabstands (Simulation)

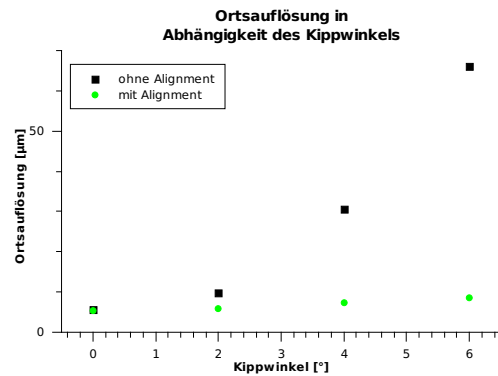
5.4.2 Untersuchungen zum Alignment

Die korrekte Ausrichtung der Module ist für das Funktionieren des Teleskops von großer Bedeutung. Durch das nachträgliche Alignment⁹ mit Teilchenspuren, wie es in Kapitel 6.4 beschrieben ist, können Fertigungstoleranzen ausgeglichen werden. Um Abschätzen zu können, in welchem Maß dies möglich ist, wurde eine Simulation des Teleskopaufbaus durchgeführt, bei der das Testmodul verdreht oder verkippt wurde. Hierbei wurde das Simulationsmodul der SiBTStAR-Software verwendet, welches im Gegensatz zur Geant4-Simulation keine Streuung der Teilchen berücksichtigt. Abbildung 5.11 zeigt die aus der Simulation erhaltene Ortsauflösung des Testmoduls bei einer Verkipfung um die x-Achse in Abhängigkeit des Winkels. Abbildung 5.12 zeigt die simulierte Ortsauflösung bei einer Verdrehung des Testmoduls um die z-Achse in Abhängigkeit des Winkels.

⁹Alignment = Ausrichtung, hier: Methode zur Bestimmung der tatsächlichen Modulausrichtung

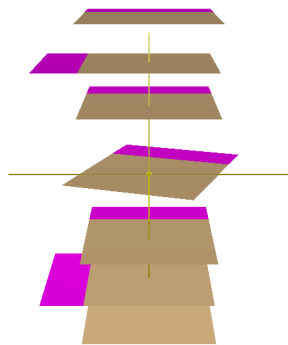


(a) Verkippung des Testmoduls

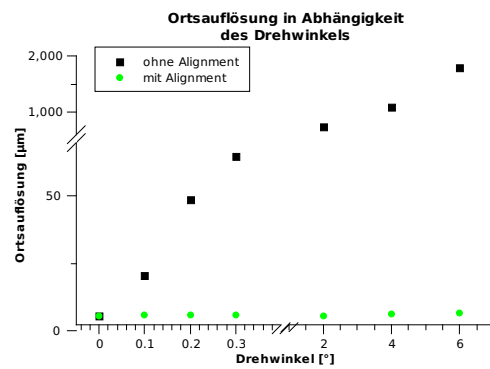


(b) Ortsauflösung

Abbildung 5.11: Ortsauflösung des Testmoduls (Simulation) in Abhängigkeit des Kippwinkels θ um die x-Achse



(a) Verdrehung des Testmoduls



(b) Ortsauflösung

Abbildung 5.12: Ortsauflösung des Testmoduls (Simulation) in Abhängigkeit des Drehwinkels φ um die z-Achse

Obwohl die Verdrehungen und Verkippungen des Moduls durch den Alignment-Algorithmus korrekt bestimmt werden, verschlechtert sich die Ortsauflösung des Testmoduls mit zunehmendem Winkel, insbesondere bei einer Verkippung. Aus diesem Grund ist eine möglichst präzise Anordnung der Referenzmodule des Teleskops und des Testmoduls anzustreben.

5.5 Das Teleskop

Das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Teleskop besteht aus 6 CMS Streifensensormodulen, die übereinander in zwei Gruppen zu je drei Sensoren angeordnet sind. Der Streifenabstand der Sensoren beträgt $122\ \mu\text{m}$, die Dicke der Sensoren beträgt $500\ \mu\text{m}$. Sie sind im Abstand von 3 cm auf einer Halterung montiert. Der jeweils mittlere Sensor einer Gruppe ist dabei um 90° in der Sensorebene gegen die beiden anderen gedreht. Auf diese Weise kann eine dreidimensionale Teilchenspurs rekonstruiert werden. Die beiden Modulgruppen sind im Abstand von 8 cm an einem Haltewinkel montiert. Zwischen die beiden Modulgruppen kann ein Testmodul mitsamt einer Kühlvorrichtung eingebacht werden. Abbildung 5.13 zeigt ein CAD¹⁰-Bild des Teleskops.

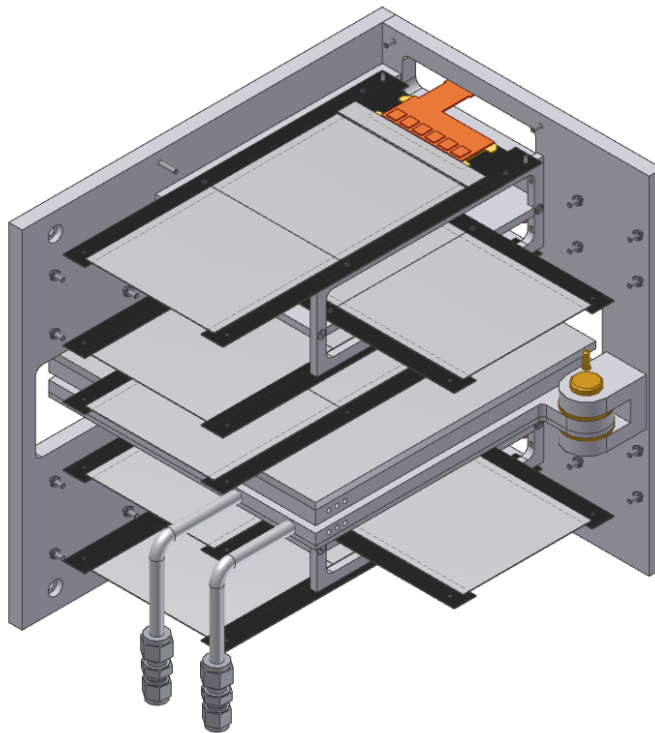


Abbildung 5.13: CAD-Bild des Teleskops

¹⁰CAD: Computer Aided Design = Rechnergestützte Konstruktion

Die für die Spannungsversorgung der Module mit Hoch- und Niederspannung benötigten elektrischen Verbindungen sowie die für die Auslese nötigen optischen Verbindungen werden durch zwei Rods bereitgestellt.

Um die Umgebungstemperatur absenken zu können, wurde die Teleskopanordnung mit- samt den beiden Rods in einem Kühltank montiert. Der Aufbau wurde bei Temperaturen zwischen $+20^{\circ}\text{C}$ und -30°C betrieben. Abbildung 5.14 zeigt den Teleskopaufbau im Kühltank, die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen den gesamten Aufbau im Reinraum des IEKP.

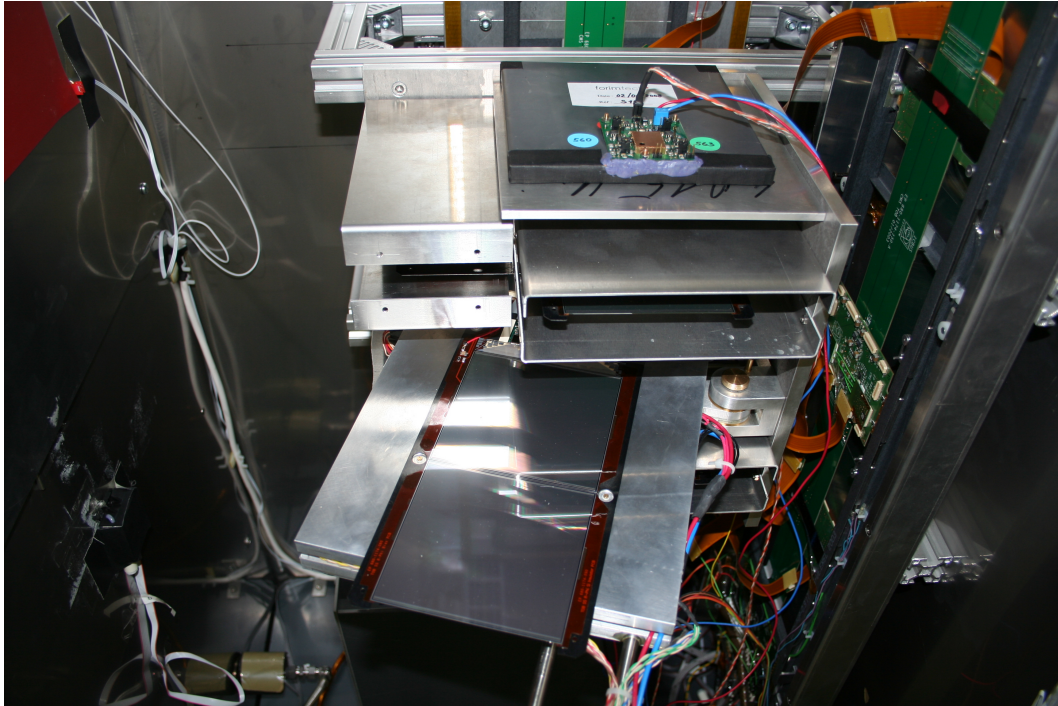


Abbildung 5.14: Teleskopaufbau im Kühltank mit ausgeschwenkter Kühlvorrichtung

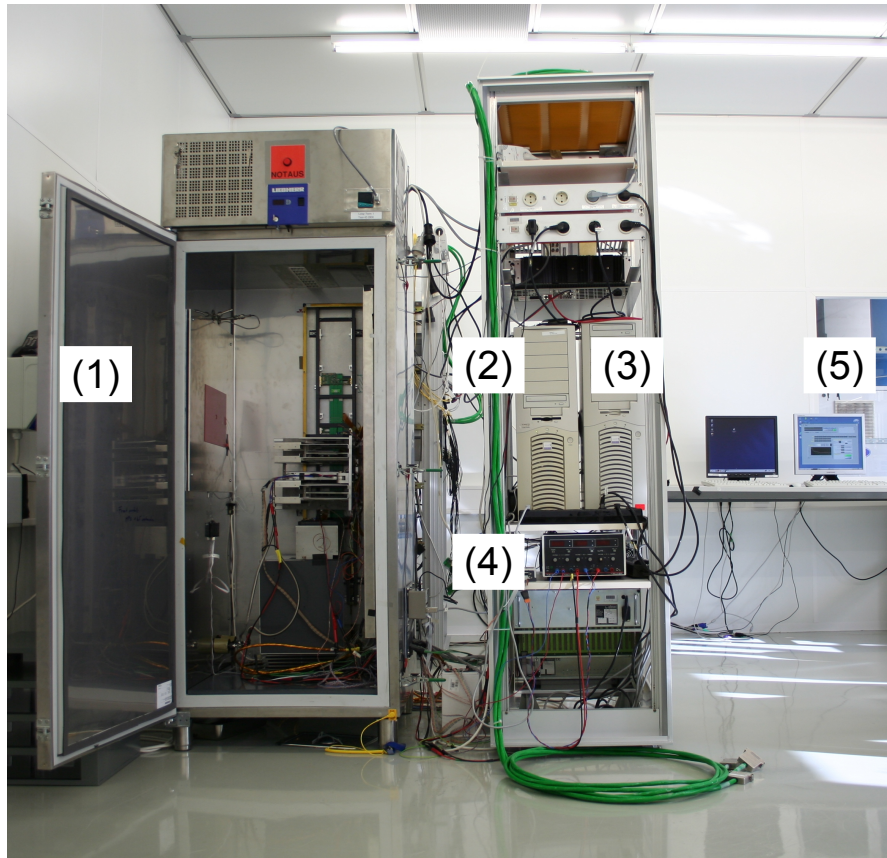


Abbildung 5.15: Aufbau des Teleskopsystems: (1) Kühltank, (2) PC für Datenerfassung, (3) PC für SlowControl, (4) Netzteil für Szintillatoren und Pegelwandlung des Auslösesystems, (5) Arbeitsplätze

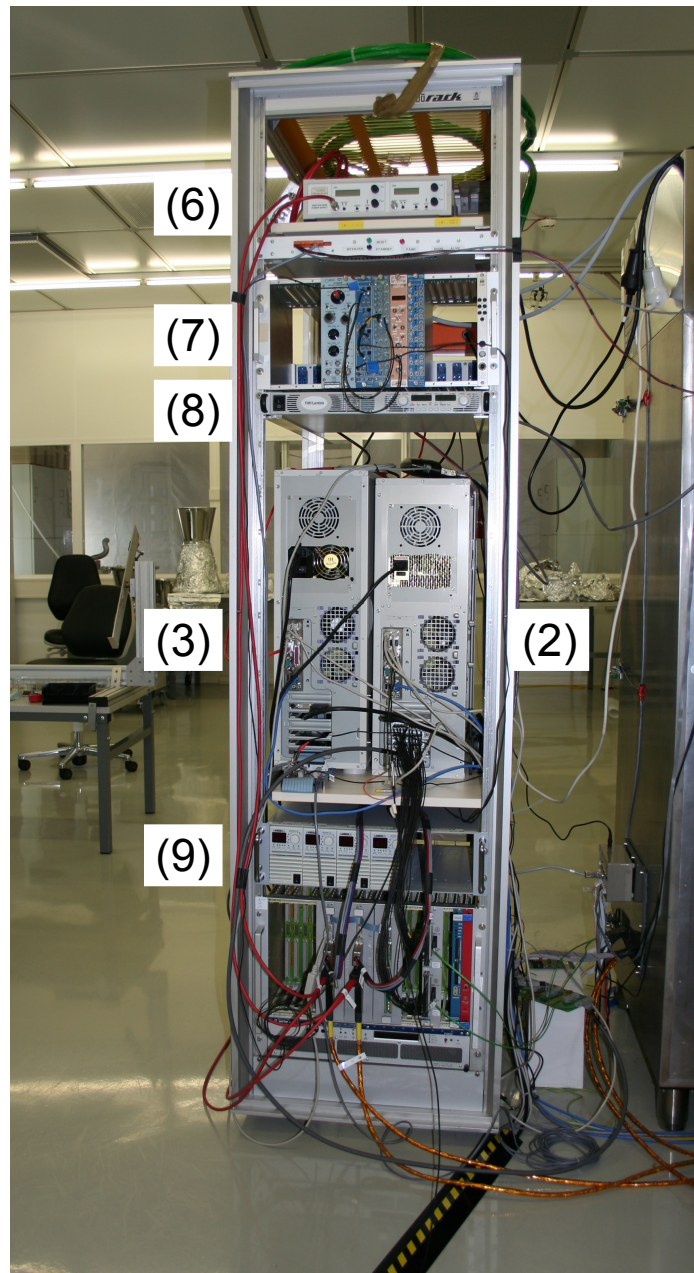


Abbildung 5.16: Aufbau des Teleskopsystems: (6) HV-Netzteil, (7) Auslöselogik, (8) Netzteil für Peltierkühlung, (3) PC für SlowControl, (2) PC für Datenerfassung, (9) Niederspannungsnetzteile für Module

5.6 Kühlvorrichtung

Die Kühlvorrichtung besteht aus zwei Aluminiumplatten, zwischen denen 4 Peltierelemente angebracht sind. Wenn die Peltierelemente von Strom durchflossen werden, transportieren sie Wärme von einer Seite auf die andere. Eine Seite kühlt sich dadurch ab, während sich die andere erwärmt. Die Temperatur der Platte auf der wärmeren Seite wird in diesem Aufbau von einer Kühlanlage¹¹ konstant gehalten. Auf diese Weise wird ein Abkühlen des Testmoduls erreicht. Abbildung 5.17 zeigt ein CAD-Bild der Kühlvorrichtung, Abbildung 5.18 zeigt die Kühlvorrichtung mit einem montierten Modul.

