

# Charakterisierung von Mikrostreifen-Sensormodulen

Diplomarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Physiker

vorgelegt von

**Felix Krüger**

geboren am 29.11.1983 in Weimar

Institut für Kern- und Teilchenphysik  
Fachrichtung Physik  
Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften  
der Technischen Universität Dresden

2009

1. Gutachter : Prof. Dr. Hartwig Freiesleben

2. Gutachter : Prof. Dr. Kai-Thomas Brinkmann

Datum des Einreichens der Arbeit: 27.03.2009



## **Zusammenfassung**

In Rahmen dieser Arbeit wurde eine Teststation zur Charakterisierung von Mikrostreifen-Sensormodulen aufgebaut. Es wird genauer auf das Hardware- und Softwaredesign eingegangen. Einige Kriterien zur Charakterisierung wurden entwickelt. Daraus konnten wichtige Schritte für eine mögliche Qualitätssicherung abgeleitet werden. Diese umfasst Funktionstests der Module und das sinnvolle Archivieren der entstandenen Daten. Abschließend werden einige Optionen aufgeführt, die Teststation zu erweitern und somit die Charakterisierung der Module zu verbessern.

## **Abstract**

Within the scope of this thesis a test station has been set up to characterize microstrip sensor modules. The Design of the hardware and software is explained in detail. Several criteria for the characterization were developed. With the help of these criteria important steps for a possible quality management were extrapolated. The quality management includes function tests and sensible archiving of data produced. Finally, several options are presented how the test station could be enhanced and how the characterization of the modules could be improved.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Das PANDA -Experiment . . . . .	3
1.2.1 Der PANDA -Detektor . . . . .	4
1.2.2 Der Micro-Vertex-Detektor . . . . .	7
Doppelseitiger Siliziumstreifendetektor (DSSD) . . . . .	7
<b>2 Siliziumstreifendetektoren</b>	<b>9</b>
2.1 Silizium als Halbleiterdetektormaterial . . . . .	9
2.1.1 Der p-n-Übergang . . . . .	10
2.1.2 Depletionsspannung . . . . .	11
2.1.3 Siliziumstreifensensoren . . . . .	13
Teleskopsensoren der Teststation . . . . .	14
2.2 Energieverlustmessung . . . . .	15
<b>3 Aufbau einer Teststation für Silizium-Streifensensoren</b>	<b>18</b>
3.1 Überblick . . . . .	18
3.1.1 Testplatz . . . . .	19
Hochspannung . . . . .	21
Digitalisierung . . . . .	21
3.1.2 Der Frontend Chip APV25 . . . . .	22
APV25 Register . . . . .	23
3.1.3 Trigger und Datenausgabe . . . . .	24
3.2 Steuerung der Teststation . . . . .	26
3.2.1 Software . . . . .	27
Pedestalkorrektur . . . . .	28
Suche nach Clustern . . . . .	30
<b>4 Charakterisierung der Sensormodule</b>	<b>32</b>
4.1 Elektrische Charakterisierung . . . . .	32
4.2 Bestimmung wichtiger Betriebsparameter . . . . .	33
4.2.1 APV25-Registereinstellungen . . . . .	33
4.2.2 Bestimmung der Depletionsspannung . . . . .	34
Ausbildung der Depletionszone . . . . .	37

4.3	Interne Kalibration . . . . .	38
4.4	Messungen mit ionisierender Strahlung . . . . .	38
4.5	Qualitätssicherung . . . . .	41
4.5.1	Funtionstest . . . . .	41
4.5.2	Archivierung der Moduleigenschaften . . . . .	42
	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>44</b>
	<b>A Ergänzendes zur Software der Teststation</b>	<b>46</b>
A.1	Extrahieren der Frames aus dem Datenstrom . . . . .	46
A.2	Grafische Oberfläche der Software . . . . .	49
	<b>B APV25-Registerscans</b>	<b>52</b>
	<b>C Datenbankzugriff über Webfrontend</b>	<b>54</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>III</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>IV</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

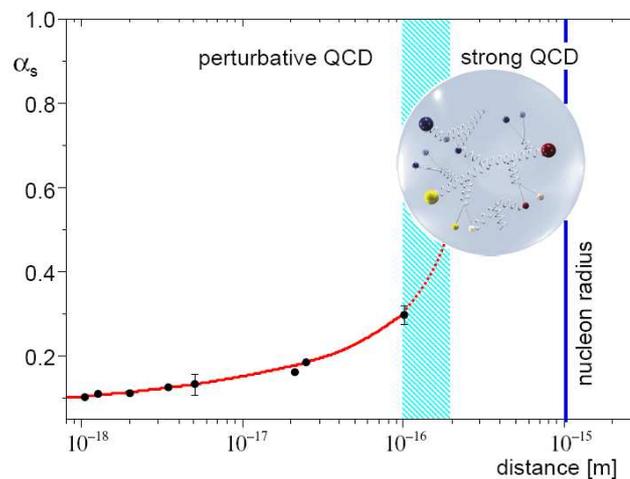
Soweit heute bekannt, bestimmt die starke Wechselwirkung die tiefste Schicht im Aufbau der Materie. Sie ist verantwortlich für die Struktur der aus Quarks bestehenden Nukleonen und der aus Nukleonen bestehenden Atomkerne. Die Starke Wechselwirkung ist eine der fundamentalen Wechselwirkungen der Natur. Außer ihr gibt es noch die elektroschwache und gravitative Wechselwirkung. Diese lassen sich aufgrund ihrer langreichweitigen Potentiale gut studieren. Die schwache hat wie die starke Wechselwirkung ein kurzreichweitiges Potential. Deshalb ist es nötig große Beschleunigeranlagen zu bauen, um hochenergetische Teilchen zu erzeugen, da sich kleine Strukturen nur mit sehr hohen Energien auflösen lassen. Das heißt, die De-Broglie-Wellenlänge  $\lambda = h/p$  der hochenergetischen Teilchen muss in der Größenordnung der aufzulösenden Struktur sein [PRSZ97]. Aus der Analyse der Teilchenreaktionen können dann Rückschlüsse über das Potential gezogen werden. So kann man die Wechselwirkungen im Standardmodell der Teilchenphysik beschreiben. Dieses ist eine allumfassende Theorie über die kondensierte Materie in der Teilchenphysik. Sie behandelt die Quantenelektrodynamik (QED), welche eine Quantenfeldtheorie zur Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung ist. Die QED kann man verallgemeinern zur Behandlung der elektroschwachen Wechselwirkung. Die starke Wechselwirkung, also das Zusammenwirken von Quarks und den assoziierten Austauschpartikeln den Gluonen, lässt sich in Ansätzen mit der Quantenchromodynamik (QCD) beschreiben. Die mit der starken Wechselwirkung verbundenen Phänomene werden eher durch spezifisch vereinfachte Ansätze und durch effektive Theorien beschrieben. Die gravitative Wechselwirkung lässt sich mit der allgemeinen Relativitätstheorie behandeln, da es noch keine Quantentheorie zur Gravitation gibt.

Im Aufbau der stark wechselwirkenden Materie zu Nukleonen und Atomkernen treten die Quarks als fundamentale Bausteine auf. Quarks können verschiedene Farben annehmen. Diese Farben haben nichts mit den Farben an sich zu tun, sondern sind als abstrakte Quantenzahl aufzufassen, ähnlich der elektrischen Ladung. Die elektrische Ladung hat zwei Zustände, positiv und negativ. Die Farbladung kann die drei Farben rot, grün und blau annehmen. Objekte die aus Quarks zusammengesetzt sind, sind im-

mer farbneutral. Das heißt auch, dass es zu jeder Farbe auch eine Antifarbe gibt. So ist es möglich, Teilchen aus zwei Quarks, den Mesonen, oder drei Quarks, den Baryonen zusammen zusetzen. Es sind auch Konfigurationen mit mehr als drei Quarks möglich, doch gibt es dafür bis jetzt noch keine Evidenzen.

Die Übermittler, oder besser, die Träger der starken Wechselwirkung sind die Gluonen. Das sind masselose neutrale Teilchen, die selber Farb- und Antifarbladung tragen. Durch diese Eigenschaft unterliegen die Gluonen selbst wieder der starken Wechselwirkung. Diese Selbstwechselwirkung ermöglicht es theoretisch, Teilchen aus Gluonen zu formen. Glueballs sind gebundene Systeme, die nur aus Gluonen zusammengesetzt sind. Hybrids sind gebundene Systeme aus Gluonen und Quarks. Auch hierfür gibt es noch keine eindeutigen Evidenzen. Die Suche nach ihnen ist von großer Bedeutung für das Verständnis der starken Wechselwirkung.

Das Potential der starken Wechselwirkung hat die Eigenschaft, dass die gluonische Bindung mit steigendem Abstand stärker wird. Das heißt, dass farbgeladene Objekte sich immer in farbneutralen Systemen binden, und somit nicht einzeln beobachtbar sind. Man spricht vom „Confinement“<sup>1</sup>. Löst man Quarks aus dem Verbund, binden sich sofort Quarks, die aus der aufgewendeten Bindungsenergie entstanden sind, mit dem gelösten Quark zu einem farbneutralen Teilchen. Diesen Prozess nennt man Hadronisierung.



**Abbildung 1.1:** Kopplungskonstante  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung in Abhängigkeit der aufzulösenden Strukturgröße.  $\alpha_s$  steigt hin zu größeren Strukturen stark an, was eine störungstheoretische Rechnung im Rahmen der QCD unmöglich macht.

Da die Kopplungskonstante  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung zu kleinen Energien hin stark anwächst ist in diesen Bereich eine störungstheoretische Rechnung im Rahmen der QCD nicht mehr möglich (siehe Abbildung 1.1). Hier hilft man sich mit Gitter-

<sup>1</sup>englisch: Einschluss; hier „Farbeinschluss“

QCD-Rechnungen, die in diesem Bereich zu stabilen Lösungen führen. Mit dieser kann man Vorhersagen zum Confinement-Potential machen, welches die Wechselwirkung von gebundenen schweren Quarks beschreibt. Im Bereich kleiner Quarkmassen lässt sich die chirale Störungstheorie anwenden.

Objekte auf Skalen von wenigen Femtometern Entfernung, wie im Falle von Atomkernen, sind ebenfalls aufgrund der gluonischen Wechselwirkung gebunden. Das daraus resultierende Potential ist stark attraktiv und bindet so auch Nukleonen im Kern, die sich wegen ihrer Ladung eigentlich abstoßen müssten. Diese Bindung lässt sich durch den Austausch von Mesonen wie Pionen und Kaonen beschreiben.

## 1.2 Das PANDA -Experiment

Das PANDA -Experiment repräsentiert die Anstrengung der internationalen Gemeinschaft von Hadronenphysikern, die fundamentalen Probleme der starken Wechselwirkung zu ergründen. PANDA steht für AntiProton Annihilations at Darmstadt. Es soll am FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Darmstadt mit Antiprotonen im Energiebereich von 1,5 GeV bis 15 GeV arbeiten. Der HESR-Speicherring soll die Antiprotonen für das Experiment auf die geforderte Energie beschleunigen und speichern. Er ist mit stochastischer Kühlung und Elektronenkühlung ausgestattet. Die Kollision von Antiprotonen mit Protonen eignet sich sehr gut für die Anforderungen des Physikprogramms, da alle Zustände mit den Quantenzahlen  $J^{PC}$  erzeugt werden können.

Folgende physikalische Fragestellungen zur starken Wechselwirkung mit nichtperturbativen Aspekten soll das Panda Experiment umfassen [Col08]:

- **Charmoniumspektroskopie**

Eine präzise Vermessung von Charmoniumzuständen oberhalb und unterhalb der  $D\bar{D}$ -Schwelle gibt fundamentale Einblicke in die QCD. Alle Charmoniumzustände können in der  $p\bar{p}$ -Reaktion erzeugt werden. Bei voller Luminosität wird PANDA mehrere tausend  $c\bar{c}$ -Zustände pro Tag registrieren können [Col08, Seite 14]. Es wird möglich sein, die Massen mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von 100 keV zu bestimmen, die Breiten der Zustände auf 10% und besser.

- **Suche nach gluonischen Zuständen (Hybrids und Gluebälle)**

Eine der wichtigsten Aufgaben der Hadronenphysik ist die Suche nach gluonischen Zuständen. Also Hadronen, in denen Gluonen als reale Bausteine neben den Quarks wirken können. Zum Einen sind das Gluebälle, die nur aus Gluonen aufgebaut sind und zum anderen Hybride, Zustände die aus einer Mischung von  $q\bar{q}$ -Paaren und angeregten Gluonen bestehen. Diese gluonischen Zustände haben exotische Quantenzahlen  $J^{PC}$ . Deshalb sind Mischungseffekte mit nahen  $q\bar{q}$ -Zuständen unterdrückt und es ist leicht, sie experimentell zu identifizieren. Die Eigenschaften dieser Zustände sind durch langreichweitige Merkmale der QCD bestimmt und ihre Untersuchung wird Einblicke in die Struktur des QCD-Vakuums geben.

- **Untersuchung der Eigenschaften von Hadronen in Nuklearer Materie**  
Bringt man Hadronen in hadronische Kernmaterie ein, so kommt es zu einer Massenverschiebung der Zustände, was auf eine partielle Aufhebung der chiralen Symmetriebrechung der QCD zurückzuführen sein könnte. Die Vermessung dieser Massenverschiebung gibt ebenfalls neue Einblicke in die starke Wechselwirkung.
- **Opencharm Spektroskopie**  
Wenn der HESR Speicherring bei voller Luminosität mit Impulsen über  $6,4 \text{ GeV}/c$  läuft, werden eine Menge  $D$ -Mesonen entstehen, etwa 100 Charm-paare pro Sekunde. Dies erlaubt eine präzise Spektroskopie von charmhaltigen Mesonen, welche auch die Spektren der  $D$  und  $D_s$  Mesonen einschließen wird.
- **Hyperkernphysik**  
Baut man in Nukleonen anstatt der leichten Quarks ein schweres Quark ein, bekommt man Hyperonen wie  $\Sigma^{\pm 0}, \Lambda, \Xi^{-/0}, \Omega^-$  (Strangeness  $\neq 0$ ),  $\Lambda_c^+, \Sigma_c^+, \Sigma_c^{++}, \Sigma_c^0$  (Charm  $\neq 0$ ) oder Baryonen mit einer Kombination aus mehreren s- und c-Quarks. Die Möglichkeit, im PANDA-Experiment eine große Zahl solcher Teilchen zu erzeugen und nachzuweisen, öffnet neue Perspektiven in der Untersuchung der Nukleonenstruktur und der Wechselwirkung zwischen Nukleonen und Hyperonen.
- **Elektromagnetische Prozesse**  
Zusätzlich zu den spektroskopischen Experimenten wird die Struktur der Nukleonen auch mit elektromagnetischen Prozessen ergründet werden. Zum Beispiel mit Weitwinkel-Compton Streuung oder dem  $p\bar{p}$  nach  $e^+e^-$  Prozessen, welche es ermöglichen, den Formfaktor des Protons in einen weiten Bereich des Impulsübertrags zu bestimmen.

### 1.2.1 Der PANDA -Detektor

Wichtige Kriterien für den PANDA-Detektor sind eine hohe Auflösung beim Tracking und der Teilchenidentifikation, als auch bei der Energiebestimmung im Kalorimeter. Außerdem muss dieser mit hohen Raten zurechtkommen, das heißt, die Datenerfassung und die damit verbundene Vorauswahl von interessanten Reaktionen müssen auf hohe Luminositäten abgestimmt sein. Um eine gute Impulsauflösung zu bekommen, ist der Detektor in zwei Teile aufgeteilt. Das Targetspektrometer umgibt den Reaktionspunkt und deckt den Bereich großer Winkel zur Strahlachse ab. Es ist mit einem supraleitenden Solenoidmagneten ausgestattet. Das Vorwärtsspektrometer, ausgestattet mit einem Dipolmagnet, soll die Spuren im Bereich kleiner Winkel bis  $10^\circ$  zur Strahlachse erfassen. Der Aufbau des Detektors ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

Ein Silizium Vertex Detektor umgibt den Reaktionspunkt, um hochaufgelöste Teilchentrajektorien nahe des Vertex zu erhalten. Beide Spektrometer sind ausgestattet um Spuren geladener Teilchen aufzunehmen und diese zu identifizieren. Desweiteren gibt es jeweils ein elektromagnetisches Kalorimeter und eine Myonidentifikation. All das ermöglicht es, das komplette Spektrum an Endzuständen zu messen, die für das

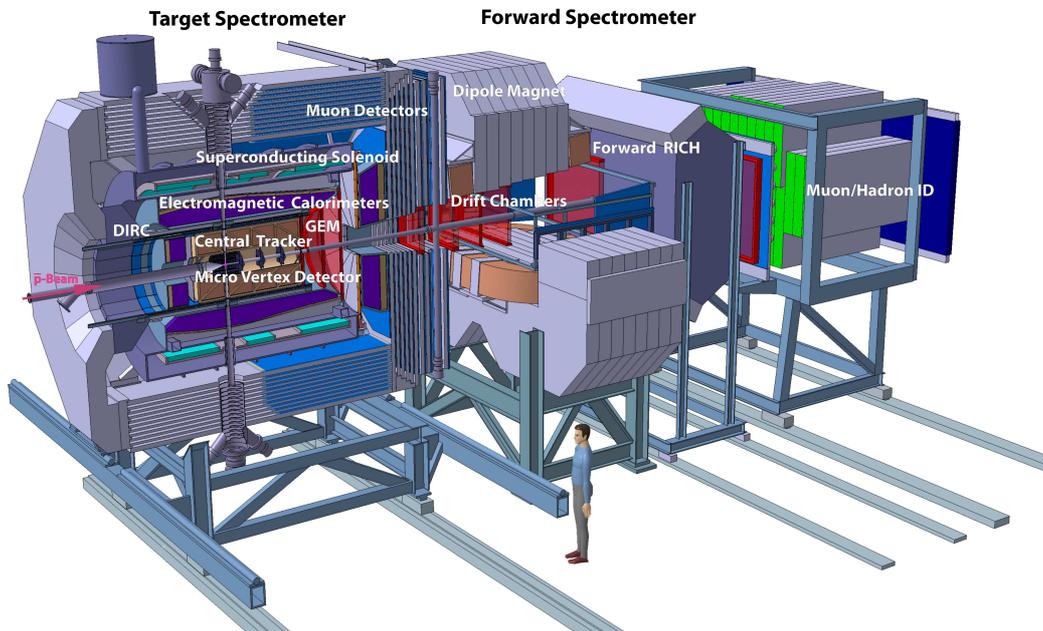


Abbildung 1.2: Überblick über den PANDA -Detektor [Col08]

PANDA -Physikprogramm wichtig sind.

Im Folgendem wird auf das Design des Targetspektrometers genauer eingegangen. Für das Target gibt es derzeit zwei Varianten. Zum Einen ein Clusterjet-Target, bei dem durch eine Düse Wasserstoff in flüssiger Form ins Vakuum gepresst wird und dann als kleine Tröpfchen in den Reaktionspunkt fallen. Zum Anderen gibt es die Variante kleine Pellets aus kondensiertem Wasserstoff in den Reaktionspunkt zu schießen. Um maximale Luminositäten von  $2 \cdot 10^{32} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  zu erreichen, braucht man ein Target mit einer Dicke von  $4 \cdot 10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^2$  wenn man annimmt, dass  $10^{11}$  Antiprotonen im HESR gespeichert sind.

Um sekundäre Zerfallsvertices von  $D$ -Mesonen und Hyperonen genau bestimmen zu können und eine hohe Akzeptanz nahe am Reaktionspunkt zu bekommen, ist das Target von dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD) umschlossen. Dieser besteht aus zwei inneren Lagen hochauflösender Siliziumpixeldetektoren und zwei äußeren Lagen Siliziumstreifendetektoren, die fassförmig um den Reaktionspunkt angeordnet sind. Im Vorwärtsbereich sind Endkappen vorgesehen, die wiederum innen mit Pixeldetektoren und außen mit Streifensensoren bestückt sein sollen.

Außerhalb des MVD schließt sich das zentrale Tracking-System an. Für den radial an den MVD anschließenden Bereich gibt es wieder zwei Optionen. Einen Straw-Tube-Tracker (STT) oder eine Time-Projection-Chamber (TPC). Beide Varianten sind Gasdetektoren, die über eine große Anzahl von Punkten die Trajektorien der geladenen Teilchen bestimmen können. Durch die Krümmung der Bahnen im Solenoidmagnetfeld

lassen sich dann die Impulse der Teilchen bestimmen. Hinter dem MVD in Strahlrichtung sind drei GEM<sup>2</sup>-Detektoren geplant, die die Teilchenspuren unter 22° erfassen sollen. Das ist der Bereich der weder von der TPC noch dem STT abgedeckt werden kann.

Der nächste wichtige Bestandteil des Detektors ist die Teilchenidentifikation durch einen DIRC<sup>3</sup>-Detektor. Dies ist ein Fass aus Quarzglas. Durchqueren ionisierende Teilchen das Glas, erzeugen sie Čerenkovphotonen, die durch Totalreflexion an das vordere Ende des Detektors geleitet werden und dort mittels Micro-Channel-Photomultipliertubes der Öffnungswinkel des Čerenkovkegels und somit die Teilchengeschwindigkeit bestimmt werden kann. Die Geschwindigkeit der langsamen Teilchen wird mit Hilfe relativer Time-of-Flight (TOF) rekonstruiert. Mit der Kenntnis über Impuls, Ladung und Geschwindigkeit der Teilchen lässt sich das Teilchen eindeutig identifizieren.

Als letztes Detektorelement innerhalb der Solenoidmagneten findet man das elektromagnetische Kalorimeter. Hohe Reaktionsraten und das kompakte Design des Targetspektrometers erfordern ein Material mit kurzen Strahlungslängen und kleinem Molièreradius für das elektromagnetische Kalorimeter. Die Strahlungslänge gibt an, nach welchem Weg das Elektron seine Energie bis auf einen Teil  $1/e$  abgegeben hat. Der Molièreradius ist eine charakteristische Größe für die transversale Ausdehnung eines elektromagnetischen Schauers. Blei-Wolframat ( $\text{PbWO}_4$ ) ist ein Szintillatormaterial mit hoher Dichte, welches eine gute Energie- und Zeitaufösung hat. Die entstandenen Photonen werden mit Avalanche-Photodioden (APD) registriert. Um hohe Lichtausbeuten zu bekommen und die APD auf einer stabilen Temperatur zu halten, werden die Kristalle auf  $-25^\circ\text{C}$  herabgekühlt. Das Kalorimeter wird eine Strahlungslänge von  $22 \cdot X_0$  und eine Energieaufösung unter 2% bei 1 GeV haben.

Außerhalb des elektromagnetischen Kalorimeters ist der Solenoidmagnet angeordnet, in dessen Rückführjoch sich die Myondetektoren befinden. Diese sind als Gasdetektoren ausgeführt. Das Rückführjoch dient gleichzeitig als Absorber für andere Teilchensorten.

Teilchen, die nicht vom Targetspektrometer erfasst werden können, das sind solche, die die Reaktionszone unter einem horizontalen Winkel von  $10^\circ$  und vertikalem Winkel von  $5^\circ$  zur Strahlachse verlassen, werden vom Vorwärtsspektrometer erfasst. Das Vorwärtsspektrometer ist ebenfalls mit Tracking-Detektoren, Čerenkov-Detektoren und einem elektromagnetischen Kalorimeter ausgestattet.