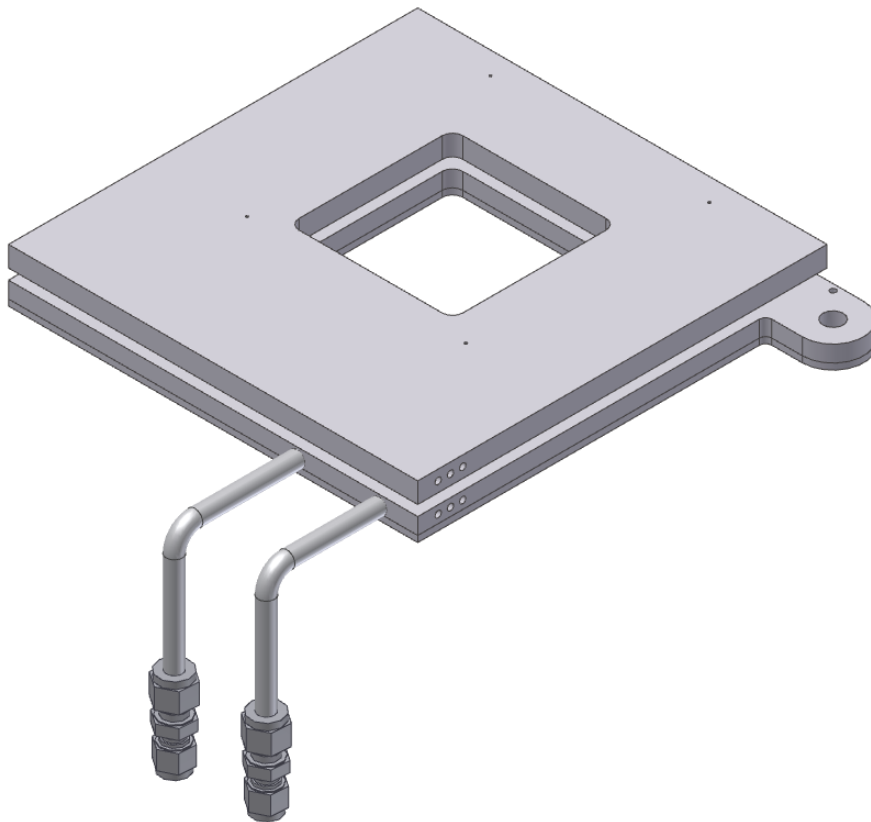


Abbildung 5.17: CAD-Bild der Kühlvorrichtung

Die Temperatur der Platten wird durch vier PT-1000 Temperaturfühler gemessen. An jeder Platte sind jeweils zwei Temperatursensoren angebracht, welche über ein USB-Interface¹² ausgelesen werden. Aus beiden gemessenen Temperaturen einer Platte wird der Mittelwert gebildet. Zur Temperaturregelung der gekühlten Platte wurde eine PID-Regelung¹³ in die

¹¹Louvain Cooling Plant: [Coo]

¹²Von Stefan Heier am IEKP entwickelt

¹³proportional-integral-derivative controller, Labview-Implementierung von Karl-Heinz Hoffmann [Hof08]

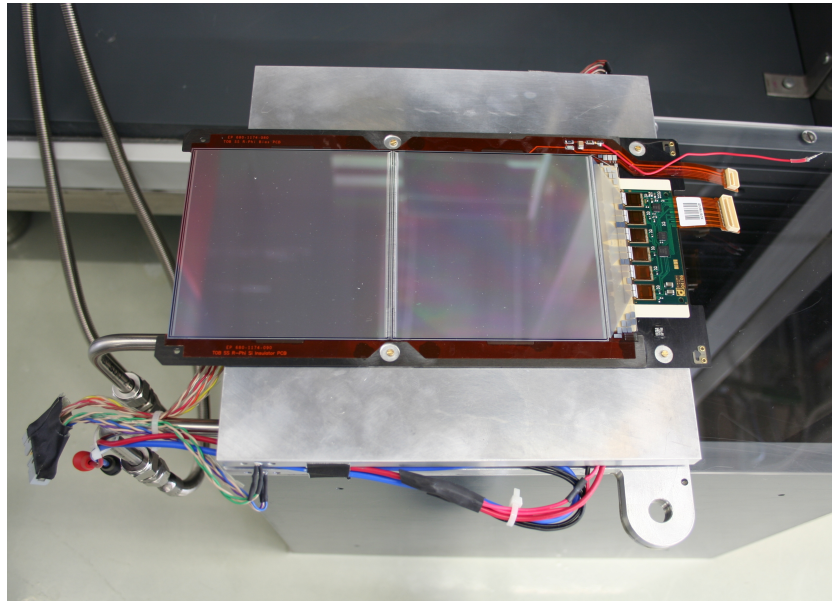


Abbildung 5.18: Kühlvorrichtung mit aufgeschraubtem Modul

SlowControl-Software integriert. Die an die Peltierelemente im Zeitschritt i angelegte Spannung U_i wird wie folgt aus der Temperatur T_i der zu kühlenden Platte berechnet

$$U_i = P(T_i - T_{set}) + I \sum_{k=0}^i (T_k - T_{set}) + D \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (5.1)$$

T_{set} ist hierbei die gewünschte Zieltemperatur und Δt die Zeitdifferenz zwischen den Temperaturmesswerten T_i und T_{i-1} .

P, I und D sind die Reglerparameter. In Tabelle 5.1 sind die verwendeten Parameter angegeben. Sie wurden empirisch bestimmt.

Parameter	Wert $\left[\frac{V}{K} \right]$
P	0.4
I	0.002
D	0

Tabelle 5.1: Reglerparameter der Temperaturregelung

Das Modul kann mit der vorhandenen Anordnung nicht beheizt werden, da die Polung der Spannungsquelle nicht geändert werden kann. Deshalb werden negative Spannungswerte verworfen. Um die Peltierelemente nicht zu zerstören, ist die maximale Ausgangsspannung auf 11,5V begrenzt.

6 Methode der Datenanalyse

Um Aussagen über die Module treffen zu können, müssen die mit dem Teleskop gewonnenen Rohdaten weiterverarbeitet werden. Hierzu wurde die Software SiBTStAR¹ verwendet. Sie ist in C++ geschrieben und verwendet die QT3-Bibliothek [qt3] für die graphische Oberfläche sowie das ROOT Framework [ROO] für die Datenanalyse. Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Analyseschritte und erläutert die verwendeten Begriffe.

6.1 Rekonstruktion

Der Rekonstruktionsmodus durchsucht die Rohdaten nach Signalen, die von Teilchendurchgängen durch die Module stammen. Vor der eigentlichen Suche werden einige Vorverarbeitungen an den Rohdaten vorgenommen, um die Suche nach Ladungscustern² zu erleichtern.

6.1.1 Pedestal

Auch ohne Teilchendurchgang liefern die Auslesechips von Null verschiedene Signalthöhen für die einzelnen Streifen. Der Mittelwert dieser Signalthöhen eines Streifens s über viele Ereignisse e wird als Pedestal bezeichnet.

$$P_s = \frac{\sum_{e=1}^E ADC_{s,e}}{E} \quad (6.1)$$

Bei der Aufnahme des Pedestals dürfen keine echten Signale in den Modulen auftreten. Dies wird erreicht, in dem die Datenerfassung zufällig getriggert wird. Abbildung 6.1 zeigt eine typische Pedestalverteilung für ein Modul mit 768 Streifen.

Man sieht deutlich, dass das Pedestal von Streifen zu Streifen variiert. Charakteristisch für die APV-Chips ist das Ansteigen des Pedestals mit der Streifennummer.

¹Silicon Beam Test - Simulation tool and Analysis and Reconstruction tool, geschrieben von Bernhard Ledermann, IEKP, [Led06]

²Cluster = Ladungsansammlung, die durch einen Teilchendurchgang erzeugt wird. Sie kann sich über mehrere Streifen ausdehnen.

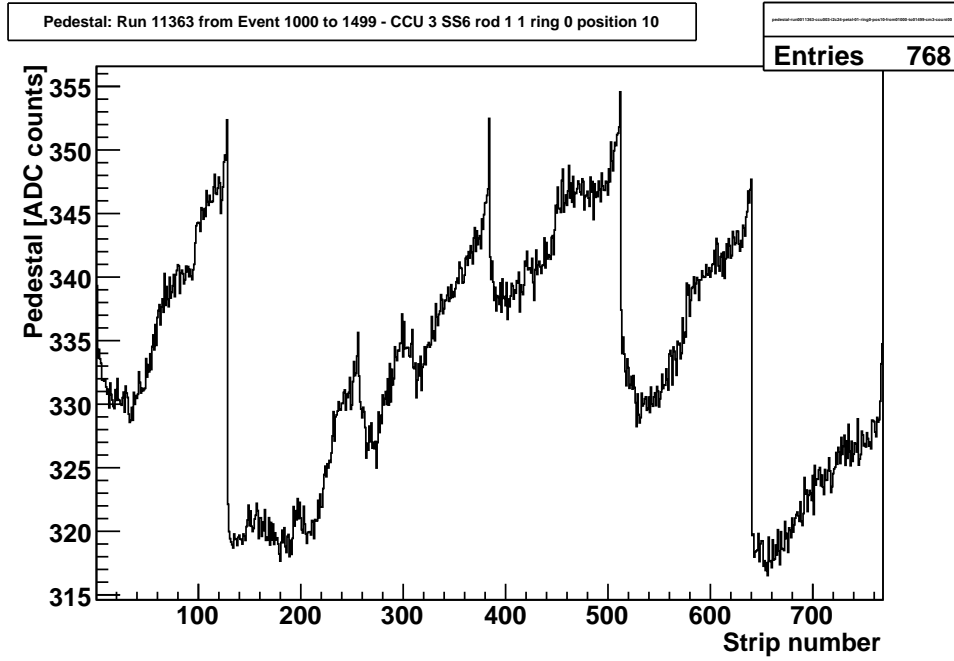


Abbildung 6.1: Pedestalverteilung eines Moduls mit 768 Streifen

Bevor in den Rohdaten eines Ereignisses nach Clustern gesucht wird, wird das Pedestal von den Rohdaten abgezogen. Dies erleichtert die Suche nach Clustern, da es dazu führt, dass Streifen ohne Signal ADC-Werte nahe Null liefern. Das Auffinden von Clustern, die sich über die Grenze zwischen zwei Auslesechips erstrecken, wird ebenfalls erleichtert, da die Sprünge zwischen den Chips ausgeglichen werden.

6.1.2 Rauschen

Die einzelnen ADC-Werte eines Streifens sind für gewöhnlich gaussverteilt. Die Schwankungsbreite der Signale um das Pedestal gibt das Rauschen eines Streifens an.

$$N_s = \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^E (ADC_{s,e} - P_s)^2}{E}} \quad (6.2)$$

Einzelne Streifen können ein erhöhtes Rauschen im Vergleich zu den restlichen Streifen aufweisen. Diese Streifen werden von der späteren Analyse ausgenommen. Abbildung 6.2 zeigt die typische Rauschverteilung eines Moduls mit 768 Streifen.

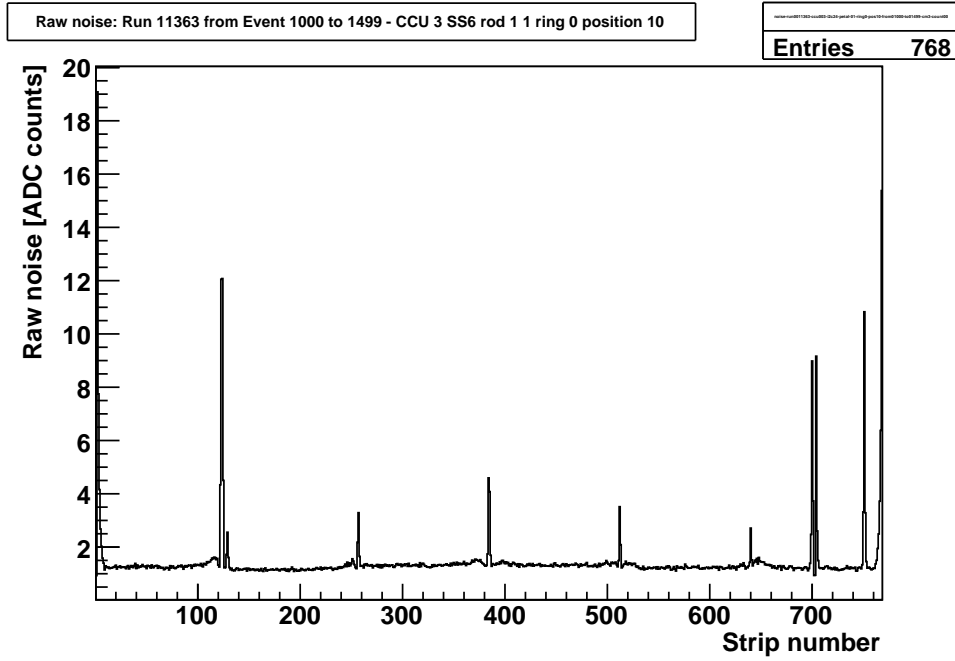


Abbildung 6.2: Rauschverteilung eines Moduls mit 768 Streifen

6.1.3 Common-Mode

Die Common-Mode³ Korrektur entfernt Einflüsse aus den Signalen eines Ereignisses, die sich auf alle Streifen gleichmäßig auswirken. Der Common-Mode wird für jeden Auslesechip (128 Streifen) einzeln bestimmt. Zunächst wird für jedes Ereignis e das Mittel aller ADC-Werte eines APV-Chips bestimmt, anschließend wird für jeden Streifen hiervon das Pedestal abgezogen und nochmals über alle Streifen gemittelt

$$CM = \frac{\sum_{u=1}^{128} \left(\frac{\sum_{s=1}^{128} ADC_s}{128} - P_u \right)}{128} \quad (6.3)$$

6.1.4 Clustersuche

Nach der Subtraktion von Pedestal und Common-Mode wird die eigentliche Clustersuche durchgeführt. Die Signalhöhen der einzelnen Streifen werden mit dem Rausch-Wert des entsprechenden Streifens verglichen. Liegt das Verhältnis oberhalb einer vorher definierten Schwelle, wird der Streifen als Ausgangsstreifen⁴ für ein Ladungscluster verwendet. Bei

³dt.: Gleichtakt

⁴seed

den in dieser Arbeit gezeigten Analysen liegt die Signalhöhe des Ausgangsstreifens um den Faktor 7 über dem Rauschen des entsprechenden Streifens. Die Nachbarstreifen werden dem Cluster hinzugefügt, wenn sich deren Signalhöhe ebenfalls um einen bestimmten (jedoch niedrigeren) Faktor vom Rauschen abhebt, in dieser Arbeit um den Faktor 4.

6.1.5 Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein wichtiges Maß für die Qualität des Sensors. Als Signal oder Cluster-Ladung eines Clusters bezeichnet man die aufsummierten Signalhöhen nach Abzug von Pedestal und Common Mode der Streifen, die zum Cluster gehören:

$$Q_c = \sum_i^{\text{Streifen im Cluster}} \text{Signal}_i \quad (6.4)$$

Aus dem Rauschen der einzelnen Streifen kann durch Fehlerfortpflanzung das Cluster-Rauschen bestimmt werden:

$$N_c = \sqrt{\frac{1}{\sum_i^{\text{Streifen im Cluster}}} \sum_i^{\text{Streifen im Cluster}} N_i^2} \quad (6.5)$$

Das Signal-Rausch-Verhältnis SNR^5 ist das Verhältnis aus Cluster-Ladung und Cluster-Rauschen:

$$\text{SNR} = \frac{Q_c}{N_c} = \frac{\sum_i^{\text{Streifen im Cluster}} \text{Signal}_i}{\sqrt{\frac{1}{\sum_i^{\text{Streifen im Cluster}}} \sum_i^{\text{Streifen im Cluster}} N_i^2}} \quad (6.6)$$

Für jeden Cluster, der in den Daten eines Moduls gefunden wird, wird der SNR-Wert berechnet und in ein Histogramm eingetragen. An die sich ergebende Verteilung wird eine gefaltete Landau- und Gaußverteilung angepasst, wie Abbildung 6.3 zeigt. Der wahrscheinlichste Wert der angepassten Verteilung ergibt das SNR des Sensors.

⁵SNR: signal-to-noise-ratio

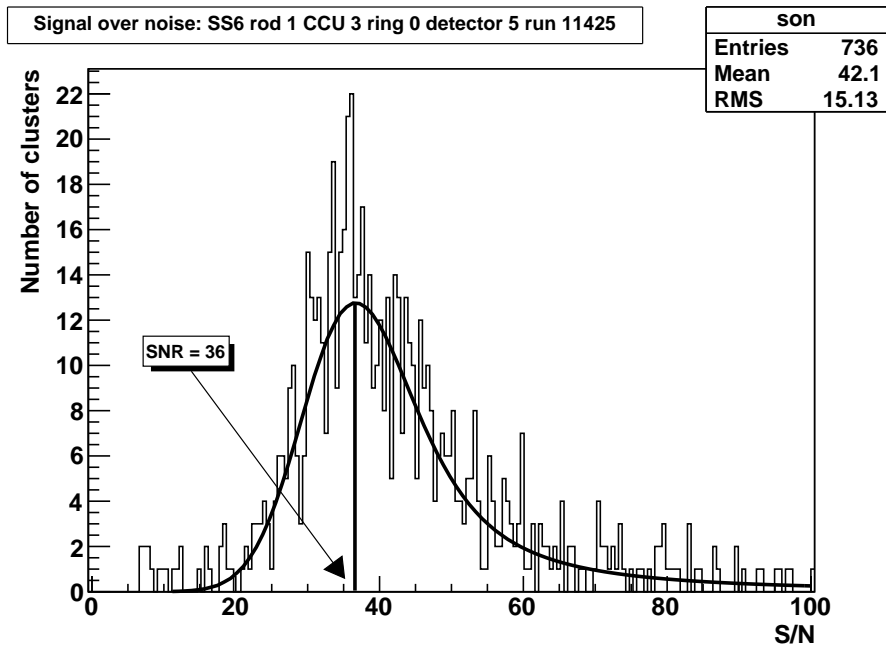


Abbildung 6.3: Angepasste Landau-Gauß-Verteilung - der wahrscheinlichste Wert definiert das SNR des Moduls

6.1.6 Rekonstruktion

Aus dem möglicherweise mehrere Streifen breiten Cluster muss der Durchstoßpunkt der Teilchenspur durch das Modul rekonstruiert werden. Hierzu gibt es mehrere unterschiedliche Ansätze.

Schwerpunktalgorithmus

Eine mögliche Wahl um einem Cluster eine Position auf dem Sensor zuzuordnen ist, den Ladungsschwerpunkt des Clusters zu verwenden:

$$Strip_{COG} = \frac{\sum_{i=0}^N Strip_i \cdot ADC_i}{\sum_{i=0}^N Strip_i} \quad (6.7)$$

Auf diese Weise erhält man den Schwerpunkt der Ladungsverteilung in Vielfachen des Streifenabstands. Subtrahiert man hiervon die halbe Streifenanzahl und multipliziert anschließend mit dem Streifenabstand erhält man die Position des Durchstoßpunktes, gemessen von der Mitte des Sensors:

$$x = \left(Strip_{COG} - \frac{NbStrips}{2} + \frac{1}{2} \right) \times Pitch \quad (6.8)$$

Eta-Algorithmus

Der Schwerpunktalgorithmus vernachlässigt die nichtlineare Ladungsteilung zwischen den einzelnen Streifen. Tritt ein Teilchen zwischen zwei Streifen durch den Sensor, verteilt sich die Ladung auf mindestens zwei Streifen. Diese Aufteilung ist nicht proportional zur Zwischenstreifenposition des Durchgangs. Dies wird durch den Eta-Algorithmus berücksichtigt.

Aus allen Clustern, die in einem Sensor gefunden werden und die mindestens zwei Streifen umfassen, wird eine Korrekturfunktion bestimmt. Hierzu werden in jedem Cluster der höchste und der zweithöchste Streifen betrachtet. Aus den Signalthöhen dieser Streifen wird das Verhältnis der Ladung des einen Streifens zur Gesamtladung beider Streifen wie folgt gebildet:

$$\eta = \frac{PH(R)}{PH(L) + PH(R)} \quad (6.9)$$

$PH(R)$ beschreibt dabei die Signalthöhe des rechten Streifens, $PH(L)$ die des linken Streifens, unabhängig davon, welcher der beiden Streifen das höhere Signal aufweist. Werte von $\eta > 0,5$ bedeuten, dass der rechte Streifen die meiste Ladung gesammelt hat. Bei Clustern mit $\eta < 0,5$ hat der linke Streifen mehr Ladung gesammelt. $\eta = 0,5$ bedeutet, die Ladung hat sich gleichmäßig auf beide Streifen verteilt.

Die Teilchen bestrahlen den Sensor gleichmäßig über die ganze Fläche. Ist die Ladungsaufteilung linear zwischen den Streifen, wäre eine flache Verteilung der η -Werte zu erwarten. Tatsächlich erhält man aber eine Verteilung wie sie in Abbildung 6.4a gezeigt ist. Es sind deutlich weniger Cluster mit gleichmäßiger Ladungsteilung vorhanden, als solche, bei denen ein Streifen die meiste Ladung trägt.

Aus der Verteilung der η -Werte kann durch Integration eine Korrekturfunktion für die Zwischenstreifenposition des Teilchendurchgangs ermittelt werden. Der mittlere Durchtrittspunkt ist für gegebenes η durch Gleichung 6.10 gegeben, wobei Δ den Streifenabstand und N_0 die Streifenanzahl darstellt. Abbildung 6.4b zeigt eine Korrekturfunktion.

$$x(\eta) = \frac{\Delta}{N_0} \int_0^\eta \frac{dN}{d\eta} d\eta - \frac{\Delta}{2} \quad (6.10)$$

Dieser Algorithmus ist in [BKL⁺83] und [BBB⁺03] beschrieben und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in die SiBTStAR-Software integriert.

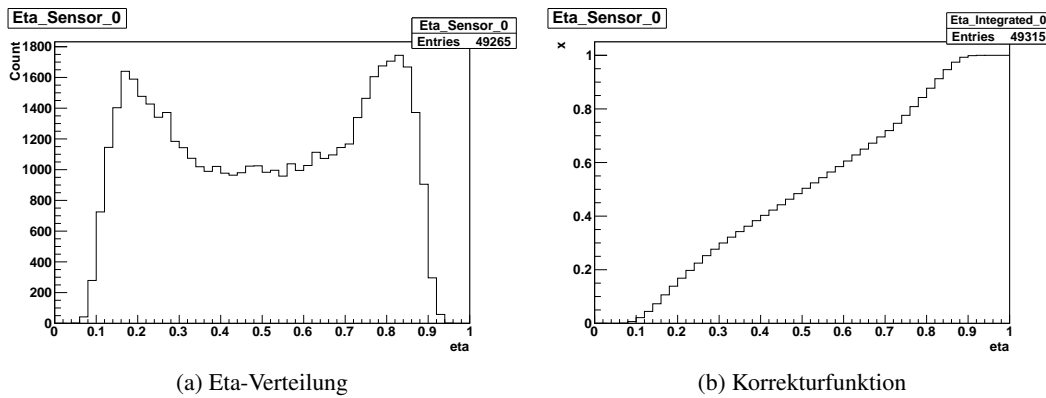


Abbildung 6.4: Eta-Verteilung und die daraus bestimmte Korrekturfunktion

6.2 Tracking

Der nächste Schritt in der Analyse ist das Tracking, also das Zuordnen der gefundenen Cluster zu Teilchenspuren. Ausgehend von den Clustern in den äußeren beiden Modulen wird schrittweise eine Gerade an die rekonstruierten Punkte angepasst. Ein Cluster aus einem der inneren Module wird zur Spur hinzugefügt, wenn sein Abstand zur Spur die vierfache typische Clusterbreite nicht überschreitet. Mit jedem neu hinzugekommenen Cluster wird die Spur neu angepasst. Wenn das rekonstruierte Ereignis am Ende die folgenden Bedingungen erfüllt, wird die Spur für die spätere Analyse verwendet:

- In mindestens drei ungedrehten Modulen wurde ein Cluster der Spur hinzugefügt
- In beiden gedrehten Modulen wurde ein Cluster der Spur hinzugefügt
- Es wurde insgesamt nur eine Spur gefunden

Werden in einem Ereignis mehrere Cluster in einem Sensor gefunden, wird derjenige Cluster der Spur hinzugefügt, welcher am Besten in die Spur passt. Dies wird erreicht, in dem der Cluster verwendet wird, für den die gesamte Spuranpassung das niedrigste χ^2 liefert. Ist dies nicht eindeutig möglich, wird das Ereignis verworfen.

6.3 Ortsauflösung

Durch die begrenzte Ortsauflösung der Streifensensoren und die Vielfachstreuung liegen die rekonstruierten Durchtrittspunkte nicht immer auf einer exakten Geraden. Der senkrechte Abstand der rekonstruierten Teilchenspur zu einem Cluster wird als Residuum bezeichnet, wie Abbildung 6.5 schematisch für eine Dimension darstellt. Werden alle Residuen eines Sensors in ein Histogramm eingetragen, ergibt sich für gewöhnlich eine gaußförmige Verteilung, die um Null zentriert ist. Je kleiner die Residuen sind, desto genauer konnte die

Spur rekonstruiert werden. Die Breite der Residuenverteilung gibt daher die Ortsauflösung des Streifensensors an.

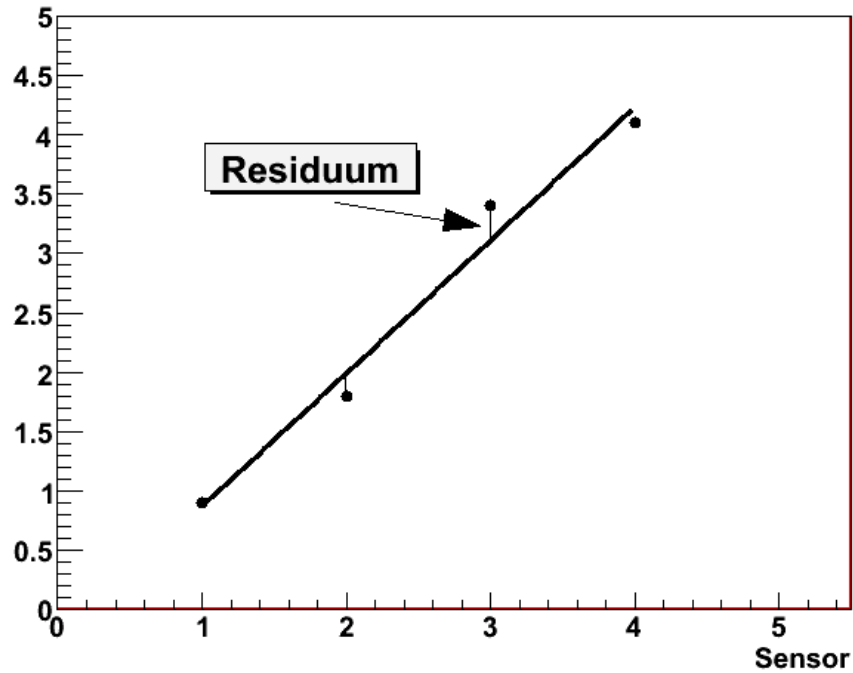


Abbildung 6.5: Das Residuum ist der senkrechte Abstand zwischen Cluster und rekonstruierter Teilchenspur

Bei der Bestimmung der Breite der Residuenverteilung eines Sensors spielt es eine Rolle, ob die Cluster des betrachteten Moduls für die Spuranpassung verwendet werden, oder nicht. Wird der zu testende Cluster mitverwendet, ist die Residuenverteilung im Allgemeinen schmaler, da die Spur dadurch näher an den Cluster gezogen wird. Man spricht dann von *inklusive* Ortsauflösung σ_{inkl} . Im Gegensatz hierzu spricht man von *exklusiver* Ortsauflösung σ_{exkl} , wenn die Cluster des Moduls nicht für das Tracking verwendet werden. Bei der Angabe der Ortsauflösung wird das geometrische Mittel aus beiden Residuenbreiten gebildet [CDD⁺05].

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{inkl} \cdot \sigma_{exkl}} \quad (6.11)$$

Abbildung 6.6 zeigt eine Residuenverteilung im exklusiven und inklusiven Fall.

Für eine korrekte Bestimmung der Ortsauflösung eines Moduls müssen mindestens zwei weitere Module mit derselben Streifenorientierung im Teleskop vorhanden sein. Jedes Modul liefert eine Stützstelle für die Spuranpassung. Bei nur zwei Stützstellen, wird immer eine Gerade gefunden, die genau durch die Stützstellen geht. Die Residuen sind also Null.

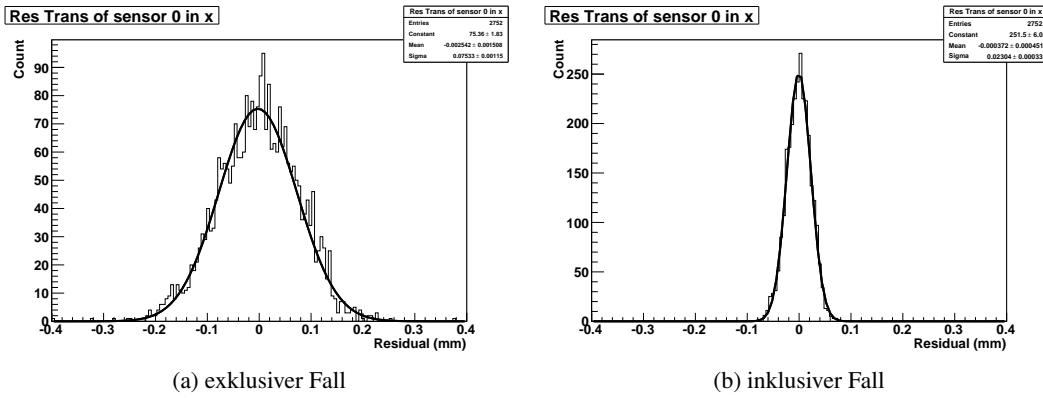


Abbildung 6.6: Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall

Im später betrachteten Aufbau ist dies für zwei Module (Sensor 1 und Sensor 5) der Fall. Eine Bestimmung der Ortsauflösung ist deshalb für sie nicht möglich.

Aus dem Streifenabstand p lässt sich eine obere Grenze für die Ortsauflösung eines Streifensensors abschätzen, wenn angenommen wird, dass die Mitte des Streifens mit dem höchsten Signal als Clusterposition verwendet wird. Dies wird als binäre Auslese bezeichnet:

$$\sigma^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \quad (6.12)$$

$$= \frac{1}{p} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} x^2 dx - \left(\frac{1}{p} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} x dx \right)^2 = \frac{p^2}{12} \quad (6.13)$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{p}{\sqrt{12}} \quad (6.14)$$

Dies kann als obere Grenze für die im CMS-Experiment verwendete analoge Auslese betrachtet werden, bei der Informationen aus der Signalhöhe in die rekonstruierte Clusterposition einfließen können (siehe Kapitel 6.1.6). Die in dieser Arbeit betrachteten Sensoren haben einen Streifenabstand von $183 \mu\text{m}$ bzw. $122 \mu\text{m}$. Als obere Grenze für die analoge Ortsauflösung ergibt sich somit $52,8 \mu\text{m}$ bei $183 \mu\text{m}$ Streifenabstand bzw. $35,2 \mu\text{m}$ bei $122 \mu\text{m}$ Streifenabstand.

Die Ortsauflösung ist auch durch Rauschverhalten der Ausleseelektronik begrenzt. Es gilt folgende Abschätzung [Lut99]:

$$\Delta x \approx \frac{p}{\text{SNR}} \quad (6.15)$$

In [Sus09] wurde gezeigt, dass sich die Ortsauflösung des Teleskops durch einen Schnitt auf das reduzierte χ^2 der Trackanpassung steigern lässt. Hierbei werden Tracks verworfen, deren rekonstruierte Trackpunkte durch Streuung zu weit von einer Geraden abweichen. Das reduzierte χ^2 ist in Gleichung 6.16 definiert.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{allClusters} \left[\left(\frac{dx}{\sigma_{trans}^{sr}} \right)^2 + \left(\frac{dy}{\sigma_{long}^{sr}} \right)^2 \right]}{2(N_p - c)} \quad (6.16)$$

Dabei sind dx und dy die Projektionen des Abstandsvektors zwischen Track-Cluster und Track senkrecht und parallel zur Streifenrichtung. σ_{trans}^{sr} und σ_{long}^{sr} sind die berechneten Ortsauflösungen senkrecht und parallel zur Streifenrichtung und N_p ist die Zahl der Cluster, die für die Anpassung der Teilchenspur verwendet werden. Die Konstante c ist im Falle einer linearen Anpassung des Tracks gleich 2 [Led06].

Abbildung 6.7 zeigt die Verteilung des reduzierten χ^2 innerhalb eines Runs.

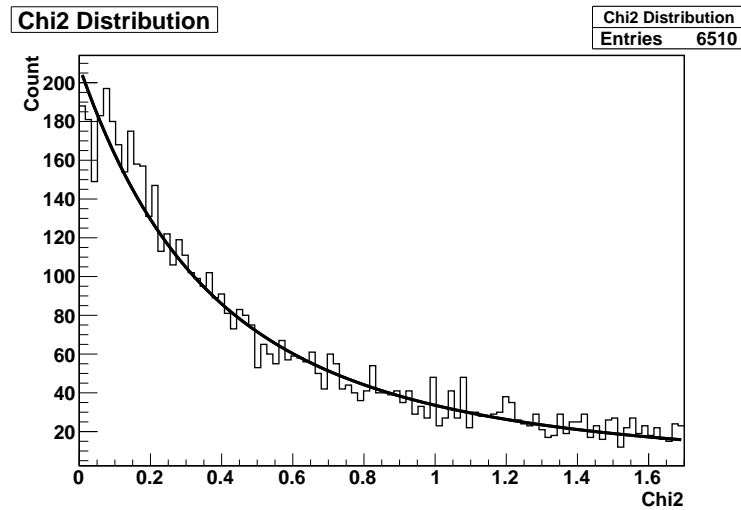


Abbildung 6.7: Verteilung der reduzierten χ^2 -Werte

6.4 Alignment

Für eine funktionierende Spurrekonstruktion ist die Kenntnis der räumlichen Lage der Teleskopmodule zueinander von großer Bedeutung. Aufgrund von Fertigungs- und Montageteranzen ist diese Kenntnis nicht immer in ausreichendem Maße gegeben. Ungenauigkeiten in der Ausrichtung der Module führen zu einer räumlichen Verschiebung der rekonstruierten Durchstoßpunkte und im Allgemeinen zu einer Vergrößerung der Residuen.

Die Spuren kosmischer Teilchen können verwendet werden, um die relative Lage der Sensoren zueinander besser zu bestimmen. Ist ein Modul beispielsweise senkrecht zur Streifenrichtung verschoben, verschieben sich die Cluster systematisch in eine Richtung. Dies führt immer noch zu einer gaußförmigen Residuenverteilung, jedoch ist diese nicht mehr um Null zentriert. Der Mittelwert der Verteilung ist ein Maß für den Versatz des Moduls. Die Modulposition wird um diesen Wert korrigiert und die Spurrekonstruktion erneut durchgeführt. Auf diese Weise kann ein Versatz der Module iterativ ausgeglichen werden.

Verdrehungen oder Verkippen der Module können auf diese Weise jedoch nicht bestimmt werden. Um sie auszugleichen, wird der Sensor in kleinere Bereiche eingeteilt. In jedem dieser Bereiche wird der Mittelwert der Residuenverteilung getrennt bestimmt. Abbildung 6.8 zeigt eine zweidimensionale Auftragung der Mittelwerte. Aus dem Verlauf der Mittelwerte über die Sensorfläche kann die Verdrehung oder Verkippen der Module berechnet werden. Nach der Positionskorrektur der Module werden die Teilchenspuren neu bestimmt. So kann ein vollständiges Alignment der Module erreicht werden.

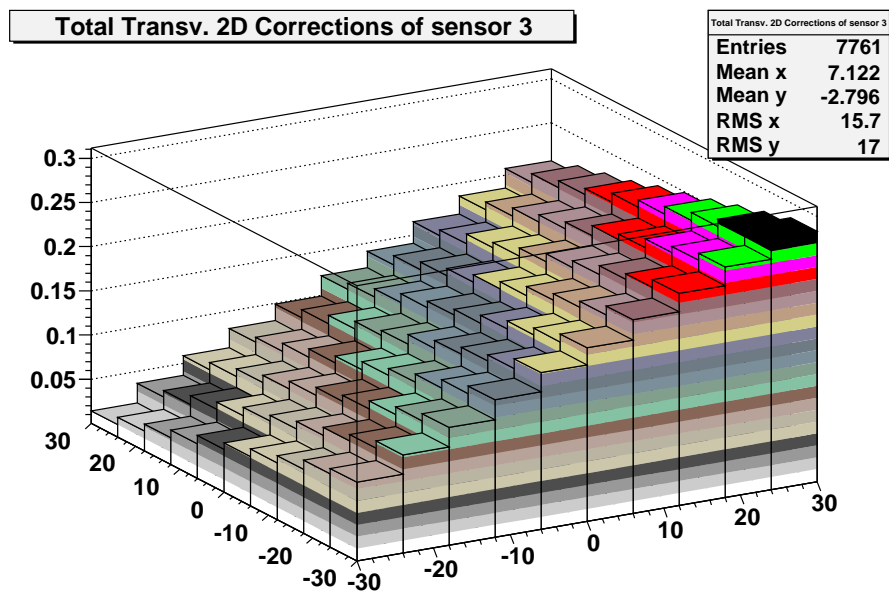


Abbildung 6.8: Mittelwerte der Residuenverteilung in Abhängigkeit der Position auf dem Sensor.

Durch das Aufteilen des Sensors in kleinere Bereiche verringert sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Teilchenspuren pro Teilbereich. Die Größe der Teilbereiche darf daher nicht zu klein gewählt sein, da sonst eine zuverlässige Bestimmung der Residuenverteilung in einem Teilbereich nicht mehr möglich ist. Bei den in dieser Arbeit gezeigten Analysen wurde der Sensor in 100 Teilbereiche geteilt. Es wurde darauf geachtet, dass in jedem Teilbereich mindestens 30 Ladungscluster gefunden werden, wie Abbildung 6.9 zeigt.