Das Experiment soll ohne zentralen Trigger betrieben werden, um den hohen Raten bis etwa  $10^7$  Reaktionen pro Sekunde und den unterschiedlichen parallel laufenden physikalischen Schwerpunkten gerecht zu werden. Die Frontendelektronik muss in der Lage sein, von selbst interessante Treffer zu finden und diese kontinuierlich zu digitalisieren. Physikalische Signaturen wie Cluster von Energieeinträgen oder Teile von

---

<sup>2</sup>Gas Electron Multiplier

<sup>3</sup>Detection of Internally reflected Čerenkov Light

Teilchenspuren werden extrahiert. Dann wird eine erste Auswahl von interessanten Zeitabschnitten gemacht, die mit detaillierten Daten aus niedrigeren Ebenen aufgefüllt werden. Daten werden erst dann aufgezeichnet, wenn eine Onlinerekonstruktion stattgefunden hat. Dies ermöglicht Flexibilität in den Auswahlalgorithmen, welche auf verschiedenen physikalischen Signaturen beruhen, die vom Spektrometer gefunden werden können. Physikalische Schwerpunkte mit identischem Target und gleicher Strahlenergie können zur gleichen Zeit gemessen werden.

### 1.2.2 Der Micro-Vertex-Detektor

Der MVD wird gebaut, um nahe des Reaktionspunktes Teilchentrajektorien mit hoher Auflösung zu erfassen. Mit ihm sollen sekundäre Vertizes von kurzlebigen Teilchen, die innerhalb des MVD-Volumens zerfallen, sehr genau rekonstruiert werden. Solche Teilchen können Mesonen mit Charm- oder Strangquarks sein. Die Zerfallslängen dieser Teilchen reichen von einigen wenigen Mikrometern hin zu einigen Zentimetern. So ist eine Auflösung von besser als  $100\ \mu\text{m}$  erforderlich, um den Zerfallsvertex des D-Mesons zu bestimmen. Das D-Meson zu rekonstruieren, ist ein wichtiger Bestandteil von vielen Prozessen im Physikprogramm.

Aufgrund der hohen physikalischen Anforderungen muss der Detektor eine hohe Granularität und eine große räumliche Akzeptanz aufweisen, da zur Trackrekonstruktion viele Punkte benötigt werden. Durch die vergleichsweise niedrigen Energien der erwarteten Teilchen ist es möglich, Energieverlust- und Impulsmessungen vorzunehmen. Dies bewirkt wiederum eine erhöhte Vielfachstreuung, welche die räumliche Auflösung verschlechtert. So muss man sehr genau abwägen, wieviel Material im MVD verbaut werden soll. Aufgrund der hohen Luminositäten müssen im inneren Bereich des MVD strahlenharte Bauteile verwendet werden. An den Enden des MVD entstehen große Mengen thermischer Energie der Frontendelektronik, die abgeführt werden muss. So ist es wichtig eine Frontendelektronik zu verwenden, welche eine geringe Verlustleistung hat und somit weniger thermische Energie abgibt.

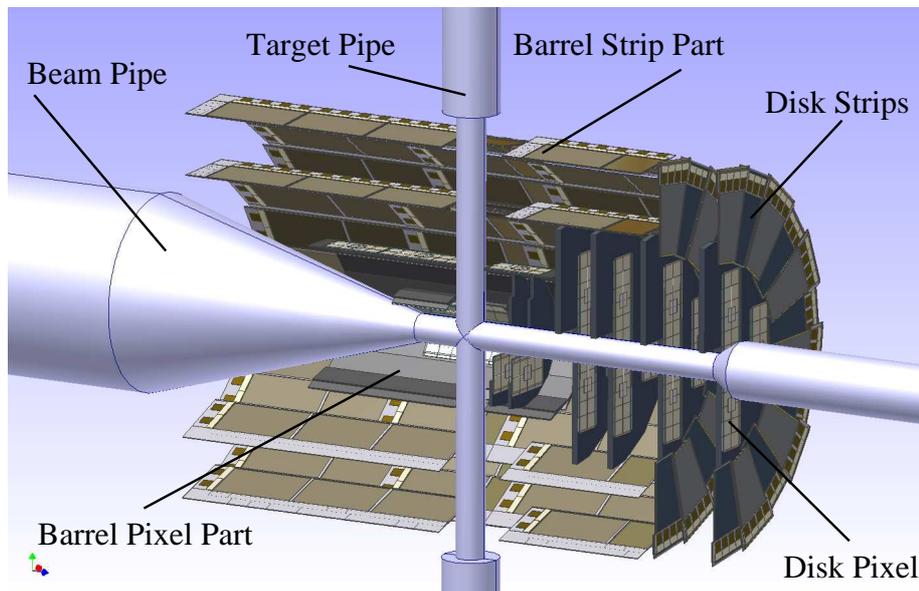
Der MVD hat einen Durchmesser von 30 cm und ist 40 cm lang. Der Aufbau ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Er ist so angeordnet, dass sich der Reaktionspunkt genau in der Mitte des MVD befindet. Der Detektor wird aus vier Fasslagen und sechs Vorwärtsdisks aufgebaut, wobei jeweils die zwei inneren Fasslagen aus Siliziumpixel-sensoren bestehen und die äußeren aus Siliziumstreifensensoren. Die Vorwärtsdisks bestehen sowohl aus Pixel- als auch aus Streifensensoren. Am MVD sind insgesamt 6,5 Millionen Pixelkanäle und 120.000 Streifenkanäle auszuwerten. [Wür19]

#### Doppelseitiger Siliziumstreifendetektor (DSSD)

Der DSSD-Teil<sup>4</sup> des MVD überdeckt eine Fläche von  $0,7\ \text{m}^2$ . Es wird zwei verschiedene Sensortypen geben. Für den Fassteil sind rechteckige Sensoren mit einem Stereowinkel von  $90^\circ$  geplant. Im Vorwärtsbereich werden trapezförmige Sensoren eingebaut, um eine scheibenförmige Anordnung mit möglichst hoher Abdeckung der Fläche zu erhalten.

---

<sup>4</sup>double-sided silicon strip detectors



**Abbildung 1.3:** Querschnitt durch den Micro-Vertex-Detektor

Diese werden einen Stereowinkel von  $15^\circ$  haben. Um einen guten Kompromiss zwischen minimaler Materialbelegung und gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) für Energieverlustmessung einzugehen, ist eine Sensordicke in der Größenordnung von  $250\ \mu\text{m}$  geplant. Die rechteckigen Sensoren werden einen Pitch zwischen  $100\ \mu\text{m}$  und  $150\ \mu\text{m}$  haben und die trapezförmigen einen Pitch von  $75\ \mu\text{m}$ , um den kleinen Stereowinkel zu kompensieren.

Aufgrund der ungeordneten Zeitstruktur der Events und den unterschiedlichen physikalischen Schwerpunkten gibt es keinen zentralen Trigger im PANDA-Experiment. Daraus folgt, dass ein frei laufendes Auslesesystem existieren muss, welches interessante Ereignisse von selbst findet. Es muss mit einer hohen zeitlichen Auflösung, in der Größenordnung von ca.  $20\text{ns}$ , laufen. Um mit möglichst geringer Wärmeentwicklung zu arbeiten, darf die Frontendelektronik nicht mehr als  $3\text{mW}$  pro Kanal an Wärmeleistung abgeben [Wü09]. Die Elektronik sollte so gebaut sein, dass sie eine totale Ionisationsdosis von  $1\text{Mrad}$  verträgt, um auch bei hohen Dosen lange einen sicheren Betrieb zu gewährleisten [Wür19].

## Kapitel 2

# Siliziumstreifendetektoren

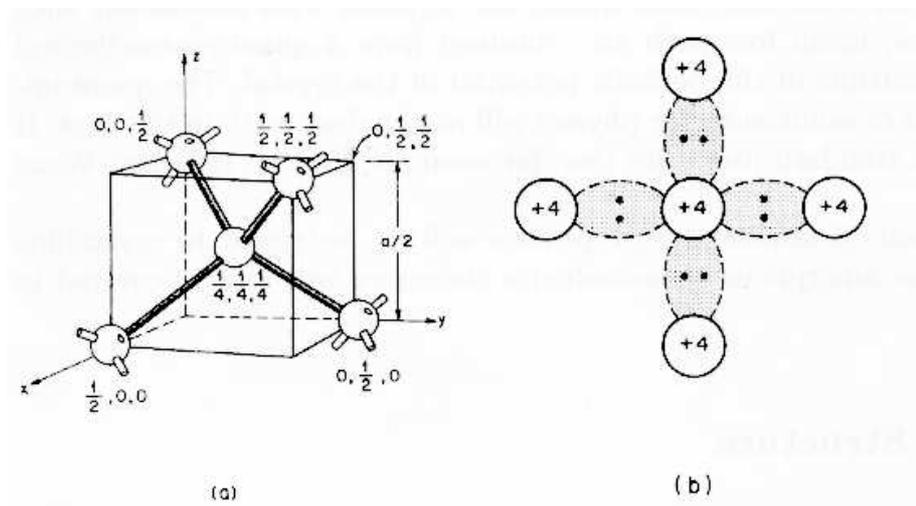
Halbleiterdetektoren haben sich in den letzten Jahrzehnten als sehr wichtiges Werkzeug in der Hochenergiephysik herausgestellt. Da der Umgang mit Halbleiterelementen von der Industrie bekannt ist, kann man hier auf umfangreiche Erfahrungen zurückgreifen. Im folgendem Kapitel soll genauer auf Eigenschaften und Verhalten von Halbleiterdetektoren, insbesondere von Siliziumstreifendetektoren, eingegangen werden.

### 2.1 Silizium als Halbleiterdetektormaterial

Die am häufigsten verwendeten Halbleiter sind Kristalle mit kubisch-flächenzentrierter Kristallstruktur, wie Silizium oder Germanium. Bei diesen Elementen gibt es zu jedem Atom vier nächste Nachbarn, mit denen die Elektronen aus den nicht vollbesetzten Schalen kovalente Bindungen eingehen. In Abbildung 2.1 ist die Gitterstruktur des kubisch-flächenzentrierten Kristalls mit vierwertigen Atomen dargestellt. Aufgrund des Pauliprinzip, welches verbietet, dass sich mehrere Elektronen im gleichen Zustand befinden, entstehen zwei Energiebänder, die durch eine Energielücke getrennt sind. Je nachdem ob die Elektronen im Band an das Gitter gebunden oder quasi frei beweglich sind, nennt man die Bänder Valenzband oder Leitungsband. Die Energielücke bestimmt die elektrischen Eigenschaften des Kristalls. Ist diese Lücke sehr groß ( $> 5\text{ eV}$ ) spricht man vom Isolator, ist sie kleiner spricht man vom Halbleiter. Bei Metallen überlappen diese Bänder.

Wie kommt es zu diesem unterschiedlichen Verhalten? Bei  $T = 0\text{ K}$  sind alle Elektronen im Grundzustand, also im Valenzband, gebunden und somit fest im Gitter. Bei steigender Temperatur können Elektronen das Band wechseln, wenn sie ausreichend Energie besitzen, um die Energielücke zu überwinden. Beim Übergang ins Leitungsband hinterlassen die Elektronen ein Loch im Valenzband, welches die Eigenschaften eines positiven Teilchens besitzt. Elektronen und Löcher ermöglichen jetzt gleichermaßen die elektrische Leitfähigkeit. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im jeweiligen Band wird durch die Fermi-Diracverteilung beschrieben:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}} \quad (2.1)$$



**Abbildung 2.1:** Elemente der vierten Hauptgruppe im Kristall (a) und zweidimensionales Schema der Atombindung (b) [Lut01]

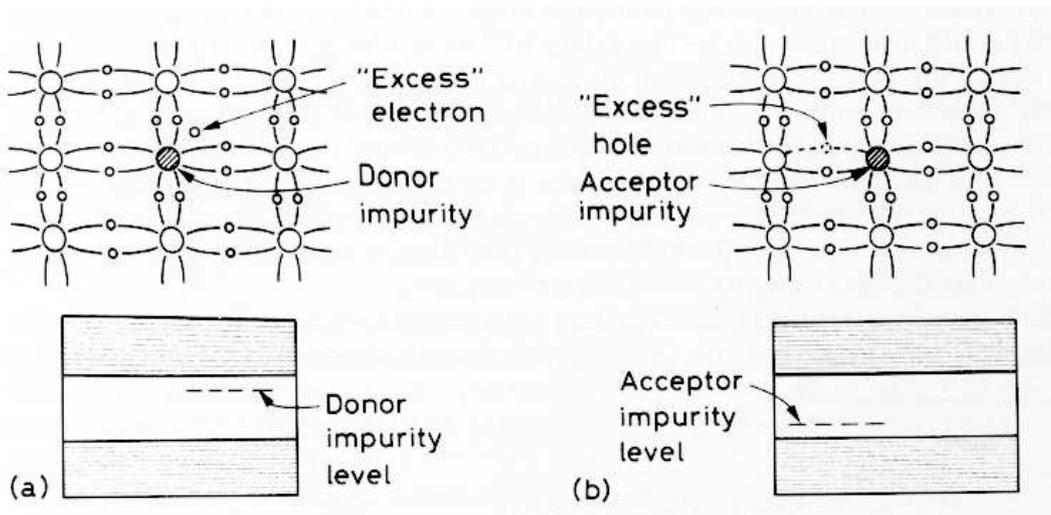
Dabei ist  $E_F$  die Fermienergie, die maximal mögliche Energie im Grundzustand.  $k$  ist die Boltzmannkonstante und  $T$  die Temperatur. Da bei Isolatoren die Energielücke sehr groß ist, ist es wenig wahrscheinlich, dass Elektronen ins Leitungsband gelangen können.

Typische Konzentrationen freier Ladungsträger für Silizium bei Raumtemperatur sind  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Setzt man das ins Verhältnis zur Anzahl von Atomen im Gitter, ca  $10^{22}$ , dann sieht man, dass nur etwa ein freier Ladungsträger auf  $10^{12}$  Siliziumatome kommt. Das heißt auch, dass die Leitfähigkeit bei Raumtemperatur sehr gering ist.

Bringt man Atome mit nur 3 Valenzelektronen (Akzeptoren) ins Kristallgitter, erzeugt dieses aufgrund des fehlenden Elektrons ein Loch im Gitter. Solche Elemente sind zum Beispiel Bor oder Indium. Elektronen, die am Gitter gebunden sind, können leicht dieses Loch auffüllen. Das bedeutet, dass ein neuer Energiezustand im Bereich der Bandlücke bevölkert wird (Abbildung 2.2). So können Elektronen über diesen Zustand leichter ins Leitungsband gelangen. Das entstandene Material wird als p-leitend bezeichnet. Bringt man ein Element mit 5 Valenzelektronen (Donatoren) ins Gitter, kommt noch ein zusätzliches Elektron dazu, welches sehr schwach ans Gitter gebunden ist. Dieses erzeugt ebenfalls einen neuen Energiezustand im Bereich der Lücke und es entsteht ein n-leitendes Material. Ist die Konzentration an Akzeptoren oder Donatoren sehr hoch, nennt man es  $p^+$ - bzw.  $n^+$ -leitend. Dieser Effekt wird ausgenutzt um zusätzlich freie Ladungsträger in den Halbleiter einzubauen und die Leitfähigkeit gezielt zu erhöhen.

### 2.1.1 Der p-n-Übergang

Schafft man einen Übergang von einem n-leitenden Halbleiter auf einen p-leitenden, diffundieren die Elektronen der n-dotierten Schicht in die Löcher der p-dotierten. Da



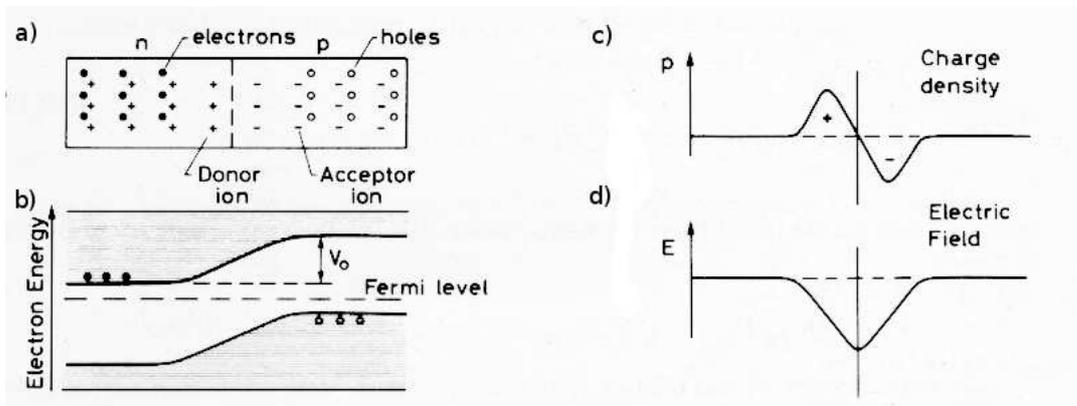
**Abbildung 2.2:** Bei dotierten Halbleiter bilden sich neue Energieniveaus aus. Man kann ihn mit Donatoren (a) oder Akzeptoren (b) dotieren. [Leo87]

der Halbleiter für sich elektrisch neutral ist, kommt es zu einem lokalen Ladungsgleichgewicht und es bildet sich ein elektrisches Feld um die Grenzschicht aus, welches der Diffusion entgegenwirkt. Es bildet sich ein stabiler Zustand. Die Schicht in der sich das elektrische Feld bildet, wird Depletionszone genannt. In Abbildung 2.3 ist der Sachverhalt schematisch dargestellt. Das elektrische Feld um die Grenzschicht führt zu einer Verarmung an freien Ladungsträgern. Der Übergang zwischen den unterschiedlich dotierten Materialien ist so fast nicht mehr leitend. Da aufgrund der thermischen Bewegung der Elektronen, ähnlich wie bei reinem Silizium, immer Ladungsträger entstehen, wird immer eine Restleitfähigkeit bestehen bleiben.

Schlagen ionisierende Teilchen beim Durchgang der Depletionszone zusätzliche Ladungsträger aus dem Gitter, werden diese durch das vorhandene elektrische Feld aus der Depletionszone gedrängt. Es kommt zur Ladungstrennung. Sammelt man diese Ladung auf, bevor Elektronen und Löcher wieder rekombinieren können, hat man eine Möglichkeit, die ionisierenden Teilchen nachzuweisen. Die Ladungsmenge macht Aussagen über den Energieverlust des ionisierenden Teilchens.

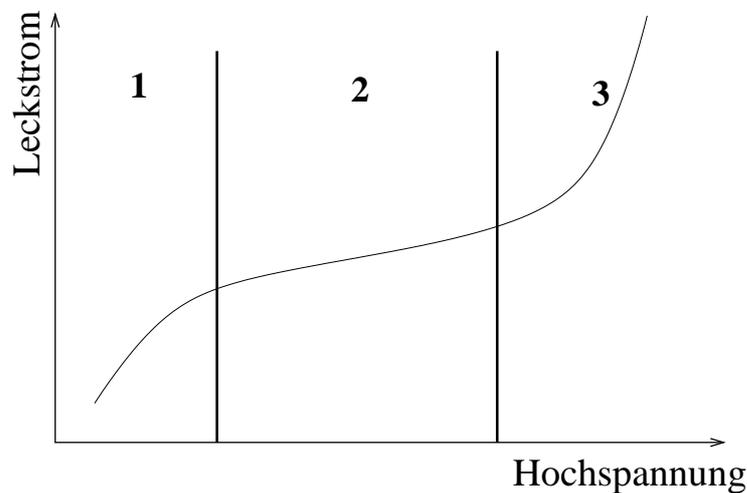
### 2.1.2 Depletionsspannung

Den oben beschriebenen p-n-Übergang könnte man so schon als Detektor verwenden. Doch ist unter diesen Umständen seine Nachweisschwindigkeit für ionisierende Teilchen sehr schlecht. Das durch die Dotierung entstandene Feld ist schwach und hat eine sehr geringe räumliche Ausdehnung. Bessere Ergebnisse können erzielt werden, wenn man durch ein äußeres elektrisches Feld die Depletionszone vergrößert. Dazu muss die Spannung in Sperrrichtung angelegt werden, das heißt die negative Spannung an die p-dotierte Seite und die positive an die n-dotierte. So werden die Löcher der p-dotierten Seite in Richtung der negativen Spannung gezogen und die Elektronen der n-dotierten in Richtung der positiven. Die Ladungsdichten sind wieder stabil, wenn sich das Feld,



**Abbildung 2.3:** Diese Darstellung zeigt schematisch (a) den Übergang zwischen  $n^+$ - bzw.  $p^+$ -dotiertem Material, an dem sich die möglichen Elektronenenergien (b) verschieben. Man sieht, wie sich das Kontaktpotential  $V_0$  herausbildet. Es resultiert daraus ein Ladungsungleichgewicht (c) und daraus wiederum ein lokal eingeschränktes elektrisches Feld (d). [Leo87]

welches durch die verschobenen Ladungen im Halbleiter entsteht, mit dem von außen angelegten Feld kompensiert. So kann man mit einer äußeren Spannung die Größe der Depletionszone variieren. Ein weiterer positiver Effekt ist, dass die Geschwindigkeit der Ladungsträger steigt. So sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Ladungsträger wieder rekombinieren, bevor sie den Halbleiter verlassen können.



**Abbildung 2.4:** Schematischer Verlauf des Leckstromes durch einen Halbleitersensor bei angelegter Hochspannung. Im Bereich 1) wächst die Depletionszone und der Strom steigt an, in 2) ist der Sensor vollständig depletiert und der Anstieg geht zurück. In 3) kommt es zum Durchbruch und der Leckstrom steigt stark an.

Mit steigender Deletionsspannung steigt auch der Leckstrom durch den Halbleiterübergang an. Ein schematischer Verlauf ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Beim Anlegen einer Hochspannung treten verschiedene Effekte auf. Bei niedrigen Spannungen, in der

Abbildung als Bereich 1) markiert, wächst die Depletionszone. Das Volumen, in dem freie Ladungsträger entstehen und entsprechend den angelegten Spannungen abgesaugt werden, vergrößert sich. So steigt auch der Leckstrom durch den Halbleiter. Ein weiterer Effekt, der dazu führt, dass bei angelegter Hochspannung Ströme fließen, ist die Tatsache, dass der Halbleiter Verunreinigungen an der Oberfläche und im Gitter besitzt. Über diese Verunreinigungen fließt dann ein zusätzlicher Strom. Dieser Effekt lässt sich durch eine saubere Umgebung bei Herstellung und Verwendung der Sensoren vermindern, aber nicht ausschalten.

Erhöht man die Spannung, kommt es zur vollständigen Depletion des Halbleiters. An diesem Punkt wächst der Leckstrom durch den Halbleiter nicht weiter an. Der Strom, der durch die Oberflächenverunreinigungen verursacht ist, steigt weiter. Dies ist in Abbildung 2.4 der Beginn des Bereich 2) und ist charakterisiert durch eine Verminderung des Anstiegs.

Erhöht man die Spannung weiter, kommt es zum Durchbruch des Stromes durch den Sensor. (Bereich 3) Dieser Durchbruch kann verschiedene Ursachen haben [Lut01]. ein Effekt ist der Zener-Durchbruch, der durch die Wechselwirkung des externen Feldes mit den Hüllenelektronen der Gitteratome hervorgerufen wird. So werden durch das Feld die Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband gezogen. Es entstehen zusätzliche Ladungsträger. Ein anderer Effekt ist der Avalanche<sup>1</sup>-Durchbruch. Er beschreibt die Wechselwirkung der freien Ladungsträger, Elektronen und Löcher, mit Gitterdefekten im Halbleiter. An diesen können freie Ladungsträger, die durch das äußere Feld beschleunigt wurden, Elektronen aus ihrer kovalenten Bindung lösen. Auch so entstehen zusätzliche Ladungsträger.