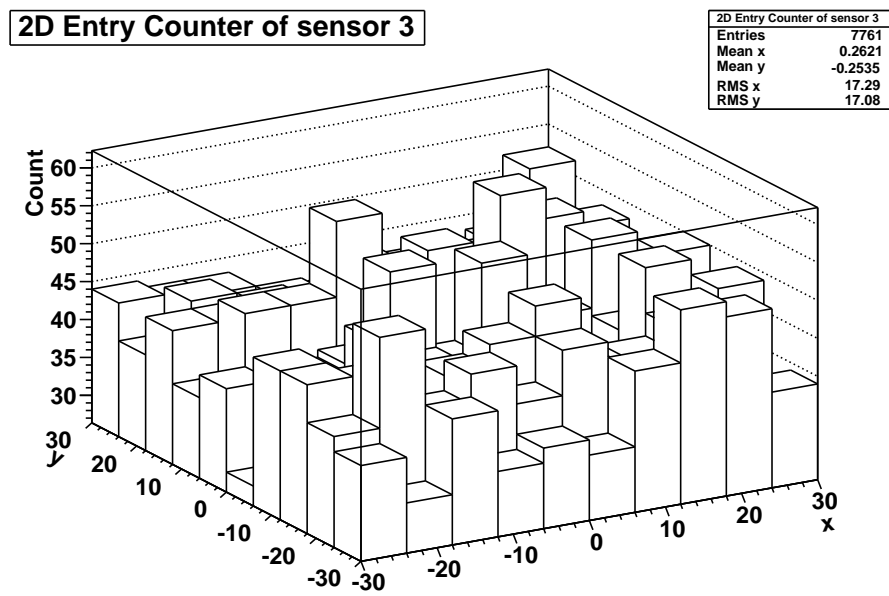


Abbildung 6.9: Anzahl der in einem Teilbereich gefundenen Cluster

7 Datenanalyse

Nach dem das Teleskop im Reinraum des IEKP aufgebaut wurde, wurde zunächst seine Leistungsfähigkeit untersucht. Anschließend wurden mehrere Module mit dem Teleskop vermessen.

7.1 Kalibration der Module

Sollen mehrere Module gleichzeitig ausgelesen werden, müssen die Einstellungen der Module aufeinander abgestimmt werden. Dies betrifft die Verzögerungszeiten der Signalstrecken und die Intensitätseinstellungen der Lasertreiber. Darüber hinaus muss nach einer Triggerentscheidung die richtige Zelle aus der APV-Pipeline ausgegeben werden. Die Datenerfassungssoftware bietet für die Änderung der Einstellungen entsprechende Kalibrationsläufe an.

7.1.1 Timing

Durch unterschiedliche Signallaufzeiten muss die zeitliche Lage des Ausgangssignals für jedes Modul individuell angepasst werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass die APVs auf allen Modulen die Daten der einzelnen Streifen synchron ausgeben. Es gibt zwei Werte für die Verzögerung. Ein grober Zeitschritt (coarse delay) bedeutet eine Verschiebung des Ausgangssignals um einen Taktzyklus, also 25ns. Ein feiner Zeitschritt (fine delay) stellt eine Verschiebung um $\frac{25}{24} ns \approx 1,04 ns$ dar. Bei einem Timing-Durchlauf werden alle 24 möglichen Stufen für das fine delay jedes Moduls durchlaufen. Bei der anschließenden Analyse werden dann die Werte gesucht, die die größtmögliche Synchronizität der Module zueinander liefern.

7.1.2 Gain

Die Intensitätseinstellung der Lasertreiber muss zum Dynamikumfang von Signal und Analog-Digital-Wandler auf dem FED passen. Mit einer zu kleinen Einstellung geht Auflösung verloren. Ist die Intensität hingegen zu groß, wird der Analog-Digital-Wandler übersteuert und die Signalhöhe kann nicht mehr rekonstruiert werden. In Analogie zum Einstellen der Verzögerungszeiten werden die möglichen Lasereinstellungen durchlaufen und anschließend für jeden Lasertreiber die beste Einstellung ausgewählt.

7.1.3 Latency

Nach einer Auslöseentscheidung wird aus der APV-Pipeline im Peak-Modus eine Speicherstelle ausgelesen und zur Datenerfassung weitergereicht. Welche Speicherstelle dies ist, hängt von der Verzögerung zwischen Teilchendurchgang durch das Teleskop und der Auslöseentscheidung ab. Um die richtige Speicherzelle zu identifizieren, wird bei einem Latency-Durchgang die Speicherposition nach einer vorher definierten Ereigniszahl (hier 1000 Ereignisse) schrittweise erhöht. Nach dem Durchgang wird für jede Latency Einstellung das Signal-Rausch-Verhältnis der gefundenen Cluster bestimmt. Die Einstellung, die das höchste Signal-Rausch-Verhältnis aufweist, wird für die späteren Durchläufe eingestellt.

7.2 Performance des Teleskops

Im folgenden Abschnitt werden die Referenzmodule und die Leistungsfähigkeit der Kühlvorrichtung untersucht.

7.2.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Zur Bestimmung der Depletionsspannung der Module wurden, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, bei verschiedenen Bias-Spannungen kleine Datensätze aufgenommen und daraus die Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses von der Bias-Spannung bestimmt. Unterhalb der Depletionsspannung rekombinieren die durch den Teilchendurchgang im nicht verarmten Teil des Sensors erzeugten Ladungsträger und tragen daher nicht zum Signal bei. Unterhalb der Depletionsspannung ist daher eine Zunahme der Signalthöhe und des SNR mit der Spannung zu beobachten, während oberhalb der Depletionsspannung Signal und SNR sättigen. In diesem Bereich können alle erzeugten Ladungsträgerpaare getrennt werden, unabhängig von der Bias-Spannung.

Für die Referenzmodule beginnt der Bereich der Sättigung des Signal-Rausch-Verhältnisses ungefähr bei 200V, wie Abbildung 7.1 zeigt. Sie wurden daher im Folgenden bei 250V betrieben.

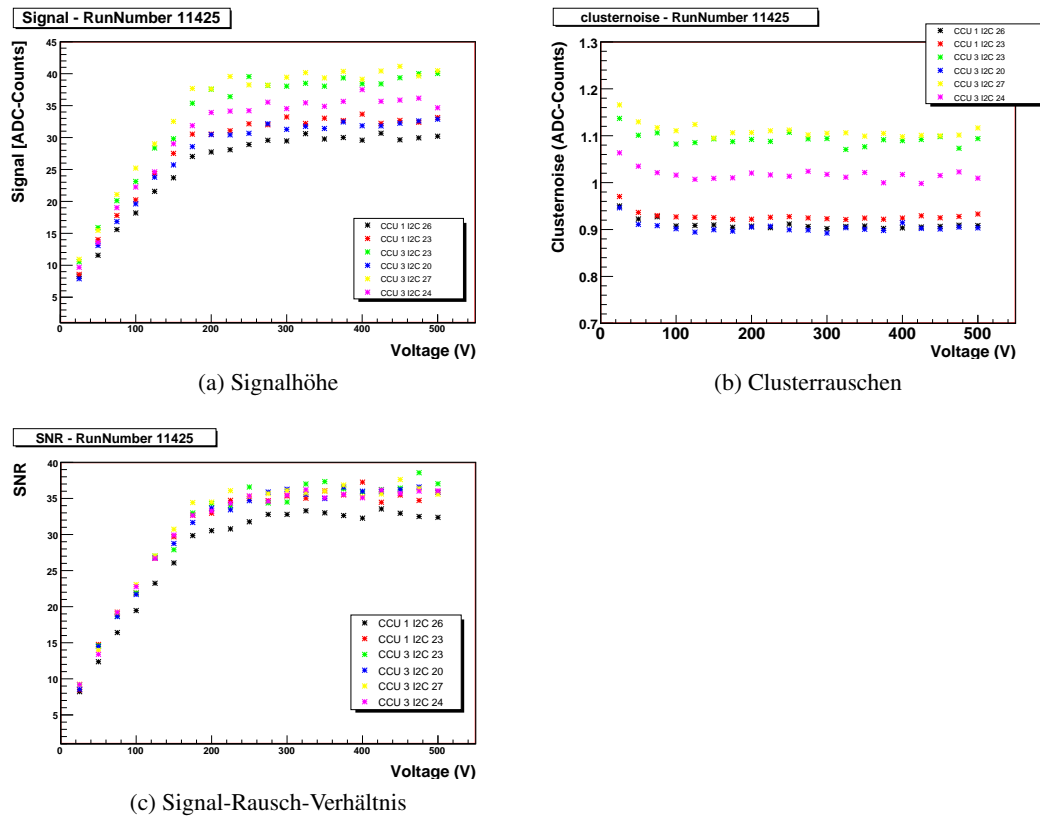


Abbildung 7.1: Referenzmodule - Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses von der Bias-Spannung

7.2.2 Kühlung

Abbildung 7.2 zeigt den Verlauf der Temperaturen der Kühlvorrichtung beim schrittweisen Abkühlen von -25°C auf -52°C . Nach dem Erreichen der Zieltemperatur wurde die Spannungsversorgung der Peltierelemente abgeschaltet und die Anordnung erwärmte sich wieder auf die Umgebungstemperatur im Kühltank.

Innerhalb einer halben Stunde wird eine Temperaturdifferenz von über 30K zwischen den beiden Platten erreicht. Die von der Kühlflüssigkeit durchflossene Platte erwärmt sich dabei umso stärker, je größer der Wärmetransport durch die Peltierelemente wird. Trotzdem stellt sich ein stabiles Temperaturgleichgewicht zwischen Platte, Kühlflüssigkeit und Umgebungsluft ein. Dies zeigt, dass die Kühlanlage leistungsfähig genug ist, um die warme Seite der Peltierelemente auch unter Volllast zu kühlen.

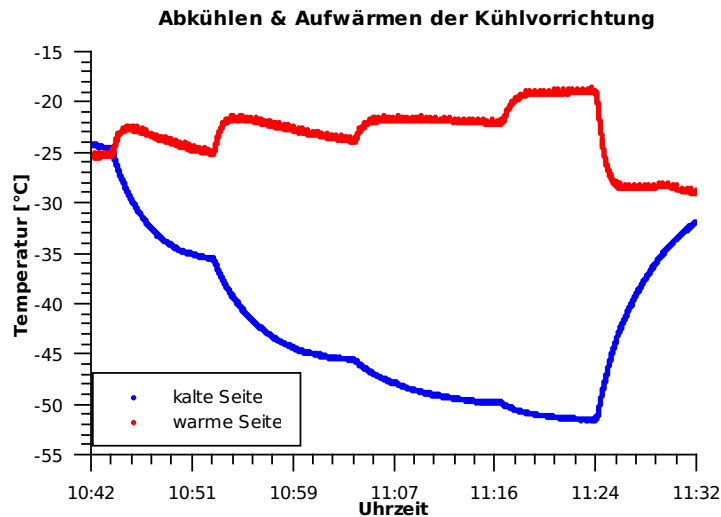


Abbildung 7.2: Temperaturverlauf beim Abkühlen und anschließenden Wiederaufwärmen der Kühlvorrichtung. Die Kühlanlage ist leistungsfähig genug, um die Peltierelemente bei Volllast betreiben zu können.

Um Abschätzen zu können, in welchem Maß ein auf der Kühlvorrichtung montiertes Modul gekühlt wird, wurde ein PT-1000 Temperaturfühler auf die Sensorrückseite des in Kapitel 7.3 genauer untersuchten unbestrahlten Moduls geklebt, wie Abbildung 7.3 zeigt. So konnte die Temperatur des Siliziums in Abhängigkeit der Temperatur der Kühlplatte und der Umgebungstemperatur im Kühltank bestimmt werden.

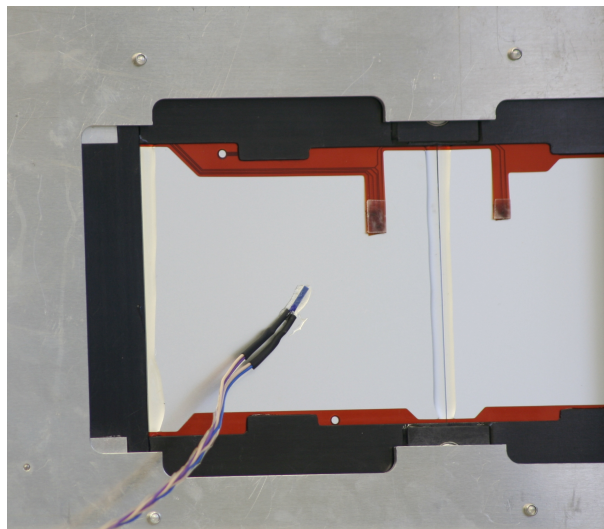


Abbildung 7.3: Zur Messung der Sensortemperatur wurde ein PT-1000 Temperaturfühler auf die Sensorrückseite geklebt

Bei verschiedenen Khlschrantemperaturen wurde die Trägerplatte durch die Peltierelemente schrittweise immer weiter unter die Umgebungstemperatur abgekühlt. Das auf der Kühlplatte angebrachte Modul war während der Messungen mit Spannung versorgt und hat Daten aufgenommen. Abbildung 7.4 zeigt den gefundenen Zusammenhang zwischen der Temperatur der Kühlplatte und der Temperatur des Siliziums. Die Punkte, die mit "geklebt" gekennzeichnet sind, bezeichnen einen Durchlauf, bei dem das Modul lediglich mit Klebeband auf der Kühlplatte befestigt war. Diese Punkte zeigen einen schlechten thermischen Kontakt zwischen der Kühlplatte und dem Modul. Das Silizium konnte in dieser Anordnung nicht unter -30°C abgekühlt werden. Zur Verbesserung des Kontakts wurde das Modul deshalb in allen nachfolgenden Tests auf die Kühlplatte aufgeschraubt.

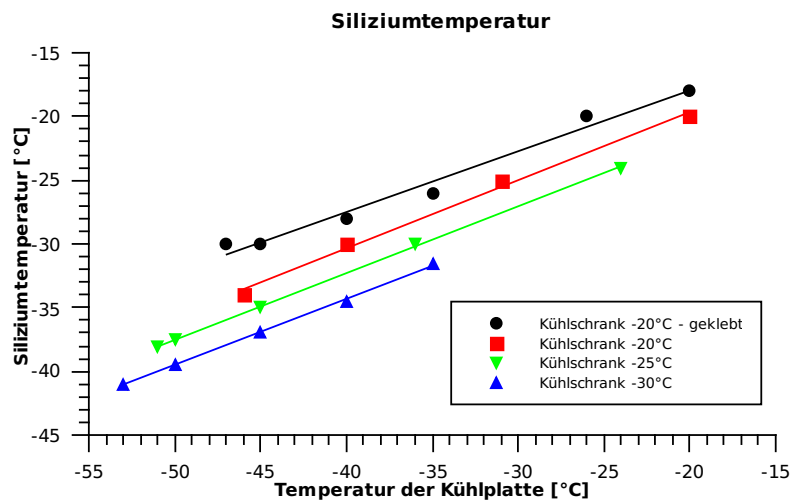


Abbildung 7.4: Siliziumtemperatur in Abhängigkeit der Temperatur der Kühlplatte und der Umgebungsluft

Im erreichbaren Temperaturbereich lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur der Kühlplatte und der Siliziumtemperatur dieses Moduls erkennen. Aus den Ausgleichsgeraden lässt sich ableiten, dass eine Absenkung der Temperatur der Kühlplatte um 1K ein Absinken der Siliziumtemperatur um 0,5K zur Folge hat, unabhängig von der Umgebungstemperatur. Es ergeben sich daher bei den jeweils tiefsten erreichbaren Temperaturen Differenzen von über 10K zwischen Kühlplatte und Silizium. Dieser Zusammenhang gilt nur für ein unbestrahltes CMS-Modul und kann nicht auf andere Modulgeometrien oder bestrahlte Sensoren übertragen werden.

7.2.3 Clustergröße

Abbildung 7.5 zeigt die mittlere Anzahl der zu einem Cluster gehörenden Streifen in Abhängigkeit von der Bias-Spannung.

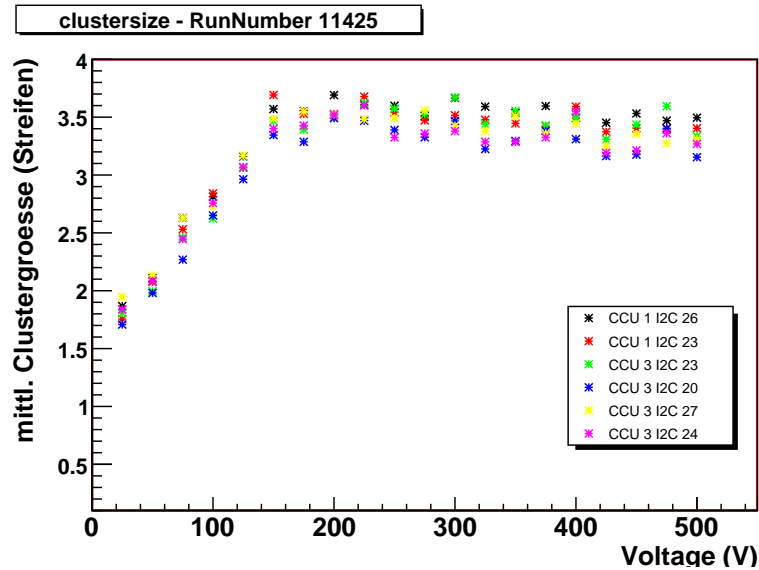


Abbildung 7.5: Clustergröße in Abhängigkeit der Bias-Spannung (Referenzmodule)

Solange der Sensor nicht vollständig depletiert ist, steigt die Clustergröße mit der Spannung an. Oberhalb der Depletionsspannung ist ein leichtes Abnehmen der Clustergröße mit der Spannung festzustellen. Ist der Sensor nicht vollständig depletiert, erreichen weniger Ladungsträgerpaare die Auslesestreifen. Die Ladung reicht dann nicht aus, um neben dem Seed-Streifen auch die Nachbarstreifen über die Schwelle des nötigen SNR zu bringen, damit sie dem Cluster hinzugefügt werden. Daher nimmt die mittlere Anzahl der getroffenen Streifen mit steigender Sperrspannung zu. Oberhalb der Depletionsspannung werden die Ladungsträger mit steigender Spannung durch das stärkere elektrische Feld innerhalb der Raumladungszone schneller zu den Auslesestreifen abgezogen. Die Ladungsträger können dadurch nicht so weit seitlich ins Material driften und die mittlere Clustergröße nimmt wieder leicht ab.

7.2.4 Ortsauflösung

Das Vorgehen zur Bestimmung der Ortsauflösung ist in Kapitel 6.3 beschrieben. Abbildung 7.6 zeigt die Residuenverteilung eines der Referenzmodule bei unterschiedlicher Wahl des Schnittes auf das reduzierte χ^2 . Hierbei wurden nur solche Tracks verwendet, deren Einfallswinkel in das Teleskop kleiner als 10° ist. Dieser Schnitt wurde gewählt, um sicher zu sein, dass die Eta-Verteilung nicht durch zu schrägen Durchgang durch die Module verwaschen wird. In Tabelle 7.1 sind die Breiten der Residuen zusammengefasst und zur Bestimmung der Ortsauflösung das geometrische Mittel der Breiten aus inklusiver und exklusiver Spuranpassung gebildet.

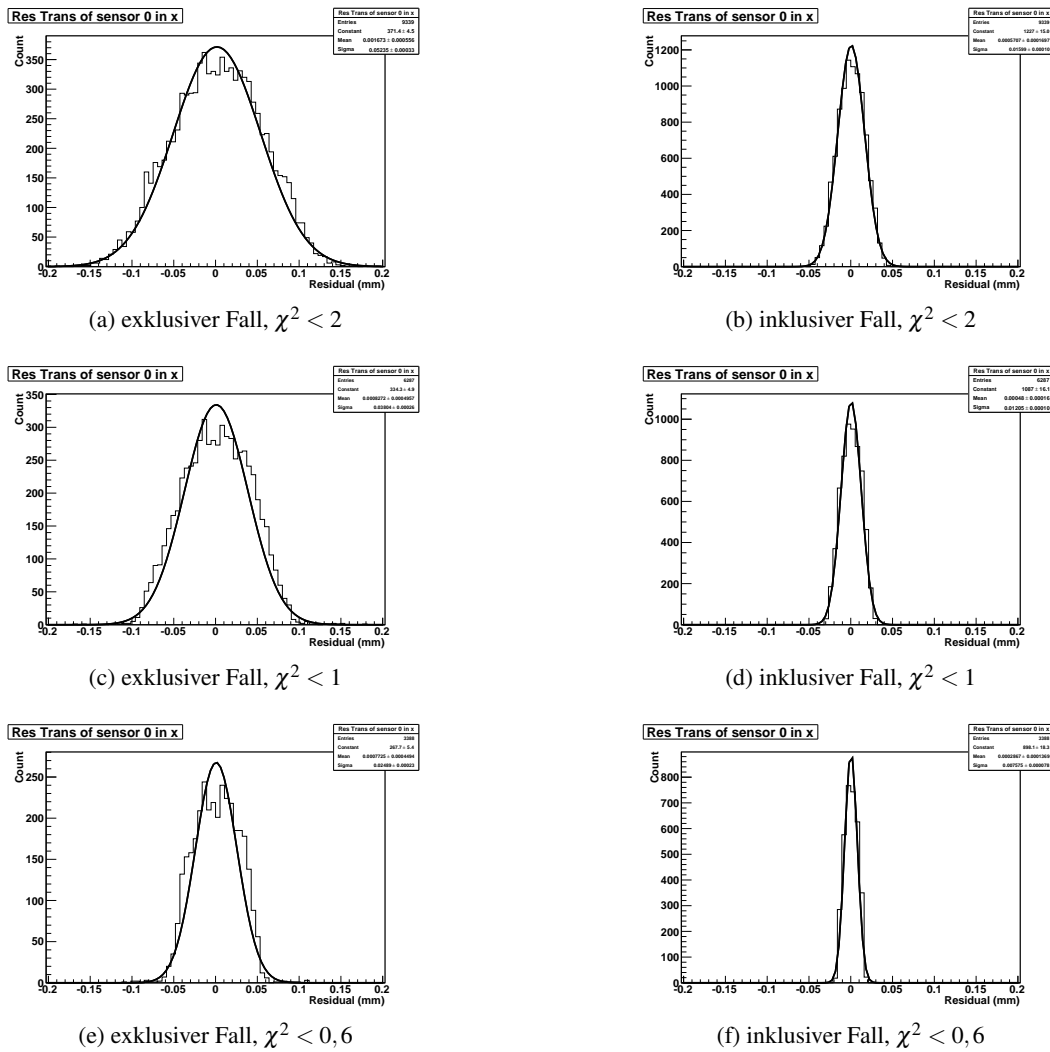


Abbildung 7.6: Referenzmodell (Sensor 0): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

	Res. Breite (exkl.) [μm]	Res. Breite (inkl.) [μm]	Geometr. Mittel [μm]
$\chi^2 < 2$	52	16	29
$\chi^2 < 1$	38	12	22
$\chi^2 < 0,6$	25	8	14

Tabelle 7.1: Referenzmodell (Sensor 0): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

Vergleich mit dem vorhergehenden Aufbau

In Tabelle 7.2 ist die Ortsauflösung eines der äußeren ungedrehten Module (Sensor 1) des ursprünglichen Teleskopaufbaus, wie er in [Sus09] beschrieben ist, mit einem der äußeren Module (Sensor 0) des hier untersuchten Aufbaus verglichen.

	Ortsauflösung aus [Sus09] [μm]	Ortsauflösung der hier untersuchten Anordnung [μm]
$\chi^2 < 2$	54	29
$\chi^2 < 1$	24	22
$\chi^2 < 0,6$	21	14

Tabelle 7.2: Vergleich der Ortsauflösung des Teleskops mit dem in [Sus09] beschriebenen Aufbau

Es zeigt sich, dass durch die engere Anordnung der Teleskopmodule im Abstand von 3 cm , im Gegensatz zu 16 cm , der Einfluss der Vielfachstreuung auf die Ortsauflösung des Teleskops reduziert werden konnte.

Schwerpunktalgorithmus vs. Eta-Algorithmus

Um eine mögliche Verbesserung der Ortsauflösung des Teleskops durch den Eta-Algorithmus zu untersuchen, wurde die Ortsauflösung der Referenzmodule einmal unter Verwendung des Schwerpunktalgorithmus und einmal unter Verwendung des Eta-Algorithmus bestimmt. Der gewählte Algorithmus wurde jeweils bei allen Referenzmodulen angewendet. Beide auf diese Weise bestimmten Ortsauflösungen eines der Referenzmodule sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

	Ortsauflösung COG [μm]	Ortsauflösung Eta [μm]
$\chi^2 < 2$	32	31
$\chi^2 < 1$	25	24
$\chi^2 < 0,6$	18	17

Tabelle 7.3: Vergleich der Ortsauflösung eines Referenzmoduls bei Verwendung des Schwerpunktalgorithmus und des Eta-Algorithmus

Es ist eine minimale Verbesserung der Ortsauflösung durch die Verwendung des Eta-Algorithmus festzustellen.

7.2.5 Alignment

In Tabelle 7.4 sind die gefundenen Verdrehungen und Verkippungen der Module zueinander aus verschiedenen Datensätzen zusammengefasst, um daran die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Alignmentalgorithmus zu überprüfen. Theta und Phi sind dabei die in Kapitel 5.4.2 betrachteten Winkel, Offset stellt eine gleichmäßige Verschiebung der Module senkrecht zur Streifenrichtung dar. Zwischen der Aufnahme der Datensätze wurde jeweils eines der in Kapitel 7.3 genauer untersuchten Module auf der Kühlvorrichtung montiert. Es ist in Tabelle 7.4 mit DUT¹ gekennzeichnet. Zum Austausch der Module wurde der Kühltank erwärmt und die Kühlvorrichtung bewegt. Anschließend wurde die gesamte Anordnung wieder abgekühlt.

DUT		Sensor						
		0	1	2	3 (DUT)	4	5	6
CMS (unbestr.)	Offset [mm]	0.03	-	-0.006	-0.003	0.01	-	-0.04
	Phi [°]	0.04	-	0.05	-0.2	0.1	-	0.03
	Theta [°]	3.4	-	2.2	2.2	1.0	-	0.06
CMS 05211	Offset [mm]	0.06	-	0.01	-0.07	0.06	-	-0.04
	Phi [°]	0.03	-	0.03	-0.1	0.1	-	0.03
	Theta [°]	3.3	-	2.1	1.7	0.4	-	0
CMS 05207	Offset [mm]	0.02	-	0.007	-0.04	0.05	-	-0.02
	Phi [°]	0.02	-	0.02	-0.07	0.07	-	-0.04
	Theta [°]	2.9	-	1.7	0.1	2.3	-	1.1

Tabelle 7.4: Gefundene Alignmentparameter aus verschiedenen Datensätzen

Die Alignmentparameter aller drei Datensätze stimmen im Rahmen der mechanischen Toleranzen ($\pm 0,1 \text{ mm}$, Sensor 3 ungenauer, da drehbar gelagert) gut überein. Die auftretenden Abweichungen, können durch die möglicherweise leicht unterschiedliche Ausrichtung des jeweiligen Testmoduls auf der Kühlvorrichtung hervorgerufen werden. Da für die beiden gedrehten Module 1 und 5 keine Residuen bestimmt werden können (siehe Kapitel 6.3), kann ein Alignment dieser Module nicht durchgeführt werden.

7.3 Untersuchung bestrahlter Module

Nach der Untersuchung der Referenzmodule wurden nacheinander drei Module auf die Kühlvorrichtung montiert und vermessen.

Neben zwei bestrahlten Modulen wurde auch ein unbestrahltes Modul getestet. Es handelt sich dabei um ein CMS Modul aus dem äußeren Barrel des Spurdetektors mit 512 Strei-

¹DUT = device-under-test: Testmodul

fen. Der Streifenabstand beträgt $183 \mu\text{m}$. Die äußeren Abmessungen entsprechen denen der Referenzmodule.

Das Modul CMS 05211 ist ein TOB-Modul mit 768 Streifen und einem Streifenabstand von $122 \mu\text{m}$. Es stammt zusammen mit dem Modul CMS 05207 aus einem Teilchenstrahl-experiment am DESY² in Hamburg. Ziel war die Untersuchung des Signal-Rausch-Verhältnisses eines auf die erwartete LHC-Fluenz bestrahlten Sensors. Das Experiment und die Ergebnisse sind in [BDF⁺07] beschrieben. Das Modul 05211 wurde mit Protonen mit einer Energie von 26 MeV am Forschungszentrum Karlsruhe bestrahlt. Die Fluenz beträgt $\Phi_{eq} = 0,1 \cdot 10^{14} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$.

Das Modul CMS 05207 ist wie das Modul CMS 05211 ein Modul mit 768 Streifen und einem Streifenabstand von $122 \mu\text{m}$. Es wurde ebenfalls am Forschungszentrum Karlsruhe mit Protonen bestrahlt. Die Fluenz beträgt $\Phi_{eq} = 0,65 \cdot 10^{14} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ [BDF⁺07].

Die untersuchten Module und ihre Eigenschaften sind im einzelnen in Tabelle 7.5 aufgelistet.

Modulbezeichnung	Streifenanzahl	Streifenabstand [μm]	Fluenz [$\text{n}_{eq}/\text{cm}^2$]
CMS unbestrahlt	512	183	0
CMS 05211	768	122	$1 \cdot 10^{13}$
CMS 05207	768	122	$6,5 \cdot 10^{13}$

Tabelle 7.5: Übersicht der untersuchten Module

Alle im Folgenden durchgeführten Untersuchungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von -20°C durchgeführt. Einzig das unbestrahlte Modul wurde auch bei Raumtemperatur betrieben.

7.3.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Abbildung 7.7 zeigt die Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses der untersuchten Module von der Bias-Spannung. Aus dem Verlauf des Signal-Rausch-Verhältnisses wurde die Betriebsspannung der untersuchten Module für die weiteren Analysen festgelegt. Diese sind in Tabelle 7.6 zusammengefasst.

Der Ursprung des erhöhten Clusterrauschens beim Modul CMS 05211 zwischen einer Bias-Spannung von 150 V und 300 V konnte nicht ermittelt werden. In einer durchgeführten Kontrollmessung wurde das Verhalten jedoch bestätigt, so dass ein zufälliges Artefakt ausgeschlossen werden kann.

²Deutsches Elektronen Synchrotron

Modul	Bias-Spannung
TOB unbestrahlt	500V
CMS 05211	450V
CMS 05207	450V

Tabelle 7.6: Verwendete Bias-Spannungen der untersuchten Module

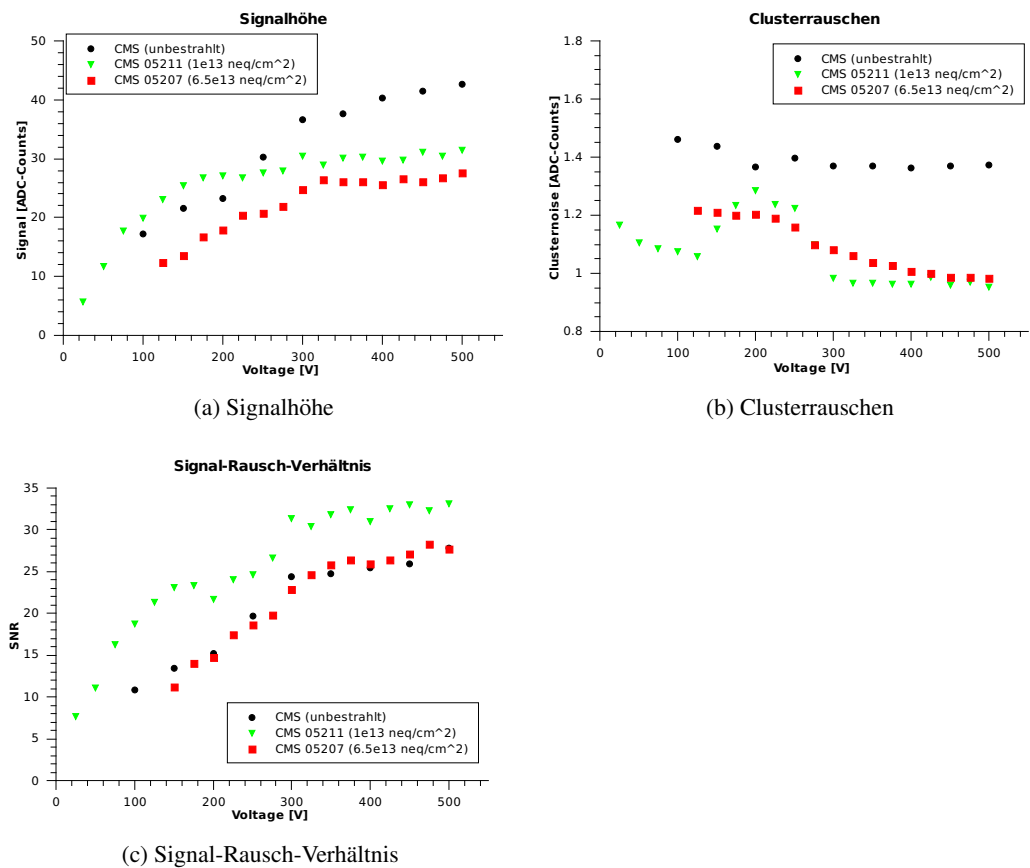


Abbildung 7.7: Abhängigkeit der Signalthöhe, des Clusterrauschens und des Signal-Rausch-Verhältnisses von der Bias-Spannung für die untersuchten Module

7.3.2 Clustergröße

Abbildung 7.8 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Clustergröße von der Bias-Spannung.

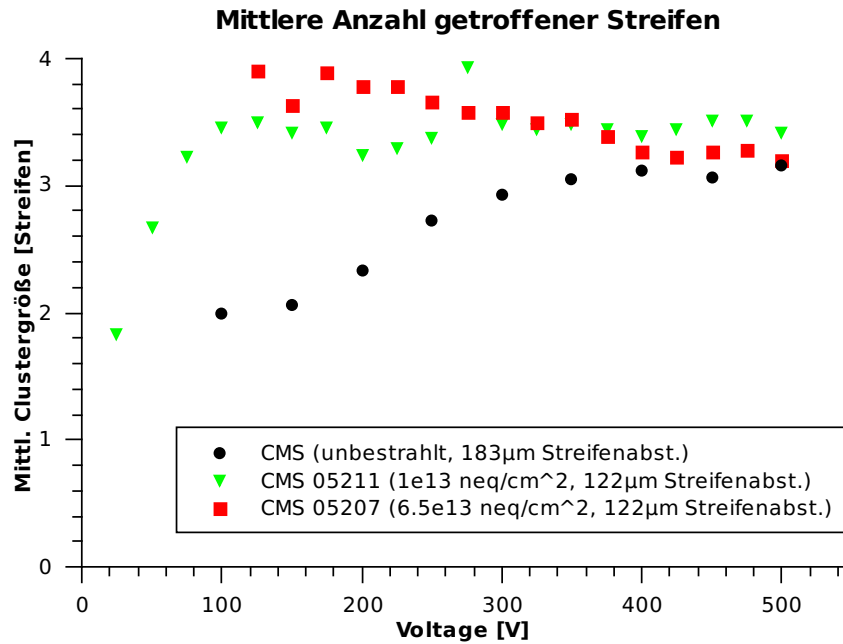


Abbildung 7.8: Abhängigkeit der Clustergröße von der Bias-Spannung

Durch den größeren Streifenabstand des unbestrahlten Moduls im Vergleich zu den beiden anderen Modulen dehnen sich die Cluster in diesem Modul über weniger Streifen aus, als bei den beiden anderen Modulen. Dies ist besonders bei kleinen Bias-Spannungen festzustellen.

7.3.3 Eta-Verteilung

Die Abbildungen 7.9 bis 7.12 zeigen die Eta-Verteilungen und die daraus berechneten Korrekturfunktionen eines der Referenzmodule und der drei untersuchten Module. Hierbei wurden nur Cluster verwendet, deren zugeordnete Teilchenspuren unter einem kleineren Einfallswinkel als 10° ins Teleskop einfielen. Wird kein Schnitt auf den Einfallswinkel verwendet, ergeben sich für alle Module deutlich gleichmäßigere Ladungsaufteilungen. Dies wird durch die größeren Cluster bei schrägem Teilchendurchgang verursacht.