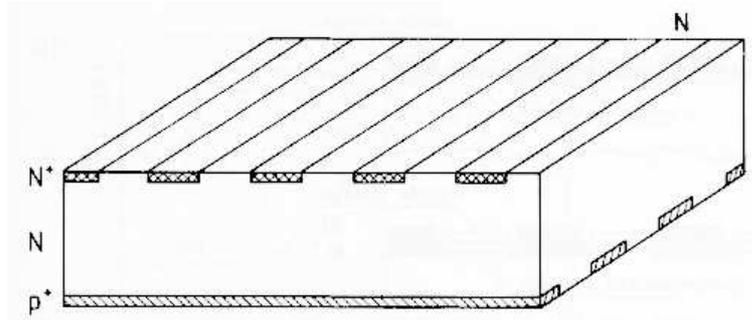
Bei zu hohen Strömen durch den Halbleitersensor kann dieser zerstört werden. Deshalb ist es wichtig darauf zu achten, dass die Sensoren nicht im Durchbruchbereich betrieben werden. Eine optimale Hochspannung findet man in dem Bereich, in dem der Sensor gerade vollständig depletiert ist. Neben der Leckstrommessung gibt es noch einen zweiten Weg, um festzustellen bei welcher Spannung der Halbleiter vollständig depletiert ist. Versteht man den Sensor als Plattenkondensator, dessen Platten sich mit steigender Spannung entfernen. So sinkt mit steigender Spannung die Kapazität und somit das kapazitive Rauschen. Verfolgt man das Rauschen des Sensors z.B. am Oszilloskop oder mit der schon angeschlossenen Frontendelektronik, so sinkt das Rauschen, bis es mit Erreichen der vollständigen Depletion ein Plateau erreicht.

### 2.1.3 Siliziumstreifensensoren

Möchte man nun neben der Information über die deponierte Ladungsmenge noch eine räumliche Information über den Durchgang des ionisierenden Teilchens, so wählt man eine geeignete Anordnung der p- und n-dotierten Schichten. Die Einteilung kann einseitig in Pixel- oder in Streifenanordnung geschehen. Streifensensoren können auch doppelseitig realisiert werden, um zweidimensionale Ortsinformation zu bekommen. (Abbildung 2.5) Bei diesen wird bei der Herstellung n<sup>+</sup>- bzw. p<sup>+</sup>-leitende Streifen

---

<sup>1</sup>französisch: Lawine



**Abbildung 2.5:** Schematischer Aufbau eines doppelseitigen Streifensensors. Es sind  $n^+$ - bzw.  $p^+$ -leitende Streifen auf ein  $n$ -leitendes Substrat aufgebracht. [Lut01]

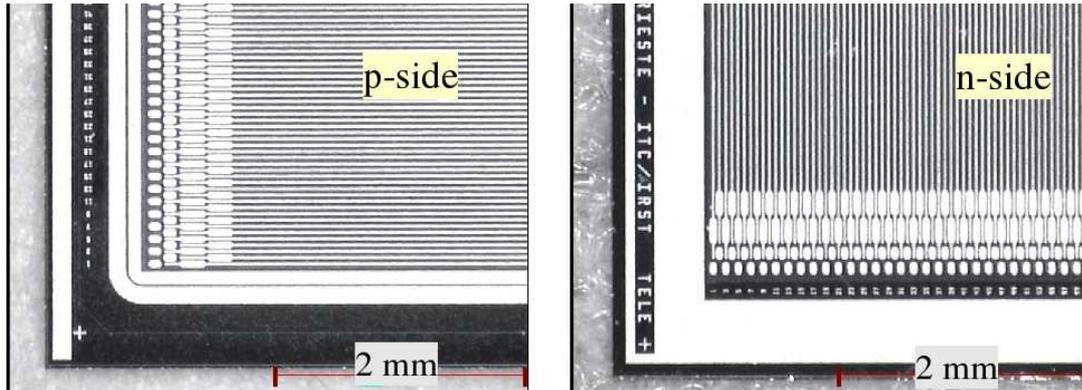
auf ein  $n$ -leitendes Substrat oben und unten aufgebracht. Alle Streifen werden einzeln ausgelesen. Um die Verbindung von Sensor und Frontendelektronik herzustellen, wird mit Hilfe von einigen  $\mu\text{m}$  dünnen Gold- oder Aluminiumdrähten eine galvanische Verbindung hergestellt. Dieser Prozess stammt aus der herkömmlichen Halbleiterindustrie und wird *Wire Bonding* genannt. Die Eingänge der Vorverstärker können nicht direkt an die Streifen *gebondet* werden, da diese sonst die zur Depletion des Sensor nötige Hochspannung verarbeiten müssten. Der Dynamikbereich würde stark eingeschränkt oder die Elektronik in die Sättigung kommen. Um dies zu vermeiden, werden die Vorverstärker über Kondensatoren an die Streifen angeschlossen. So erreicht nur der Wechselstromanteil des Signals die Elektronik und der Gleichstromanteil wird über spezielle Elektroden, die zwischen den Streifen liegen, abgeleitet. Die Kondensatoren sind direkt in den Sensor integriert, indem isoliert über den  $n^+$  bzw.  $p^+$ -dotierten Streifen ein Metallstreifen liegt, der als Kondensator wirkt. Diese können über einen entsprechenden Anschluss, das AC-Pad, abgegriffen werden. Das direkte Signal bekommt man von den DC-Pads.

Erzeugt ein ionisierendes Teilchen freie Ladungsträger im Sensor, so driften diese Aufgrund des elektrischen Feldes zu den oberen und unteren Streifen. Je nach Einfallswinkel kann sich die erzeugte Ladung auch über mehrere Streifen verteilen. So wird auf der  $p$ - bzw. der  $n$ -Seite des Sensors etwa die gleiche Ladungsmenge, nur mit unterschiedlichen Vorzeichen, aufgesammelt. Stehen die Streifen des Sensors nicht parallel zueinander, kann man aus den Kreuzungspunkten der getroffenen Streifen den Durchstoßpunkt des Teilchens ermitteln. Sind mehr als ein Streifen pro Seite getroffen, muss man geeignete Methoden finden den Durchstoßpunkt zu rekonstruieren. Treffen zur gleichen Zeit mehrere Teilchen den Sensor, kann man versuchen, die richtigen Kreuzungspunkte zu finden, in dem man den Ladungseintrag der  $n$ -Seite mit derjenigen der  $p$ -Seite vergleicht.

### Teleskopsensoren der Teststation

Für die Teststation werden doppelseitige Mikrostreifensensoren verwendet, auf deren Eigenschaften kurz eingegangen werden soll. Die Sensoren wurden von der italienischen Firma *ITC irst* hergestellt. Sie haben eine Fläche von etwa  $21\text{ mm} \times 21\text{ mm}$ . Auf jeder

Seite sind 385 Streifen realisiert, welche sowohl über AC- als auch DC-Pads ausgelesen werden können. Die Streifen sind unter einen Stereowinkel von  $90^\circ$  zueinander ausgerichtet. Der Abstand zwischen den Streifen beträgt  $50\ \mu\text{m}$ . Die Sensoren sind nicht in strahlenharter Bauweise hergestellt, so dass sie sich nicht für das PANDA -Experiment eignen. In der Abbildung 2.6 sind mikroskopische Aufnahmen der Sensoren gezeigt.



**Abbildung 2.6:** Mikroskopische Aufnahmen der Sensoren der Teststation. Es sind gut die einzelnen Metallstreifen zu erkennen. An den Enden liegen die AC-Pads und abgetrennt von den Streifen liegen die DC-Pads.

## 2.2 Energieverlustmessung

Der Nachweis von geladenen Teilchen ist nur über die Wechselwirkung mit Materie und die Beobachtung der Wechselwirkung möglich. Die dominierenden Wechselwirkungen geladener Teilchen in Materie sind die Ionisation und die Anregung. Bei höheren Energien kommt der Effekt der Bremsstrahlung hinzu. Neutrale Teilchen können nur über charakteristische Reaktionen mit geladenen Teilchen nachgewiesen werden. Für Photonen sind solche Wechselwirkungen der Photoeffekt, die Comptonstreuung und die Paarbildung von Elektronen. Also immer die Erzeugung von Elektronen, die dann nachgewiesen werden können. Für den MVD ganz speziell interessiert uns der Energieverlust für geladene Teilchen. Zum Einen kann man aus der erzeugten Ladung darauf schließen, wo das Teilchen den Detektor durchquert hat. Zum Anderen gibt die deponierte Ladungsmenge Aufschluss über den Energieverlust des Teilchens beim Durchgang durch den Detektor.

Nach Bethe und Bloch ist der Energieverlust für geladene Teilchen pro Weglänge gegeben durch [Leo87]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (2.2)$$

mit

$r_e$	:	klassischer Elektronenradius = $2,817 \cdot 10^{-13}$ cm
$m_e$	:	Elektronenmasse
$N_A$	:	Avogadrokonstante
$I$	:	mittleres Anregungspotential
$Z$	:	mittlere Ladungszahl des Absorbermaterials
$A$	:	mittlere Massenzahl des Absorbermaterials
$\rho$	:	mittl. Dichte des Absorbermaterials
$z$	:	Ladung des einfallenden Teilchens
$\beta$	:	$\frac{v}{c}$ des einfallenden Teilchens
$\gamma$	:	$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ des einfallenden Teilchens
$\delta$	:	Dichtekorrekturen
$C$	:	Hüllenkorrekturen
$W_{max}$	:	maximaler Energietransfer einer Kollision

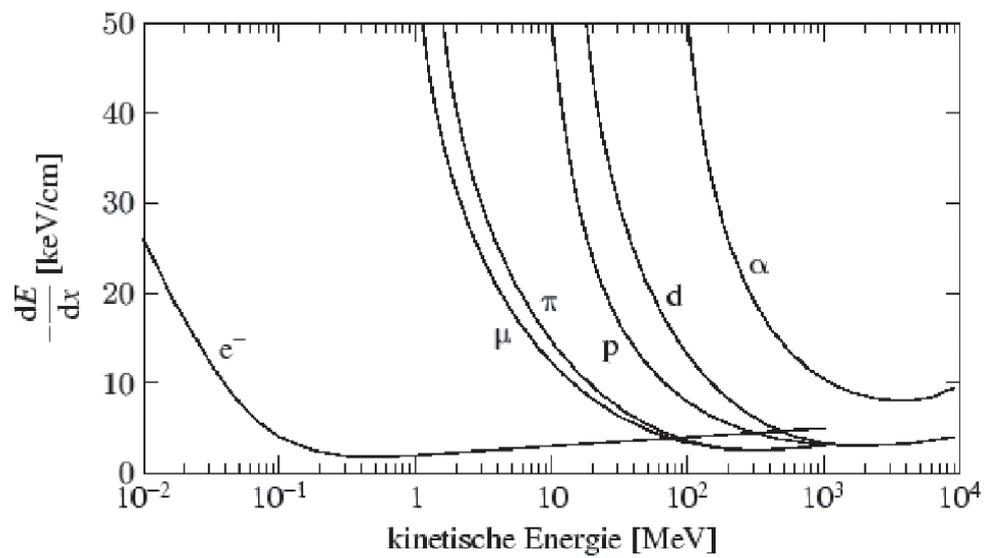
Ein Beispiel für die Energieabhängigkeit des Energieverlustes ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Sie zeigt den Energieverlust nach Bethe und Bloch über der Energie der Teilchen für verschiedene Teilchensorten. Für nichtrelativistische Teilchen fällt der mittlere Energieverlust pro Teilchen stark ab und zwar mit  $\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{\beta^2}$ . Er sinkt bis etwa  $v = 0,96c$ , wo ein Minimum erreicht wird. Teilchen an diesem Punkt sind als minimal ionisierende Teilchen (MIP<sup>2</sup>) bekannt. Zu bemerken ist, dass an diesem Punkt der Energieverlust von Teilchen mit identischer Ladung in etwa gleich ist. Von diesem Punkt hin zu höheren Energien steigt der Energieverlust wieder an, da jetzt der logarithmische Term dominiert. Bei niedriger Teilchenenergie unterscheidet sich der Energieverlust der verschiedenen Teilchensorten. Mit bekanntem Impuls der Teilchen kann dieser Effekt für die Teilchenidentifikation ausgenutzt werden.

Die Verteilung nach Bethe und Bloch gibt nur den mittleren Energieverlust  $\langle \frac{dE}{dx} \rangle$  beim Durchqueren des bremsenden Materials in Abhängigkeit seiner eigenen Energie an. Der Energieverlust des Teilchens ist ein statistisch zufälliger Prozess, da es nicht klar ist, wie oft das Teilchen gestreut wird. Für dicke Absorber kommt es zu sehr vielen Stößen mit dem bremsenden Material. Unter der Bedingung, dass sich  $\frac{dE}{dx}$  nicht ändert, ist der Energieverlust bei fester Energie gaussverteilt um  $\langle \frac{dE}{dx} \rangle$ . Bei dünneren Absorbern verschiebt sich der wahrscheinlichste Wert für  $\frac{dE}{dx}$  hin zu niedrigeren Energieverlusten. Da es einzelne Stöße geben kann, bei denen das Teilchen sehr viel Energie verliert, ergibt sich ein langer Ausläufer hin zu hohen Energieverlusten. Diese Verteilung wird im Grenzfall dünner Absorber durch die Landauverteilung beschrieben. Durchqueren die Teilchen nur wenige Atomlagen so ist der Energieverlust poissonverteilt. Die genaue Berechnung der Energieverlustverteilung ist ein schwieriges mathematisches Problem.