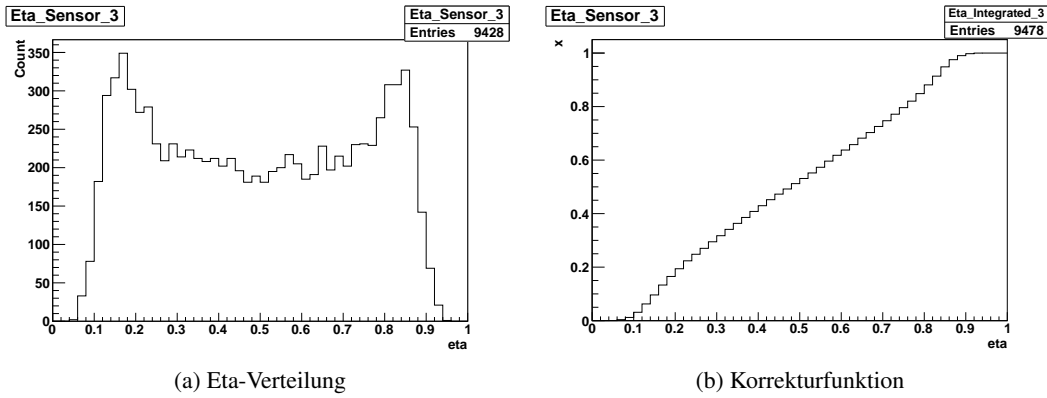


Abbildung 7.9: Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des TOB-Moduls (183 μm Streifenabst., unbestrahlt)

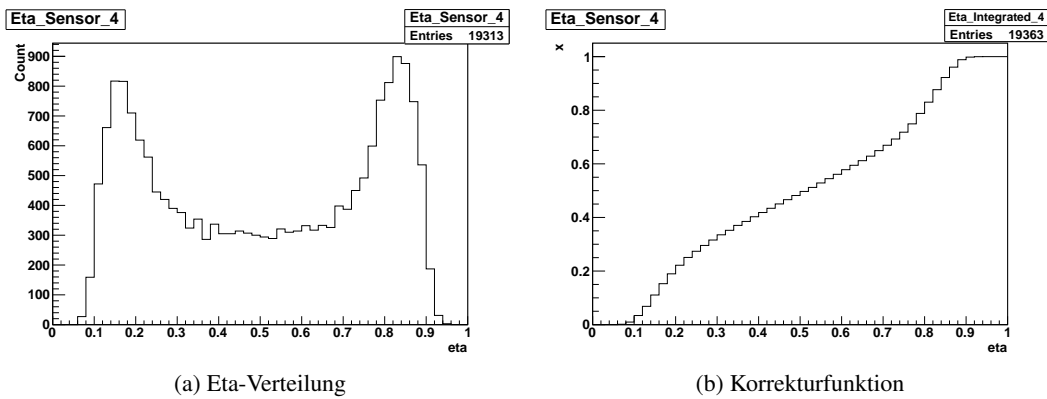


Abbildung 7.10: Eta-Verteilung und Korrekturfunktion eines Referenzmoduls (122 μm Streifenabst., unbestrahlt)

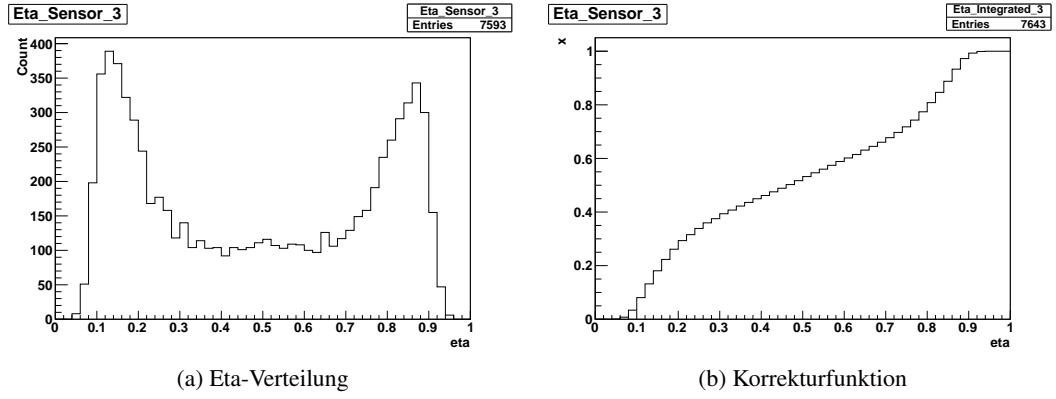


Abbildung 7.11: Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des Moduls CMS 05211 ($122\mu\text{m}$ Streifenabst., $1 \cdot 10^{13} n_{eq}/\text{cm}^2$)

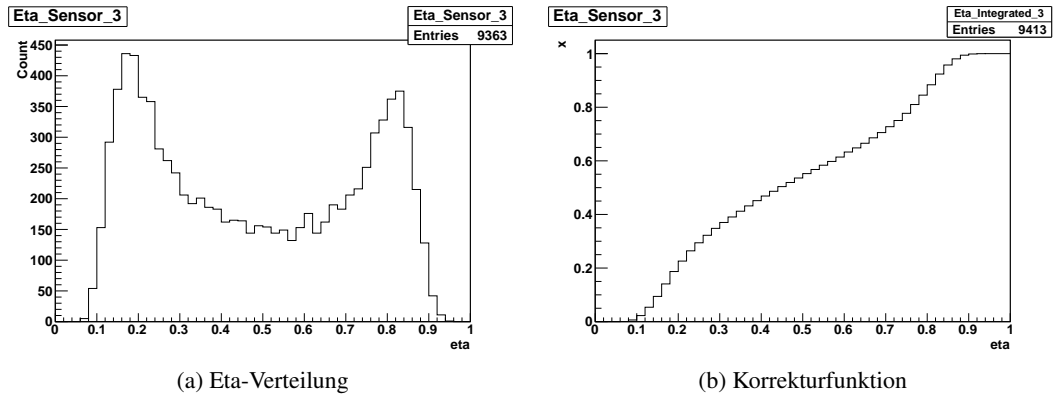


Abbildung 7.12: Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des Moduls CMS 05207 ($122\mu\text{m}$ Streifenabst., $6,5 \cdot 10^{13} n_{eq}/\text{cm}^2$)

Es ist keine deutliche Veränderung der Ladungsteilung mit der Bestrahlungsfluenz festzustellen. Der Unterschied zwischen dem unbestrahlten TOB-Modul mit einem Streifenabstand von $183\text{ }\mu\text{m}$ und den übrigen Modulen mit $122\text{ }\mu\text{m}$ Streifenabstand ist hingegen deutlich sichtbar. Das Modul mit dem größeren Streifenabstand weist eine gleichmäßigere Ladungsteilung auf, als die Module mit den engeren Streifen.

7.3.4 Ortsauflösung

Die Abbildungen 7.13, 7.14 und 7.15 zeigen die Residuenverteilungen des unbestrahlten TOB-Moduls, des Moduls CMS 05211 und des Moduls CMS 05207 bei unterschiedlicher Wahl des Schnittes auf das reduzierte χ^2 . Hierbei wurden wie bei der Untersuchung der Referenzmodule nur solche Teilchenspuren verwendet, deren Einfallswinkel in das Teleskop kleiner als 10° ist.

Die Tabellen 7.7, 7.8 und 7.9 fassen die Breiten der Residuenverteilungen der einzelnen Module zusammen. Sie zeigen auch das geometrische Mittel der Breite der Residuenverteilungen, die sich aus exklusiver und inklusiver Spuranpassung ergeben.

Die Ortsauflösung des unbestrahlten Moduls ist im Vergleich zu der des Moduls CMS 05211 um einen Faktor 1,5 schlechter. Dies ist durch den um einen Faktor 1,5 größeren Streifenabstand zu erklären.

Es ist festzustellen, dass die Ortsauflösung der Sensoren mit zunehmender Bestrahlung schlechter wird. Dies ist durch das niedrigere Signal-Rausch-Verhältnis nach Bestrahlung zu erklären (siehe Gleichung 6.15).

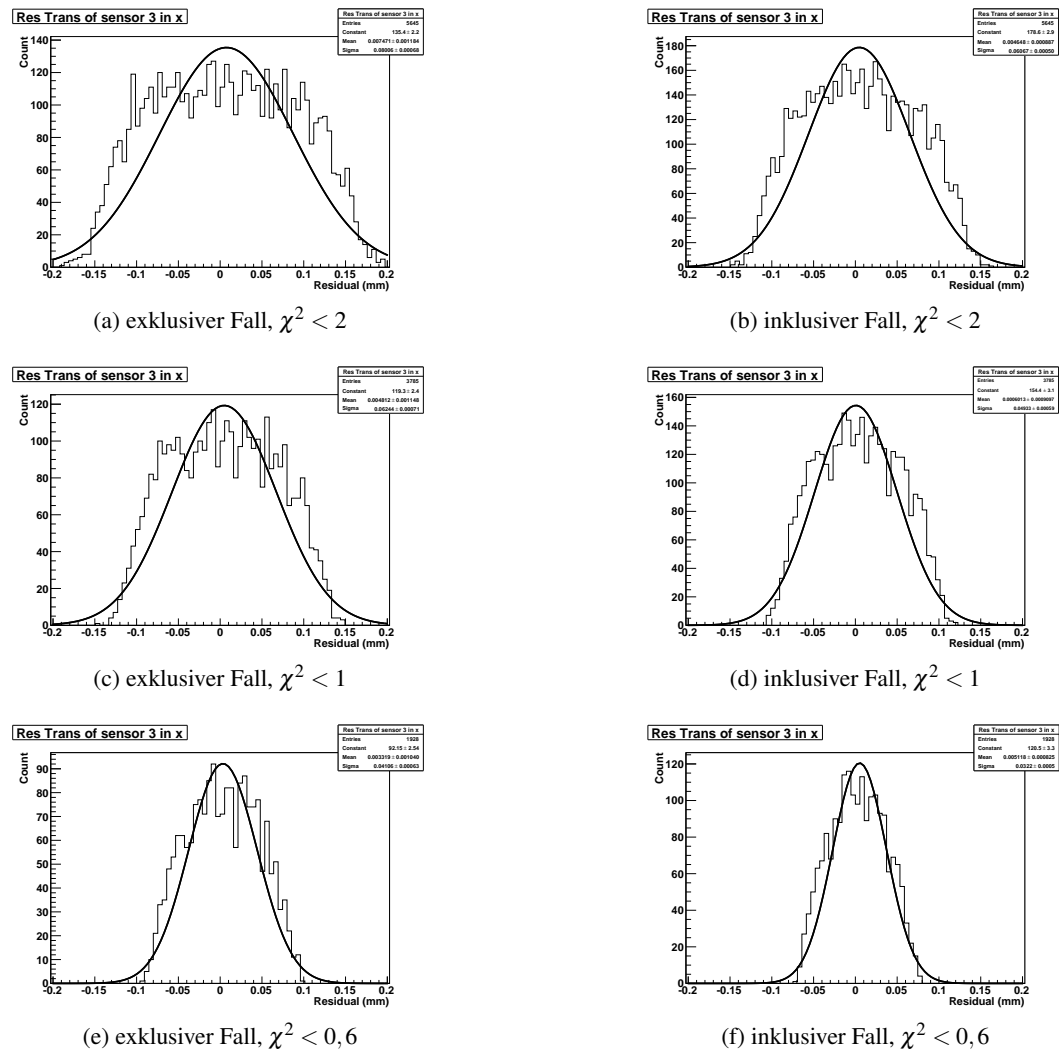


Abbildung 7.13: Unbestrahtes TOB Modul: Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

	Res. Breite (exkl.) [μm]	Res. Breite (inkl.) [μm]	Geometr. Mittel [μm]
$\chi^2 < 2$	80	61	70
$\chi^2 < 1$	62	49	56
$\chi^2 < 0,6$	41	32	36

Tabelle 7.7: Unbestrahtes TOB Modul: Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

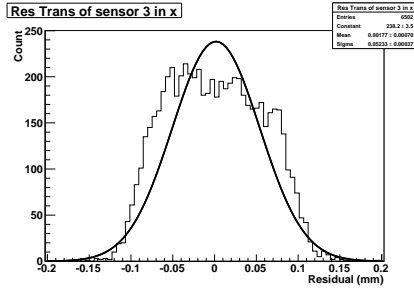
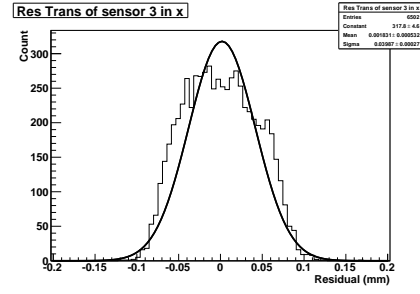
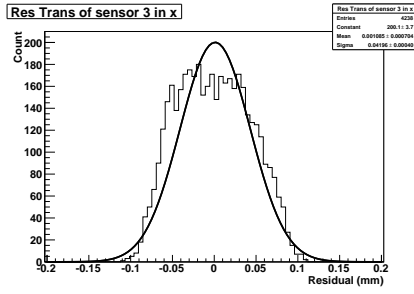
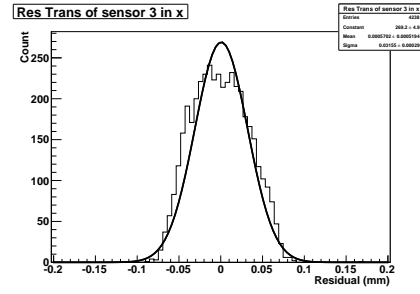
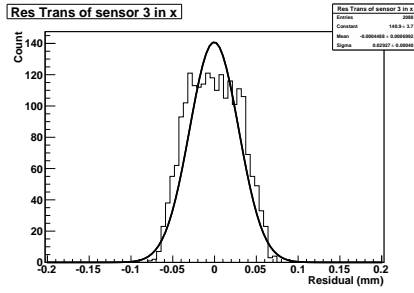
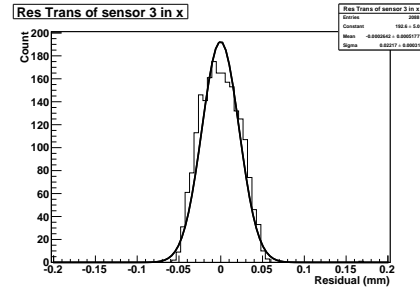
(a) exklusiver Fall, $\chi^2 < 2$ (b) inklusiver Fall, $\chi^2 < 2$ (c) exklusiver Fall, $\chi^2 < 1$ (d) inklusiver Fall, $\chi^2 < 1$ (e) exklusiver Fall, $\chi^2 < 0,6$ (f) inklusiver Fall, $\chi^2 < 0,6$

Abbildung 7.14: CMS 05211 ($1 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

	Res. Breite (exkl.) [μm]	Res. Breite (inkl.) [μm]	Geometr. Mittel [μm]
$\chi^2 < 2$	52	40	46
$\chi^2 < 1$	42	32	36
$\chi^2 < 0,6$	29	22	26

Tabelle 7.8: CMS 05211 ($1 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

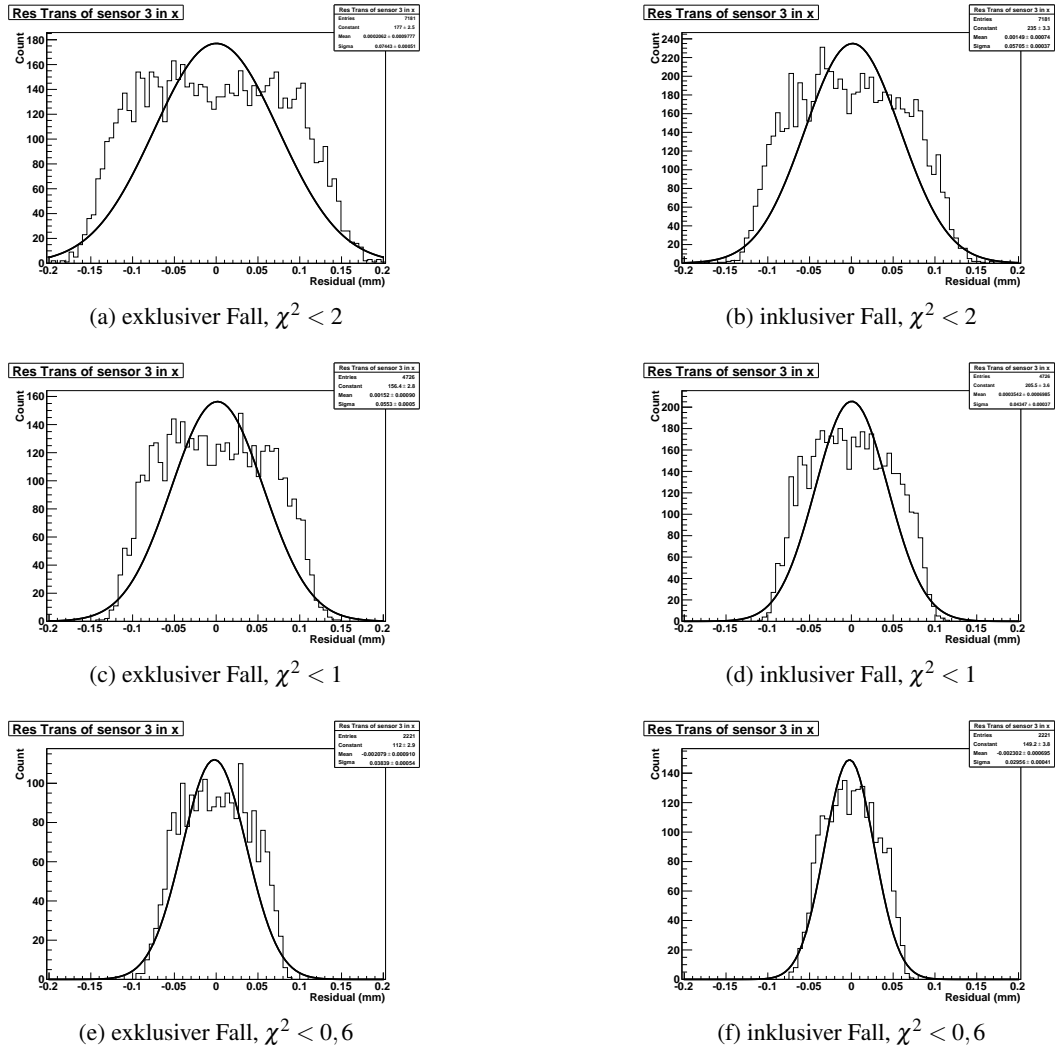


Abbildung 7.15: CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

	Res. Breite (exkl.) [μm]	Res. Breite (inkl.) [μm]	Geometr. Mittel [μm]
$\chi^2 < 2$	74	57	65
$\chi^2 < 1$	55	44	49
$\chi^2 < 0,6$	38	30	34

Tabelle 7.9: CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2

Abbildung 7.16 zeigt den Verlauf der Ortsauflösung mit der Fluenz bei unterschiedlicher Wahl des χ^2 -Schnitts. Die Ortsauflösung des unbestrahlten Moduls wurde dabei mit einem Faktor 1,5 skaliert, um die Module trotz des unterschiedlichen Streifenabstands vergleichen zu können. Die durch Gleichung 6.14 gegebene obere Schranke für die Ortsauflösung durch eine binäre Auslese wird mit einem Schnitt auf das reduzierte χ^2 von $\chi^2 < 0,6$ von allen untersuchten Modulen unterschritten. Die Messpunkte des unbestrahlten Moduls wurden bei einer Bias-Spannung von 500V aufgenommen. Die beiden bestrahlten Module wurden bei 450V betrieben.

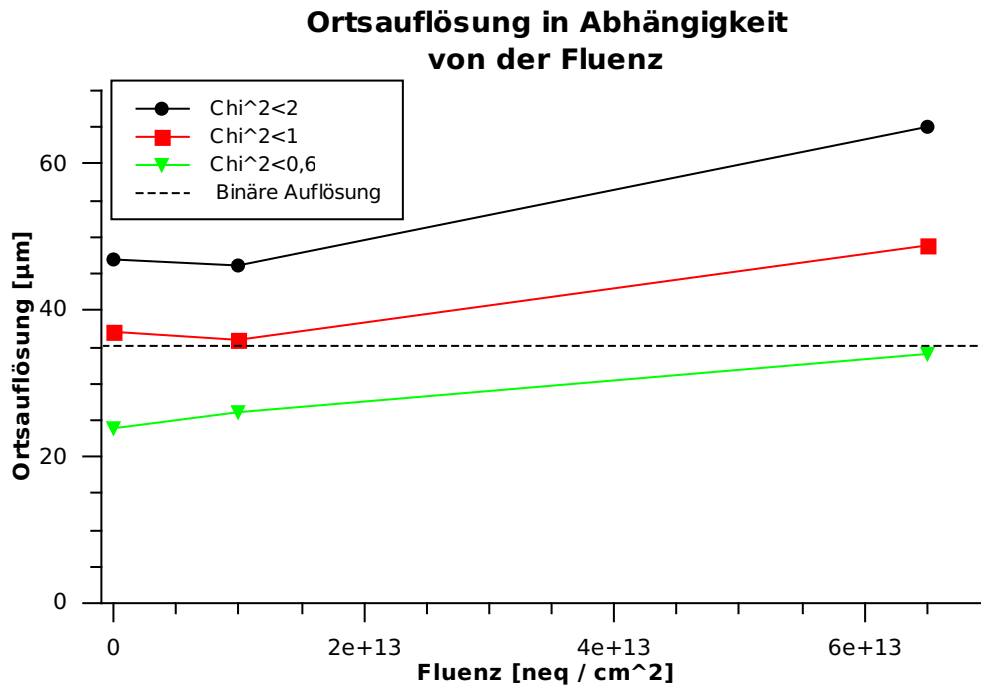


Abbildung 7.16: Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bestrahlungsfluenz

7.3.5 Temperaturabhängigkeit der Ortsauflösung

Um einen möglichen Einfluss der Temperatur auf die Ortsauflösung zu untersuchen, wurde das unbestrahlte TOB Modul sowohl bei einer Kühlschrankschranktemperatur von $+17^{\circ}\text{C}$ als auch bei -20°C betrieben und bei beiden Temperaturen jeweils die Ortsauflösung bestimmt. Tabelle 7.10 zeigt die Signalhöhe, das mittlere Clusterrauschen und das Signal-Rausch-Verhältnis bei beiden Temperaturen. In Tabelle 7.11 ist die Breite der Residuenverteilung und die daraus bestimmte Ortsauflösung bei beiden Umgebungstemperaturen und verschiedenen Schnitten auf das reduzierte χ^2 dargestellt.

Temperatur	Signal [ADC-Counts]	Clusterrauschen [ADC-Counts]	SNR [ADC-Counts]
+17°C	19,6	1,2	17
−20°C	31,2	1,32	20

Tabelle 7.10: Vergleich von Signalthöhe, Clusterrauschen und Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Kühlschranktemperatur von +17° und −20°

	Res. Breite (exkl.) [μm] (+17°C / −20°C)	Res. Breite (inkl.) [μm] (+17°C / −20°C)	Geometr. Mittel [μm] (+17°C / −20°C)
$\chi^2 < 2$	95 / 83	73 / 63	84 / 73
$\chi^2 < 1$	92 / 83	72 / 62	82 / 72
$\chi^2 < 0,6$	63 / 52	48 / 39	55 / 46

Tabelle 7.11: Unbestrahltes TOB Modul: Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall mit verschiedenem Schnitt auf das reduzierte χ^2 bei einer Kühlschranktemperatur von +17°C und −20°C

Es ist festzustellen, dass die Ortsauflösung des betrachteten Moduls bei tiefen Temperaturen etwas besser als bei Raumtemperatur ist. Dies ist durch das höhere Signal-Rausch-Verhältnis bei tiefen Temperaturen zu erklären, wie Gleichung 6.15 zeigt.

7.3.6 Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bias-Spannung

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bias-Spannung wurde die an das Modul CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$) angelegte Spannung zwischen 100V und 500V in Schritten von 100V verändert. Bei jedem Spannungsschritt wurden zwischen 35000 und 38000 Ereignisse aufgenommen und daraus die Ortsauflösung des Moduls bestimmt. Abbildung 7.17 zeigt den Verlauf der Ortsauflösung mit der Bias-Spannung. Hierbei wurde ein Schnitt auf das reduzierte χ^2 von $\chi^2 < 0,6$ angelegt.

Insbesondere bei niedriger Bias-Spannung wurden wenige Cluster gefunden, wodurch ein Alignment des untersuchten Moduls nicht möglich war. Um dennoch eine Aussage über die Ortsauflösung treffen zu können, wurden für jeden Spannungsschritt die Alignmentparameter übernommen, die aus einem größeren Datensatz desselben Moduls bestimmt wurden. Es handelt sich um den in Kapitel 7.3.4 in Abbildung 7.15 gezeigten Datensatz. Dies ist möglich, da das Testmodul zwischen den Messungen nicht ausgetauscht wurde und sich die räumliche Lage somit nicht geändert hat. Bei einer Bias-Spannung von 100V wurden dennoch so wenige Cluster gefunden, dass die Anpassung einer Gauss-Kurve an die Residuenverteilung nicht möglich war. Deshalb konnte hier die Ortsauflösung nicht bestimmt werden.

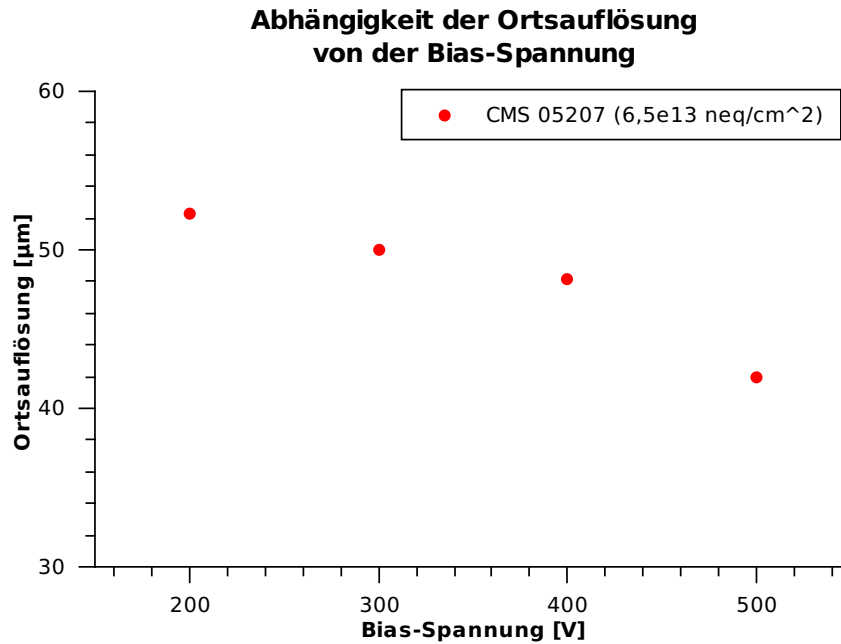


Abbildung 7.17: Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bias-Spannung

Die Ortsauflösung des Moduls verbessert sich mit steigender Bias-Spannung. Dies ist mit dem Anwachsen der Raumladungszone unterhalb der Depletionsspannung und dem damit verbundenen Anstieg des Signal-Rausch-Verhältnisses zu erklären.

7.3.7 Deconvolution-Modus

Die Auslesechips der beiden bestrahlten Module wurden auch im Deconvolution-Modus betrieben. Auf diese Weise kann das Ausgangssignal in beiden Betriebsarten verglichen werden. Der Deconvolution-Modus und die Gründe für seine Implementierung in die APVs ist in Kapitel 5.1.2 genauer beschrieben. Um die Form des Ausgangssignals zu erhalten, wurde ein Delay-Scan durchgeführt. Dabei wird das Timing der APVs ähnlich wie bei einem Latency-Scan schrittweise verschoben. Im Gegensatz zu einem Latency-Scan ist die Schrittweite beim Delay-Scan deutlich feiner. Für die hier gezeigte Analyse sind 5 ns gewählt worden. Für jeden Schritt wurden 1000 Ereignisse aufgenommen und das Signal-Rausch-Verhältnis bestimmt. Abbildung 7.18 zeigt die auf diese Weise rekonstruierte Pulsform. Die roten Punkte zeigen das Signal-Rausch-Verhältnis des Testmoduls im Deconvolution-Modus, die schwarzen Punkte zeigen das Signal-Rausch-Verhältnis der sechs Referenzmodule im Peak-Modus.

Das Ausgangssignal im Deconvolution-Modus ist deutlich kürzer als das Ausgangssignal im Peak-Modus.

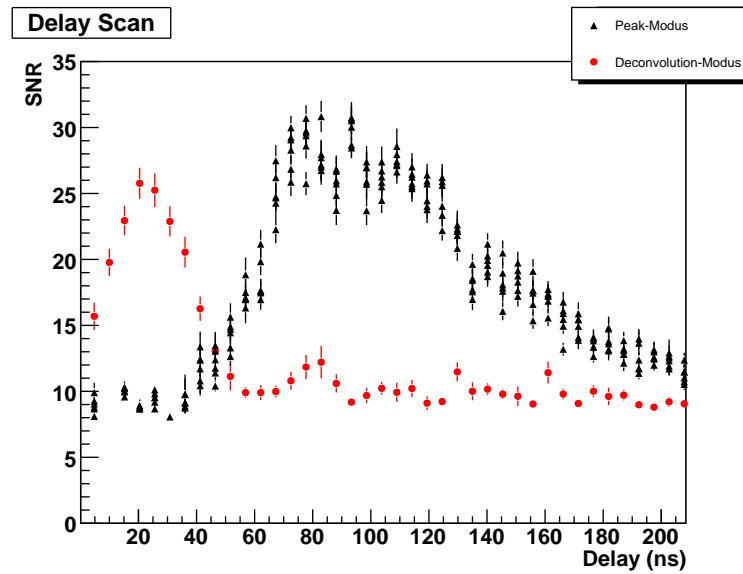


Abbildung 7.18: APV-Ausgangspulsform im Peak- und im Deconvolution Modus

Um mit dem Testmodul im Deconvolution-Modus Daten von Teilchendurchgängen aufzunehmen, muss der zeitliche Versatz der Referenzmodule im Peak-Modus an das Modul im Deconvolution-Modus angepasst werden. Das bedeutet, die Verzögerungszeiten der Module im Peak-Modus müssen so stark erhöht werden, dass die Maximalwerte der Ausgangspulse, die bei einem Delay Scan erhalten werden, zeitlich übereinander liegen. Abbildung 7.19 zeigt die zeitliche Lage der Ausgangspulse der sechs Referenzmodule im Peak-Modus und des Ausgangspulses des Moduls CMS 05207 im Deconvolution-Modus nach der Anpassung der Verzögerungszeiten.

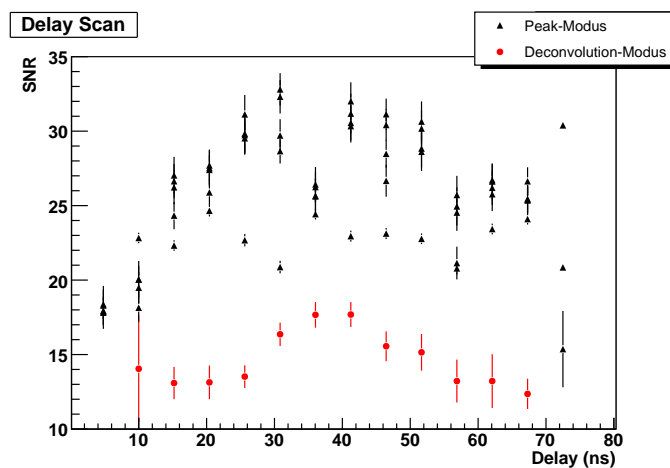


Abbildung 7.19: Delay Scan: Ausgangsimpulse sind zeitlich übereinander geschoben

Signal-Rausch-Verhältnis

Nach der korrekten Einstellung der Verzögerungszeiten wurde das Signal-Rausch-Verhältnis des Moduls CMS 05207 im Deconvolution-Modus in Abhängigkeit der angelegten Bias-Spannung untersucht. Abbildung 7.20 zeigt für beide APV-Betriebsarten die Signalthöhe, das Clusterrauschen und das Signal-Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit der Spannung.

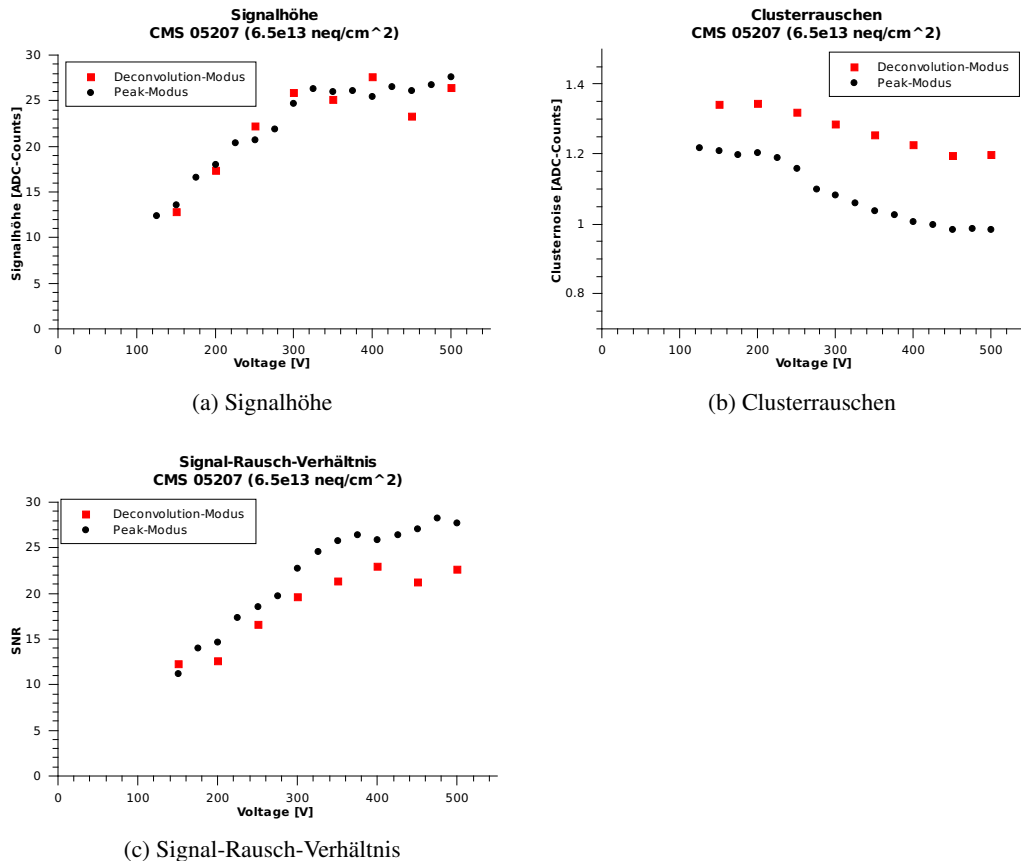


Abbildung 7.20: CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} \text{ neq/cm}^2$) - Vergleich zwischen Deconvolution-Modus und Peak-Modus

Das Signal-Rausch-Verhältnis liegt bei einer Bias-Spannung von 500 V im Deconvolution-Modus mit 22 deutlich unter dem Signal-Rausch-Verhältnis im Peak-Modus, wo das SNR 28 beträgt. Dies ist auf das erhöhte Rauschen der Auslesechips im Deconvolution-Modus zurückzuführen, wie Abbildung 7.20b zeigt. Auf die Signalthöhe hat die Wahl der Betriebsart der Auslesechips keinen Einfluss, wie aus Abbildung 7.20a hervorgeht.

8 Zusammenfassung

Der Spurdetektor des CMS-Experiments ist einer hohen Strahlenbelastung ausgesetzt. Nach einer Betriebszeit von 10 Jahren werden sich die Eigenschaften der Detektormodule so stark verändert haben, dass ein zuverlässiger Betrieb nicht mehr möglich sein wird. Durch das Upgrade des LHC zum SLHC und die damit verbundene Steigerung der Luminosität auf $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ wird insbesondere der Spurdetektor noch höheren Teilchenflüssen ausgesetzt werden. Aus diesem Grund werden gegenwärtig neue Sensormaterialien und Modulgeometrien auf ihre Strahlenhärte für eine mögliche Verwendung im Spurdetektor des CMS-Experiments am SLHC untersucht. Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Konstruktion eines Teleskopaufbaus, um mit geladenen kosmischen Teilchen die Ortsauflösung neu entwickelter Sensoren untersuchen zu können. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung einer Kühlvorrichtung für das zu untersuchende Modul, da insbesondere bei hochbestrahlten Sensoren die Verlustwärme abgeführt werden muss, um ein Aufheizen des Sensormaterials zu verhindern.

Zur Untersuchung des Einflusses der Vielfachstreuung kosmischer Teilchen an den Sensoren des Teleskops und den Luftmolekülen wurde eine Simulation des Teleskopaufbaus mit Hilfe der Geant4 Simulationsumgebung durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass eine möglichst dichte Anordnung der Module des Teleskops notwendig ist.