Im Halbleiter wird nur ein Teil der deponierten Energie dafür aufgewendet Elektron-Loch-Paare zu erzeugen. In Silizium beträgt die Energie die aufgewandt werden muss 3,6 eV, was dreimal so groß ist wie die Bandlücke von 1,2 eV. Das gilt nur, wenn die Teilchenenergie im Vergleich zur Bandlücke groß ist [Lut01].

---

<sup>2</sup>minimum ionizing particle



**Abbildung 2.7:** Energieverlust verschiedener Teilchen beim Durchgang durch Materie. Der Graph wird durch Bethe und Bloch beschrieben. Dieser ist über der Energie des durchgehenden Teilchens aufgetragen [Leo87].

## Kapitel 3

# Aufbau einer Teststation für Silizium-Streifensensoren

### 3.1 Überblick

Die Teststation in Dresden wurde aufgebaut, um Erfahrungen im Umgang mit Siliziumstreifensensoren und den für den Betrieb nötigen Komponenten zu sammeln. Es sollte möglich sein, die einzelnen Komponenten der Teststation besser zu verstehen. Das problemlose Zusammenarbeiten von Sensor, Frontendchip, der Infrastruktur zur Bereitstellung von Steuersignalen und Spannungen und der Software zur Datenverarbeitung sollten im Aufbau gewährleistet sein. Mit diesem Aufbau soll die Charakterisierung von verschiedenen Siliziumstreifendetektormodulen aufgenommen werden. Es ist außerdem möglich, die Sensoren radioaktiver Strahlung auszusetzen, um Energie- und Ortsauflösung zu studieren.

In Abbildung 3.1 ist schematisch der Aufbau der Teststation dargestellt. Alle Komponenten werden vom PC aus gesteuert. Dazu sind diese mit verschiedenen Bussystemen an den PC gekoppelt. Eine Hochspannungsquelle stellt die für die Depletion des Sensors nötige Spannung zu Verfügung. Ein Temperatursensor erfasst die aktuelle Temperatur in der Nähe des Sensors. Über einen I<sup>2</sup>C<sup>1</sup>-Master können dann die Spannungsversorgung, der FPGA<sup>2</sup> zum Erzeugen von Trigger- und Clock-Signalen und der Frontend angesteuert werden. Es ist möglich, über I<sup>2</sup>C diese Werte auszulesen. Als Frontendchip wurde hier der *APV25-S1* Chip gewählt. Dieser benötigt Clock- und Trigger-LVDS<sup>3</sup>-Signale um definierte Zeitfenster zu erfassen und diese mit einer genauen Zeitinformation zu versehen. Die entstandenen Daten, welche der APV als analoge Signale sendet, werden von Analog-zu-Digital-Konvertern (ADC) erfasst. Die ADCs sind Bestandteil einer ADC-Karte die über eine PCI<sup>4</sup> Schnittstelle mit dem Rechner verbunden ist. Die Datenerfassungssoftware ermöglicht es, die wichtigen Daten zu extrahieren und verschiedene Messungen durchzuführen.

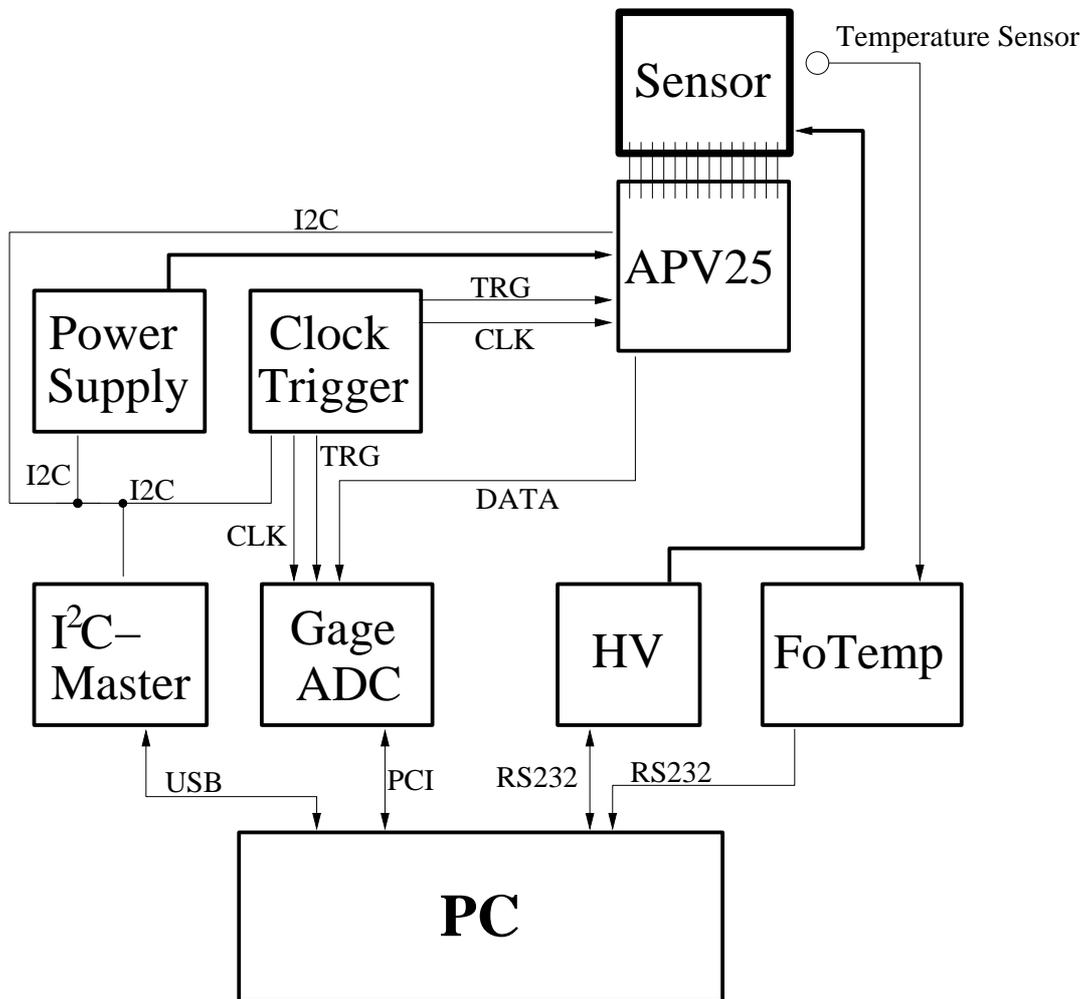
---

<sup>1</sup>Inter Integrated Circuit

<sup>2</sup>Field Programmable Gate Array

<sup>3</sup>Low Voltage Differential Signaling

<sup>4</sup>Peripheral Component Interconnect



**Abbildung 3.1:** Schematischer Aufbau der Teststation. Die Pfeile geben die Richtung des Datenstromes des jeweiligen Protokolls an. Die dicken Linien zeigen die Verzweigung der benötigten Spannungen.

### 3.1.1 Testplatz

In Abbildung 3.2 sind die wichtigsten Elemente der Teststation zu sehen. Rechts das Sensorboard (detailliert in Abbildung 3.3), welches als Haltestruktur für Sensor und Frontend gedacht ist und die nötigen elektronischen Bauteile beherbergt. Im Wesentlichen, sind das Kondensatoren zum Stabilisieren der Hochspannung für den Sensor und der Versorgungsspannung für den Frontend. Über eine Lemobuchse wird die Hochspannung zugeführt. Die LVDS- und I<sup>2</sup>C-Signale, die Versorgungsspannungen und die analogen Signale aus dem APV25 werden über einen 50-poligen Stecker zu und abgeführt. Das Versorgungsboard (links im Bild) stellt die nötigen Versorgungsspannungen zur Verfügung. Diese können per I<sup>2</sup>C-Protokoll eingestellt und ausgelesen werden. Um

die LVDS-Signale für längere Signalwege aufzuarbeiten, sind LVDS-Repeater<sup>5</sup> auf dem Board integriert. Zum Auslösen eines Triggers befindet sich unter dem Sensor ein Stück Plastikszintillator, welcher ionisierende Teilchen registrieren soll, die durch den Sensor geflogen sind. Dazu ist dieser an einen Photomultiplier angeklebt (Mitte). Dieser wandelt das Licht aus dem Szintillator, über eine geeignete Elektronik, in definierte Spannungspulse um, um den Trigger am FPGA auszulösen. Über den Sensor kann man eine radioaktive Quelle platzieren, da sich das Sensorboard selbst in einer Aluminiumbox befindet. Letztere hat dafür eine spezielle Halterung (nicht im Bild). Diese drei Elemente werden von einer Kiste aus Kupfer umgeben, um den Sensor vor Licht zu schützen und störende elektromagnetische Einflüsse zu reduzieren.

Außerhalb der Kiste sind die Elemente, die selber eine Abschirmung haben oder keine brauchen. Dies sind das FPGA-Board und ein Labornetzteil, welches die Spannungen für das Supply-Board bereitstellt. Außerdem noch der I<sup>2</sup>C-Master und die Hochspannungsversorgung für den Sensor.



**Abbildung 3.2:** Der Arbeitsplatz der Teststation in Dresden. Rechts das Sensorboard mit Frontends und Sensor, in der Mitte der Photomultiplier mit Szintillator und links das Versorgungsboard

<sup>5</sup>Verstärker, die das differenzielle Signal empfangen und verstärkt wieder ausgeben. Dabei werden die Impedanzen neu angepasst

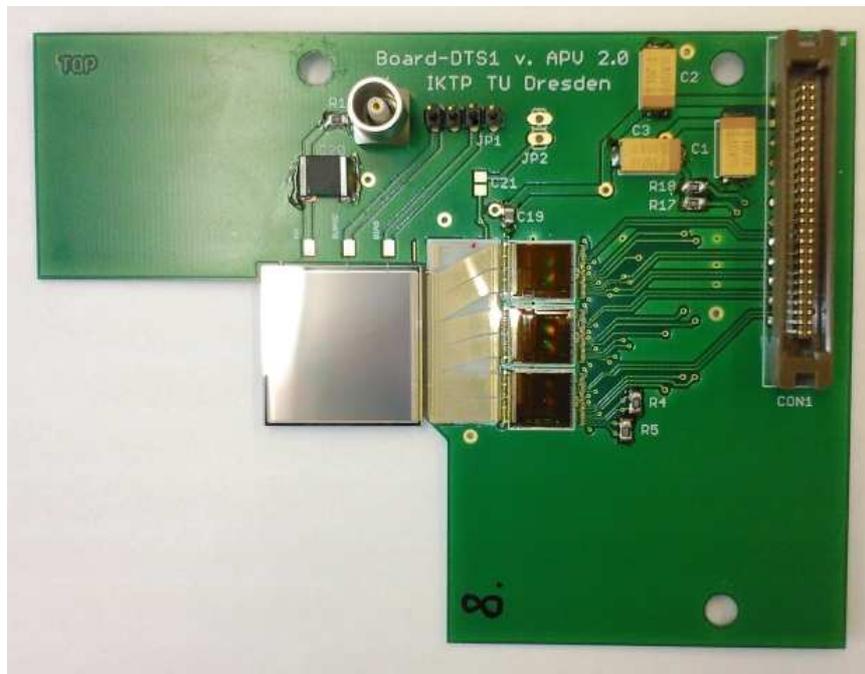


Abbildung 3.3: Sensorsboard mit Sensor und APV25

### Hochspannung

Die Hochspannungsquelle liefert zwei voneinander unabhängige Spannungen, wobei bisher im Aufbau nur eine genutzt wurde. Günstig für Testzwecke ist die Möglichkeit, die Ströme auf Maximalwerte zu begrenzen, was bei einem Kurzschluss oder defekten Sensoren zur erhöhten Sicherheit führt. Die Spannungsquelle verfügt über eine RS232<sup>6</sup>-Schnittstelle, welche es ermöglicht, die Spannungen über den PC zu steuern. Außerdem lassen sich die Spannungen und Stöme überwachen.