Desweiteren wurde der Eta-Algorithmus als Rekonstruktionsalgorithmus in das zur Datenanalyse verwendete Programm SiBTStAR integriert. Durch den Eta-Algorithmus wird die nichtlineare Ladungsteilung zwischen den Streifen analysiert. Die gewonnene Information fließt in die Rekonstruktion der Position des Teilchendurchgangs mit ein.

Nach der Konstruktion der Kühlvorrichtung und dem Aufbau der Teleskopanordnung im Reinraum des IEKP wurde zunächst die Leistungsfähigkeit von Teleskop und Kühlanordnung untersucht. Teilchendurchgänge können durch die optimierte Anordnung der Referenzmodule des Teleskops mit einer Ortsauflösung von unter $30 \mu\text{m}$ gemessen werden. Wird zur Verringerung des Einflusses der Vielfachstreuung durch einen Schnitt auf das reduzierte χ^2 eine engere Auswahl der verwendeten Teilchenspuren getroffen, ist die Rekonstruktion mit einer Ortsauflösung von unter $20 \mu\text{m}$ möglich. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Kühlanordnung wurde ein Temperaturfühler auf der Rückseite eines unbestrahlten Sensors angebracht. Dadurch konnte gezeigt werden, dass durch die Peltierkühlung die Temperatur eines unbestrahlten Siliziumsensors im Betrieb auf unter -40°C gehalten werden kann.

Um den Teleskopaufbau zu testen, wurden drei Module vermessen. Es handelt sich dabei um Module, wie sie im CMS-Spurdetektor eingesetzt werden. Neben einem unbestrahl-

ten Modul wurden auch zwei bestrahlte Module mit Fluenzen von $1 \cdot 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ und $6,5 \cdot 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ untersucht. Dies entspricht ungefähr der Bestrahlungsfluenz, der die Module im äußeren Barrel-Bereich des CMS Spurdetektors in 10 Jahren Betriebszeit am LHC ausgesetzt sein werden.

Untersucht wurden das Signal-Rausch-Verhältnis, die mittlere Anzahl der getroffenen Streifen, die Form der Eta-Verteilung sowie die Ortsauflösung aller drei Module. Darüber hinaus wurde die Temperaturabhängigkeit der Ortsauflösung sowie die Abhängigkeit der Ortsauflösung von der angelegten Sperrspannung jeweils an einem Modul untersucht.

Die ermittelte Ortsauflösung ist bei allen drei Modulen schlechter als die durch den Streifenabstand und eine binäre Auslese gegebene obere Grenze von $\frac{p}{\sqrt{12}} = \frac{122\mu m}{\sqrt{12}} \approx 35\mu m$. Dies ist auf die Begrenzung der Ortsauflösung durch Vielfachstreuung zurückzuführen. Durch einen Schnitt auf das reduzierte χ^2 und die damit verbundene Auswahl wenig gestreuter Teilchenspuren wird die durch die binäre Auslese gegebene Grenze bei allen drei Modulen unterschritten. Die auf diese Weise ermittelte Ortsauflösung liegt nach der Auswahl von Teilchenspuren mit $\chi^2 < 0,6$ für das unbestrahlte Modul bei $24\mu m$ und für das am höchsten bestrahlte Modul bei $34\mu m$.

Damit ist das Teleskop geeignet, um die Ortsauflösung hochbestrahlter Streifensensoren mit einem Streifenabstand der Größenordnung $100\mu m$ zu untersuchen.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Müller danke ich für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am IEKP anzufertigen und für die interessante Aufgabenstellung. Herrn Prof. Wim de Boer danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Meinem Betreuer Dr. Alexander Dierlamm danke ich für die Unterstützung und die vielen Hinweise während der gesamten Diplomarbeit.

Für die große Unterstützung bei der mechanischen Konstruktion des Teleskops danke ich Tobias Barvich. Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt danke ich für die gute Ausführung meiner Aufträge.

Bei Dr. Martin Frey bedanke ich mich für die inhaltliche und sprachliche Korrektur dieser Diplomarbeit.

Dr. Hans-Jürgen Simonis danke ich für die Unterstützung bei allen Netzwerk- und PC-Problemen.

Frau Brigitte Schulz und Frau Diana Fellner-Thedens danke ich für die Bewältigung der bürokratischen Angelegenheiten.

Bei meinen Bürokollegen Melanie Heil, Robert Eber, Jochen Ebert, Moritz Guthoff und Christoph Rühle bedanke ich mich für die gute Arbeitsatmosphäre und die interessanten Diskussionen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Barbara und Dr. Hans Georg Nürnberg dafür, dass sie mir dieses Studium ermöglichen haben.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lage der LHC-Experimente [cer]	10
2.2	Querschnitt durch den CMS-Detektor [CMS]	11
2.3	CMS-Detektor [CMS]	12
2.4	Schematischer Aufbau des Silizium Spurdetektors [Blo07]	13
3.1	Fluss der geladenen Komponente der kosmischen Strahlung [Kol07]	15
3.2	Differentieller Fluss kosmischer Myonen auf Meereshöhe [Blo07]	16
3.3	Mittlerer Streuwinkel	17
4.1	Diamantstruktur [Kit06]	19
4.2	Aufspaltung der Energieniveaus von Silizium [SH03]	20
4.3	Vereinfachte Bandstruktur von Metallen, Halbleitern und Isolatoren	21
4.4	Donator und Akzeptorverteilung im pn-Übergang	23
4.5	Bandstruktur eines pn-Übergangs [Har09]	23
4.6	Schematischer Aufbau eines Silizium-Streifensensors	25
4.7	Depletionsspannung in Abhängigkeit der Fluenz [Mol99]	27
5.1	Grundlegender Aufbau des Teleskops	29
5.2	TOB Modul mit 512 Streifen	30
5.3	Hybrid-Platine	31
5.4	Verarbeitungskette eines APV-Kanals [Fri01]	32
5.5	APV-Ausgangssignal im Peak- und Deconvolution-Modus [Fri01]	32
5.6	Analog-Opto-Hybrid	33
5.7	Schematische Darstellung des Auslösesystems	35
5.8	Oberfläche der Temperaturregelung der Peltierkühlung	36
5.9	Energieverteilung der simulierten Myonen	38
5.10	Ortsauflösung in Abhängigkeit des Modulabstands (Simulation)	39
5.11	Ortsauflösung (Simulation) in Abhängigkeit des Kippwinkels	40
5.12	Ortsauflösung (Simulation) in Abhängigkeit des Drehwinkels	40
5.13	CAD-Bild des Teleskops	41
5.14	Teleskopaufbau im Kühlschranks mit ausgeschwenkter Kühlvorrichtung	42
5.15	Aufbau des Teleskopsystems	43
5.16	Aufbau des Teleskopsystems	44
5.17	CAD-Bild der Kühlvorrichtung	45
5.18	Kühlvorrichtung mit aufgeschraubtem Modul	46
6.1	Pedestalverteilung eines Moduls mit 768 Streifen	48

6.2	Rauschverteilung eines Moduls mit 768 Streifen	49
6.3	Angepasste Landau-Gauß-Verteilung	51
6.4	Eta-Verteilung und die daraus bestimmte Korrekturfunktion	53
6.5	Residuum als senkrechter Abstand zwischen Cluster und Teilchenspur . . .	54
6.6	Breite der Residuenverteilung im exklusiven Fall und im inklusiven Fall . .	55
6.7	Verteilung der reduzierten χ^2 -Werte	56
6.8	Mittelwert der Residuenverteilung über Position auf dem Sensor	57
6.9	Anzahl der in einem Teilbereich gefundenen Cluster	58
7.1	Signal-Rausch-Verhältnis der Referenzmodule	61
7.2	Temperaturverlauf beim Abkühlen der Kühlvorrichtung	62
7.3	PT-1000 Temperaturfühler auf Sensorrückseite	62
7.4	Siliziumtemperatur in Abhängigkeit der Temperatur der Kühlplatte	63
7.5	Clustergröße in Abhängigkeit der Bias-Spannung (Referenzmodule)	64
7.6	Referenzmodul (Sensor 0): Breite der Residuenverteilung	65
7.7	Signal-Rausch-Verhältnis der untersuchten Module	69
7.8	Abhängigkeit der Clustergröße von der Bias-Spannung	70
7.9	Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des TOB-Moduls	71
7.10	Eta-Verteilung und Korrekturfunktion eines Referenzmoduls	71
7.11	Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des Moduls CMS 05211	72
7.12	Eta-Verteilung und Korrekturfunktion des Moduls CMS 05207	72
7.13	Unbestrahltes TOB Modul: Breite der Residuenverteilung	74
7.14	CMS 05211 ($1 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung	75
7.15	CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung	76
7.16	Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bestrahlungsfluenz	77
7.17	Abhängigkeit der Ortsauflösung von der Bias-Spannung	79
7.18	APV-Ausgangspulsform im Peak- und im Deconvolution Modus	80
7.19	Delay Scan: Ausgangsimpulse sind zeitlich übereinander geschoben	80
7.20	CMS 05207 - Vergleich Deconvolution-Modus mit Peak-Modus	81

Tabellenverzeichnis

3.1	Strahlungslänge der Siliziumsensoren, Materialeigenschaften aus [Y ⁺ 06]	17
5.1	Reglerparameter der Temperaturregelung	46
7.1	Referenzmodul (Sensor 0): Breite der Residuenverteilung	65
7.2	Vergleich der Ortsauflösung des Teleskops mit dem [Sus09] Aufbau	66
7.3	Ortsauflösung: Schwerpunktalgorithmus vs. Eta-Algorithmus	66
7.4	Gefundene Alignmentparameter aus verschiedenen Datensätzen	67
7.5	Übersicht der untersuchten Module	68
7.6	Verwendete Bias-Spannungen der untersuchten Module	69
7.7	Unbestrahltes TOB Modul: Breite der Residuenverteilung	74
7.8	CMS 05211 ($1 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung	75
7.9	CMS 05207 ($6,5 \cdot 10^{13} n_{eq}/cm^2$): Breite der Residuenverteilung	76
7.10	Signal-Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit der Temperatur	78
7.11	Breite der Residuenverteilung bei Kühlschranktemperatur $+17^\circ C$ und $-20^\circ C$	78

Literaturverzeichnis

- [ALI] *ALICE - A Large Ion Collider Experiment*. <http://aliceinfo.cern.ch/>.
- [ATL] *The ATLAS Experiment*. <http://atlas.web.cern.ch/>.
- [BBB⁺03] BAUERDICK, L. A. T., E. BORSATO, C. BURGARD, T. CARLI, R. CARLIN, M. CASARO, V. CHIOCHIA, F. DAL CORSO, D. DANNHEIM, A. GARFAGNINI, A. KAPPES, R. KLANNER, E. KOFFEMAN, B. KOPPITZ, U. KÖTZ, E. MADDOX, M. MILITE, M. MORITZ, J. S. T. NG, M. C. PETRUCCI, I. REDONDO, J. RAUTENBERG, H. TIECKE, M. TURCATO, J. J. VELTHUIS und A. WEBER: *Beam test of silicon strip sensors for the ZEUS micro vertex detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 501(2-3):340 – 358, 2003.
- [BCF⁺00] BOEZIO, M., P. CARLSON, T. FRANCKE, N. WEBER, M. SUFFERT, M. HOF, W. MENN, M. SIMON, S. A. STEPHENS, R. BELLOTTI, F. CAFAGNA, M. CIRCELLA, C. DE MARZO, N. FINETTI, P. PAPINI, S. PICCARDI, P. SPILLANTINI, M. RICCI, M. CASOLINO, M. P. DE PASCALE, A. MORSELLI, P. PICOZZA, R. SPARVOLI, G. BARBIELLINI, P. SCHIAVON, A. VACCHI und N. ZAMPA: *Measurement of the flux of atmospheric muons with the CAPRICE94 apparatus*. Phys. Rev. D, 62(3):032007, Jul 2000.
- [BDF⁺07] BLEYL, M., M. DRAGICEVIC, M. FREY, F. HARTMANN, B. HEGNER, J. HRUBEC, M. KRAMMER, P. SCHLEPER, G. STEINBRÜCK, M. STOYE und T. WEILER: *Signal-to-noise measurements on irradiated CMS tracker detector modules in an electron testbeam*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 583(1):169 – 172, 2007. Proceedings of the 6th International Conference on Radiation Effects on Semiconductor Materials, Detectors and Devices - RESMDD 2006.
- [BKL⁺83] BELAU, E., R. KLANNER, G. LUTZ, E. NEUGEBAUER, H.J. SEEBRUNNER, A. WYLIE, T. BÖHRINGER, L. HUBBELING, P. WEILHAMMER, J. KEMMER, U. KÖTZ und M. RIEBESELL: *Charge collection in silicon strip detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 214(2-3):253 – 260, 1983.

- [Blo07] BLOCH, CHRISTOPH: *Studies for the Commissioning of the CERN CMS Silicon Strip Tracker*. Doktorarbeit, Technische Universität Wien, 12 2007. CERN-THESIS-2008-004.
- [Bra] BRAUER, RICHARD: *CMS Tracker offline analysis software*. <http://brauer.web.cern.ch/brauer/ana/index.html>.
- [Bra07] BRAUER, RICHARD: *Integration of the End Cap TEC+ of the CMS Tracker*. <http://www1b.physik.rwth-aachen.de/~kolleg/fileadmin/data/gk/de/badhonnef/2007/Brauer.pdf>, 2007.
- [CDD⁺05] CARNEGIE, R.K., M.S. DIXIT, J. DUBEAU, D. KARLEN, J.-P. MARTIN, H. MES und K. SACHS: *Resolution studies of cosmic-ray tracks in a TPC with GEM readout*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 538(1-3):372 – 383, 2005.
- [cer] CERN - *The European Organisation for Nuclear Research*. <http://www.cern.ch>.
- [CMS] *The Compact Muon Solenoid Experiment*. <http://cms.web.cern.ch>.
- [Coo] *The Louvain Cooling Plant HOWTO*. <http://www.fynu.ucl.ac.be/he/cms/activities/tracker/CoolingPlant/>.
- [Dir03] DIRKES, GUIDO: *Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Qualitätssicherung von CMS Silizium-Mikrostreifenspurdetektormodulen*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 6 2003. IEKP-KA 2003-18.
- [EL08] EVANS, LYN und LUCIE LINSEN: *The Super-LHC is on the starting blocks*. CERN Courier, (6):17, 18, July/August 2008.
- [Fre04] FREY, MARTIN: *Studien zur Langzeitstabilität und Qualität von Siliziumstreifensensoren für das CMS-Experiment*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 11 2004.
- [Fri01] FRIEDL, MARKUS: *The CMS Silicon Strip Tracker and its Electronic Readout*. Doktorarbeit, Vienna University of Technology, 5 2001.
- [Fur06] FURGERI, ALEXANDER: *Qualitätskontrolle und Bestrahlungsstudien an CMS Siliziumstreifensensoren*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 7 2006. IEKP-KA/2005-1.
- [gea] *Geant4*. <http://www.geant4.org>.
- [Har09] HARTMANN, FRANK: *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-25094-4.
- [Hof08] HOFFMANN, KARL-HEINZ: *Vorbereitende Arbeiten zur Qualitätskontrolle zukünftiger Halbleiterdetektoren in Hochenergieexperimenten*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 4 2008. IEKP-KA/2008-9.

- [Kit06] KITTEL, CHARLES: *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg, München, 14., überarb. und erw. Aufl. / [die 14. dt. Ausg. wurde neu bearb. und aktualisiert von Siegfried Hunklinger] Auflage, 2006. Aus dem Engl. übers., ISBN: 3-486-57723-9.
- [Kol07] KOLANOSKI, HERMANN: *Einführung in die Astroteilchenphysik*. <http://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0607/skripte/cosmics01.pdf>, 2007. Skript zur Vorlesung.
- [Led06] LEDERMANN, BERNHARD: *Entwicklungsstudien für den ILC: Messungen und Simulationen für eine Zeit-Projektionskammer mit GEM-Technologie*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe(TH), 11 2006. IEKP-KA/2006-13.
- [LHC] *The Large Hadron Collider beauty experiment*. <http://lhcb.web.cern.ch/>.
- [Lin03] LINDSTRÖM, GUNNAR: *Radiation damage in silicon detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 512(1-2):30 – 43, 2003. Proceedings of the 9th European Symposium on Semiconductor Detectors: New Developments on Radiation Detectors.
- [Lut99] LUTZ, GERHARD: *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer, 1999.
- [Mil] MILITARU, OTILIA: *SlowControl for TEC petal long-term tests*. <http://www.fynu.ucl.ac.be/users/o.militaru/SlowControl-petaltest.html>.
- [Mol99] MOLL, MICHAEL: *Radiation Damage in Silicon Particle Detectors*. Doktorarbeit, Universität Hamburg, 1999.
- [Mül08] MÜLLER, THOMAS: *Der Large Hadron Collider - Die Entdeckungsmaschine*. Physik in unserer Zeit, 39:78–85, 2008.
- [Nas07] NASH, J.: *CMS Expression of Interest in the SLHC*, 3 2007. CERN/LHCC 2007-014, LHCC-G-131.
- [Neu09] NEULAND, MAIKE: *Untersuchungen der Kenngrößen von hochbestrahlten Magnetic-Czochralski-Siliziumstreifensensoren im Rahmen des SLHC-Projekts*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 3 2009. IEKP-KA/2009-12.
- [PRSZ09] POVH, BOGDAN, KLAUS RITH, CHRISTOPH SCHOLZ und FRANK ZETSCHKE (Herausgeber): *Teilchen und Kerne : Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 8 Auflage, 2009. ISBN: 978-3-540-68075-8.
- [qt3] *Qt - A cross-platform application and UI framework*. <http://qt.nokia.com/>.

- [Rad09] RADICCI, VALERIA: *CMS pixel detector upgrade*. Journal of Instrumentation, 4(03):P03022, 2009.
- [ROO] *ROOT — A Data Analysis Framework*. <http://root.cern.ch>.
- [SH03] SAPOVAL, BERNARD und CLAUDINE HERMANN: *Physics of Semiconductors*. Springer, 2003.
- [Sus09] SUSLOPAROVA, ANNA: *Aufbau einer Siliziumstreifen-Höhenstrahlteststation für Detektorstudien*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 2 2009. IEKP-KA/2009-5.
- [Y⁺06] YAO, W.-M. et al.: *Review of Particle Physics*. Journal of Physics G, 33:1+, 2006.