### Digitalisierung

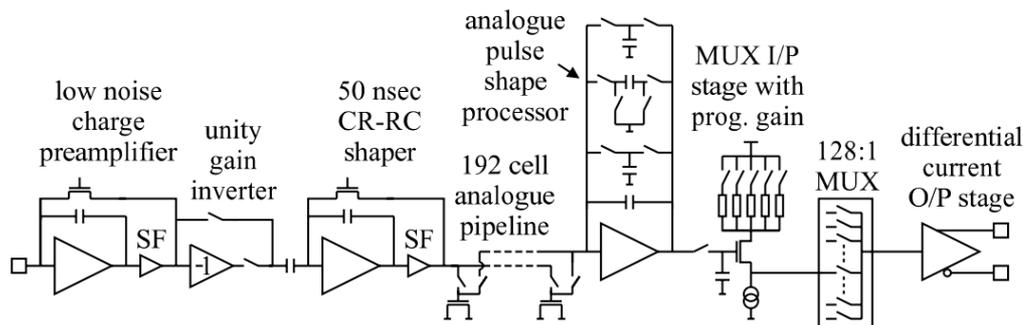
In der Teststation müssen die differenziellen Signale des Frontend digitalisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe der *CS8389*, einer 14-Bit ADC-Karte der Firma *Gage*, die an den PCI-Bus des PC angeschlossen ist. Mit ihr können gleichzeitig acht analoge Eingänge gesampelt werden. Die Abtastrate kann bis zu 125MS/s betragen. Im normalen Betrieb der Teststation wird die Digitalisierung auf die gleiche Clock synchronisiert, welche aus dem FPGA-Board kommt und den Frontend steuert. Durch einen externen Trigger wird die Digitalisierung gestartet. Am PC steht zum Einen eine mitgelieferte Software (*GageScope*) zu Verfügung mit der, ähnlich wie am Oszilloskop, die Signale angezeigt und vermessen werden können. Zum Anderen wurde die Datenauslese der Karte in die Software der Teststation eingearbeitet. Näheres dazu ist in Abschnitt 3.2.1 zu finden, in dem nochmal genauer auf die Software eingegangen wird.

<sup>6</sup>Bezeichnung einer seriellen Schnittstelle

### 3.1.2 Der Frontend Chip APV25

Der Frontendchip ist eines der wichtigsten Bestandteile der Teststation, da er die vom Sensor aufgesammelte Ladung in definierte Spannungen umwandelt, die später digitalisiert werden.

Der *APV25-S1* ist ein ASIC<sup>7</sup>-Chip, hergestellt in einem  $0,25\ \mu\text{m}$  (deep sub-micron), 3 Metallagen-Prozess [L. 99]. Er kombiniert eine analoge Signalverarbeitung mit digitaler Steuerung und wurde ursprünglich am CMS<sup>8</sup>-Tracker als Frontend für Siliziumstreifensensoren eingesetzt. Seine Taktfrequenz ist für die LHC-Bunch-Crossing-Frequenz von 40 MHz ausgelegt. Er hat Vorverstärker und Shaper für 128 Kanäle. Die Ladung, die von den Sensoren kommt, wird in definierte Spannungspulse mit einer Zeitkonstante von  $\tau = 50\ \text{ns}$  umgewandelt. Diese Pulse werden mit der Taktfrequenz abgetastet und in einem analogen Speicher mit 192 Reihen zurückgehalten. Ein analoger Signalprozessor kann drei Pulse zusammenfassen und ein Signal-Multiplexer gibt diese über eine analoge differenzielle Leitung aus. Seine Arbeitsparameter lassen sich einfach über das I<sup>2</sup>C-Protokoll steuern. Zur Veranschaulichung ist die interne Schaltung in Abbildung 3.4 dargestellt



**Abbildung 3.4:** Interne Schaltung eines Kanals des APV25 [Bai04]. Ein ladungssensitiver Vorverstärker wandelt die am Sensor entstandene Ladung in definierte Spannungspulse um. Um den APV25 an der n- bzw. p-Seite des Sensors betreiben zu können, ist zwischen Vorverstärker und Shaper ein Inverter geschaltet. Der Shaper erzeugt Pulse mit definierter Länge. Es folgen der analoge Speicher, der analoge Signalprozessor und der Multiplexer bevor das Signal über die differentielle Leitung ausgegeben wird.

Der APV25 kann in unterschiedlichen Modi betrieben werden, um die Datennahme an die Umstände des Experiments anzupassen. So stehen ein Peak-, ein Multi- und ein Deconvolutionmode zur Verfügung. Beim Peak- und beim Multimode werden die Pulshöhen ausgegeben. So ist es möglich, den ganzen Puls aus dem Shaper abzutasten. Im Deconvolutionmode werden jeweils drei Samples aus der Pipeline zusammengefasst, indem er sie addiert. Dies ist notwendig, um die Datenrate zu verringern und Pile-Up zu verhindern, wenn die Eventraten zu hoch sind.

<sup>7</sup>Application Specific Integrated Circuit

<sup>8</sup>Compact-Muon-Solenoid: Eines der vier Experimente am Large-Hadron-Collider am CERN

Register	Funktion	Mögliche Werte	nom. Wert
IPRE	Preamp Input Fet Current Bias	$n \cdot 4 \mu\text{A}$	98
IPCASC	Preamp cascode Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	52
IPSF	Preamp Source Follower Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	34
ISHA	Shaper Input FET Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	34
ISSF	Shaper Source Follower Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	34
IPSP	APSP Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	55
IMUXIN	Multiplexer Input Current Bias	$n \cdot 1 \mu\text{A}$	34
ISPARE	Not Used	-	-
ICAL	Calibrate Edge Generator Current Bias	$n \cdot 625 \text{ electrons}$	29
VFP	Preamp Feedback Voltage Bias	$-1,25\text{V} + (7,5 \text{ mV} \cdot n)$	30
VFS	Shaper Feedback Voltage Bias	$-1,25\text{V} + (7,5 \text{ mV} \cdot n)$	60
VPSP	APSP Voltage Level Adjust	$+1,25\text{V} - (7,5 \text{ mV} \cdot n)$	40
CDRV	Calibrate Output Mask	-	-
CSEL	Calibrate Delay Select	$3,125/\text{delay}$	-
MODE	Mode of Operation of Chip	-	-
LATENCY	Delay Between Write and Trigger Pointers	$n \text{ Clockcycle}$	-
MUXGAIN	Sets Gain of Multiplexer	5-Values for range $\pm 20\%$	-
ERROR	Holds Error Flags	-	-

**Tabelle 3.1:** I<sup>2</sup>C-Register des APV25 und die Funktionen. Mögliche Werte die angenommen werden können und die nominellen Werte [Jon01].

Um die Funktionalität der einzelnen Vorverstärker und Shaper und die folgende analoge Signalverarbeitung zu testen, besteht die Möglichkeit, über einen internen Pulsgenerator definierte Ladungsmengen auf die Eingänge der Vorverstärker zu geben. So ist es möglich, die einzelnen Kanäle des APV25 zu kalibrieren.

### APV25 Register

Über verschiedene I<sup>2</sup>C-Register können die Einstellungen des APV25 verändert und alle aktuellen Einstellungen ausgelesen werden. So ist während des laufenden Betriebs eine ständige Kontrolle der Parameter möglich. Einige Register sind für die Teststation von untergeordneter Funktion und sind in das APV25-Design integriert um einige Tests bezüglich der Steuerströme für Vorverstärker und Shaper durchzuführen. Für diese sind Empfehlungen gemacht, mit welchen an der Teststation überwiegend gearbeitet wurde. Sie sind in Tabelle 3.1 aufgezählt.

Ein wichtiges Register für den Betrieb des APV25 ist das Error-Register, welches es erlaubt, mögliche Fehler zu finden. Es können Latenz und FIFO<sup>9</sup>-Fehler gelesen werden. FIFO-Fehler treten auf, wenn der Speicher, in dem die Pipelineadressen für die Ausgabe der Spannungsamplituden hinterlegt sind, mehr als 31 Adressen aufnehmen soll. Latenz-Fehler treten immer dann auf, wenn der Abstand zwischen Write- und Read-Pointer nicht der eingestellten Latenz entspricht. Die Latenz wird im Latenzregister eingestellt. Sie gibt die Zeit in Taktzyklen an, die zwischen dem Schreiben und dem Auslesen der Pipeline vergehen soll. Im Register ICAL wird die Größe der für die Kalibration wichtigen Ladungsmengen eingestellt. Man kann diese in Schritten von 625 Elektronen variieren und so eine umfangreiche Kalibrierung der einzelnen Kanäle

<sup>9</sup>FIFO meint einen Speicher, der nach dem Prinzip First In - First Out arbeitet

Bit-Nummer	Funktion	0	1
5	Polarität des Vorverstärker	nichtinvertierend	invertierend
4	Read-out-Frequenz	20 MHz	40 MHz
3	Read-out-Mode	Deconvolution	Peak
2	Kalibration	ON	OFF
1	Trigger-Mode	3-Sample	1-Sample
0	analoge Signalverarbeitung	OFF	ON

**Tabelle 3.2:** Das APV25-Mode-Register

le vornehmen. Über das Mode-Register kann die Arbeitsweise des APV25 eingestellt werden. Über sechs von acht Bits werden die verschiedenen Modi gesetzt. Die Bedeutungen dieser sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

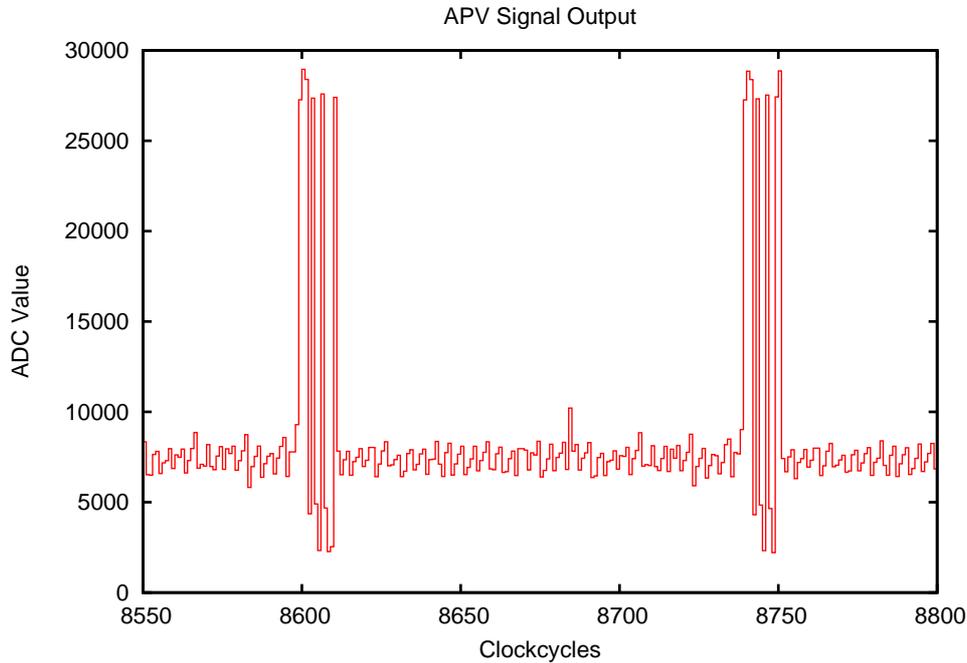
### 3.1.3 Trigger und Datenausgabe

Während des Betriebs wird der APV25 über einen LVDS-Eingang auf die Systemclock synchronisiert. Über einen weiteren LVDS-Eingang wird die Datenausgabe gesteuert, indem man verschiedene dreistellige Bitmuster sendet. Ein *101* auf der LVDS-Leitung sendet ein Softreset an den APV25. Es werden die Pipelinepointer zurückgesetzt und auf die Latenz eingestellt. So ist es immer nötig, nach jedem Verändern des Latenz-Registers ein Softreset zu senden.

Um die Datenausgabe zu starten, wird eine *100*-Sequenz auf der Triggerleitung generiert. Im Peakmode werden die vom Vorverstärker erzeugten Spannungen ausgegeben, welche entsprechend der eingestellten Latenz in der Pipeline zurückliegen. Im Multi- und im Deconvolutionmode werden drei Samples aus der Pipeline ausgelesen und an den analogen Signalprozessor übergeben. Im Multimode werden diese drei Samples ausgegeben, was es ermöglicht den Spannungspuls aus dem Shaper mit der Taktfrequenz abzutasten. Im Deconvolutionmode werden die drei Samples im analogen Signalprozessor addiert und an den Multiplexer übergeben. Der Multiplexer fasst alle Samples der verschiedenen Kanäle zusammen und gibt sie in ungeordneter Reihenfolge aus. Sendet man nun eine Kombination aus Triggern, ist es möglich über eine längere Zeit hinweg den Puls abzutasten. Die maximale Anzahl von Triggern, die man hintereinander senden kann, ist begrenzt durch den FIFO, der eine Speicherkapazität für 31 Samples hat. So ist die maximale Anzahl an Triggern im Peakmode 31 und im Multimode 10.

Um einen Kalibrationspuls in die Vorverstärker zu injizieren, sendet man eine *110*-Sequenz über die LVDS-Leitung. Sendet man im richtigen Zeitabstand einen Trigger, kann man den Ladungspuls mit dem APV25 erfassen. Der Zeitabstand zwischen Kalibrationstrigger und Trigger sollte der im I<sup>2</sup>C-Register eingestellten Latenz entsprechen.

Das ausgehende Signal des APV25 ist ein Strom in einen Bereich von  $\pm 4$  mA. Wenn keine Daten gelesen werden ist der Ausgang auf logisch 0 mit Synchronisationspulsen alle 35 Taktzyklen. Wird ein Trigger ausgelöst, wartet der APV25 auf einen Syn-



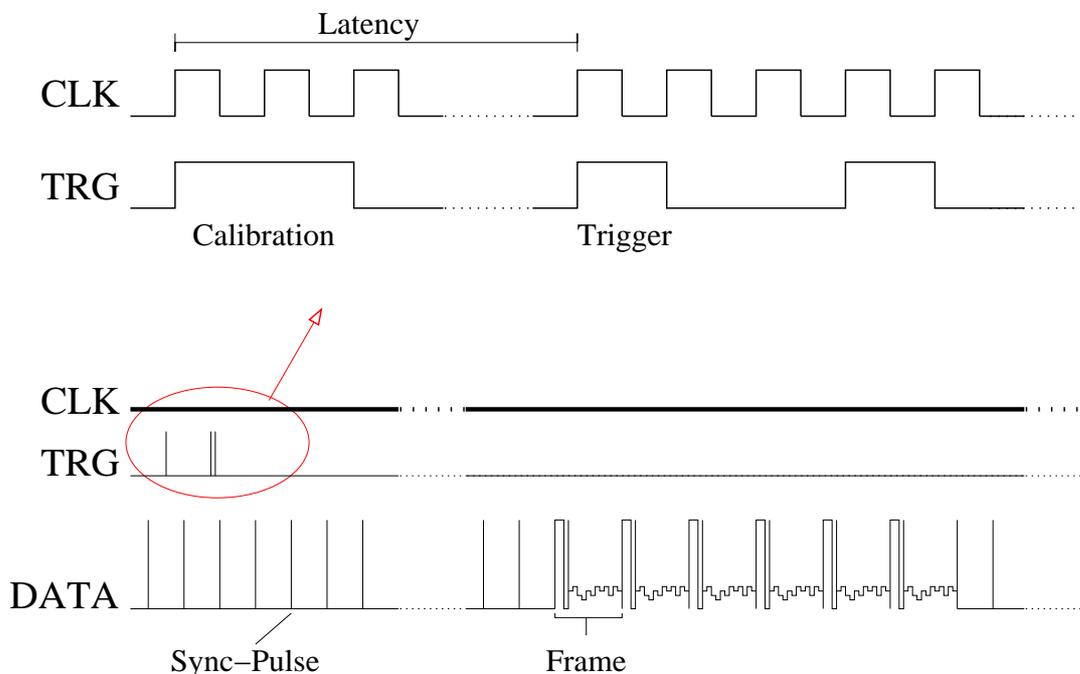
**Abbildung 3.5:** Ein kompletter Frame des APV25-Outputs. Er besteht aus einem digitalen Header, welcher aus 111, den Adresse-Bits und dem Error-Bit zusammengesetzt ist, und dem analogen Teil mit den Pulshöhen der einzelnen Kanäle. Die zwei differenziellen Signale sind zu einem zusammengefasst, indem die Differenz gebildet wird. Der etwas erhöhte Puls im mittleren Bereich könnte ein Treffer gewesen sein.

chronisationspuls, um die Daten auszugeben. Die Ausgangssignale zu einem Trigger sind in Frames organisiert. Ein Frame der Teststation ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Er besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, einem digitalen und einem analogen. Der digitale Teil beginnt immer mit dreimal logisch 1, woran man im laufenden Datenstrom die einzelnen Frames identifizieren kann. Danach folgt eine 8-Bit Adresse, welche den Speicherplatz in der Pipeline angibt. Wenn mehrere Frontends im System laufen, kann man an ihr überprüfen, ob diese synchron laufen. Nach der Adresse folgt ein Errorbit. Es ist normalerweise auf logisch 1. Ist es auf logisch 0, so ist ein Fehler in der internen Logik aufgetreten. Das I<sup>2</sup>C-Register gibt dann nähere Auskunft.

Nach dem Kopf des Frames folgen nun über 128 Taktzyklen die Pulshöhen der 128 Kanäle. Diese werden nicht in fortlaufender Nummerierung ausgegeben, sondern aufgrund der Multiplexerstruktur umgeordnet. Wenn  $n$  die Nummer der vom Multiplexer ausgegebenen Pulshöhe ist, ergibt sich die Kanalnummer  $Nr_{Kanal}$  am Sensor aus [Jon01]:

$$Nr_{Kanal} = 32 \cdot (n \bmod 4) + 8 \cdot INT\left(\frac{n}{4}\right) - 31 \cdot INT\left(\frac{n}{16}\right) \quad (3.1)$$

Nach den Daten folgt entweder ein weiterer Frame wie in der Abbildung oder ein Synchronisationspuls. Detailliertere Informationen über den Aufbau und die Funktionsweise des *APV25-S1* findet man in [L. 99],[Jon01] und [Nev99].



**Abbildung 3.6:** Schema der Datenausgabe des APV25 im Multimode. Unten sind Clock, Trigger und ausgehende Daten des APV25 dargestellt. Mit Punkten sind übersprungene Zeitabschnitte symbolisiert. Der Aufbau des zusammengesetzten Triggers ist oben zu sehen.

Trigger und Clock werden mittels eines *Spartran-3E* FPGA-Bord realisiert. Über I<sup>2</sup>C-Befehle können verschiedene Register gesetzt werden, mit denen man die Taktfrequenz und die Kombinationen der Trigger wählt. Die Frequenz lässt sich in einem Bereich von 500 kHz bis 50 MHz variieren. Es ist möglich, mehrere Trigger hintereinander auszugeben. Diese können noch mit einem Trigger zur Kalibrierung kombiniert werden. Man kann angeben, wieviel Zeit in Taktzyklen zwischen der Injektion der Kalibrationspulse und der Auslese verstreichen soll. Eine mögliche Triggerkombination und die resultierende Datenausgabe des APV25 ist in Abbildung 3.6 schematisch dargestellt. Der FPGA erzeugt außerdem den Trigger, der die Digitalisierung der ADC-Karte startet.

## 3.2 Steuerung der Teststation

Wie oben schon erwähnt können alle Komponenten der Teststation über den PC gesteuert und ausgelesen werden. Es wurde eine umfangreiche Steuersoftware erarbeitet, mit der sich weitestgehend alle Aufgaben der Teststation erfüllen lassen. Einige grundlegende Funktionen wurden vollständig automatisiert. Als Entwicklungsumgebung stand der *Borland C++-Builder* zur Verfügung.

### 3.2.1 Software

Die Software der Teststation hat zwei Aufgaben. Eine ist es, die Betriebsparameter zu steuern und auszulesen. Folgende Parameter sind in diesem Zusammenhang wichtig:

- Depletionsspannung am Sensor
- Versorgungsspannungen des APV25
- APV25-Register
- Triggerparameter
- ADC-Parameter
- Temperatur

Eine andere Aufgabe ist es, geeignete Funktionen zum Messen bereitzustellen. Es können Sensor- und Frontendcharakteristiken aufgenommen werden. Dazu kann man Scans über alle mögliche Betriebsparameter der einzelnen Komponenten machen. Das bedeutet, dass man einen Betriebsparameter über einen geeigneten Bereich variiert und dann Leckstrom, Rauschen, Pedestals oder am Sensor entstandene Ladungsmengen misst. Desweiteren ist es möglich, den Sensor radioaktiver Strahlung auszusetzen und diese zu messen. Dazu ist eine Kette von Algorithmen nötig, um aus den Datenströmen, die die ADC-Karte liefert, die wichtigen Informationen herauszubekommen. Im anschließenden Abschnitt sollen diese Algorithmen nochmal genauer beschrieben werden. Einige Screenshots der Software sind im Anhang A.2 zu finden.

Nachdem alle wichtigen Betriebsparameter eingestellt sind, kann die Messung gestartet werden. Jeder Messung ist eine individuelle Run-Nummer zugeordnet, um Verwechslungen der aufgenommenen Datensätze auszuschließen. Der Datennahme an der Teststation ist folgendes Schema untergeordnet (siehe Abbildung 3.7).

- **Datennahme der ADC-Karte starten**

Um Daten zu nehmen wird ein Thread gestartet, der auf einen externen Trigger wartet. Hat ein Trigger die Datennahme ausgelöst, werden 6 Kanäle digitalisiert und für den späteren Gebrauch in einem Datencontainer zwischengespeichert.

- **Trigger auslösen**

Um den Trigger auszulösen, muss ein I<sup>2</sup>C-Befehl an den FPGA gesendet werden. Das gilt sowohl für den vom FPGA erzeugten zusammengesetzten Trigger für den APV25, als auch für denjenigen für die ADC-Karte. So können über bestimmte I<sup>2</sup>C-Kommandos die Resetpulse, Trigger und Kalibrationstrigger ausgelöst werden.

- **Zuordnen der Frontends zu den Kanälen**

Um später die Daten genau zuzuordnen zu können, müssen die Kanäle der ADC-Karte genau den Frontends zugeordnet sein. Dies muss im Vorfeld der Messung geschehen. Ab dieser Stelle geschieht die Datenanalyse für jeden Frontend nacheinander.

- **Extrahieren der Frames**

Mittels der in der Datenerfassung definierten `FrameDecomposer` werden die einzelnen Frames aus den Rohdaten extrahiert. Dazu ist es nötig dem `FrameDecomposer` ausführliche Informationen über die Zusammensetzung des Triggers und über den Modus, in welchem der APV25 läuft, mitzuteilen. So kann jeder Frame genau einer EventID, einer TriggerID im Event und einer Nummer zur jeweiligen TriggerID zugeordnet werden. Letzteres ist nur von Bedeutung, wenn der APV25 im Multimode arbeitet, und zu jedem Trigger drei Frames gehören. Der `FrameDecomposer` legt einen Container an, in welchem alle für den Frame relevanten Eigenschaften abgespeichert werden. Dazu gehören die beschriebenen Triggerzuordnungen, die Pipeline-Adresse, das Error-Bit und die Pulshöhen der einzelnen Kanäle. Die Pulshöhen der Kanäle werden entsprechend umgeordnet und einer Pedestalkorrektur unterzogen. Die Pedestalkorrektur wird im nächsten Absatz genauer beschrieben.

- **Herausfinden interessanter Ereignisse (Events)**

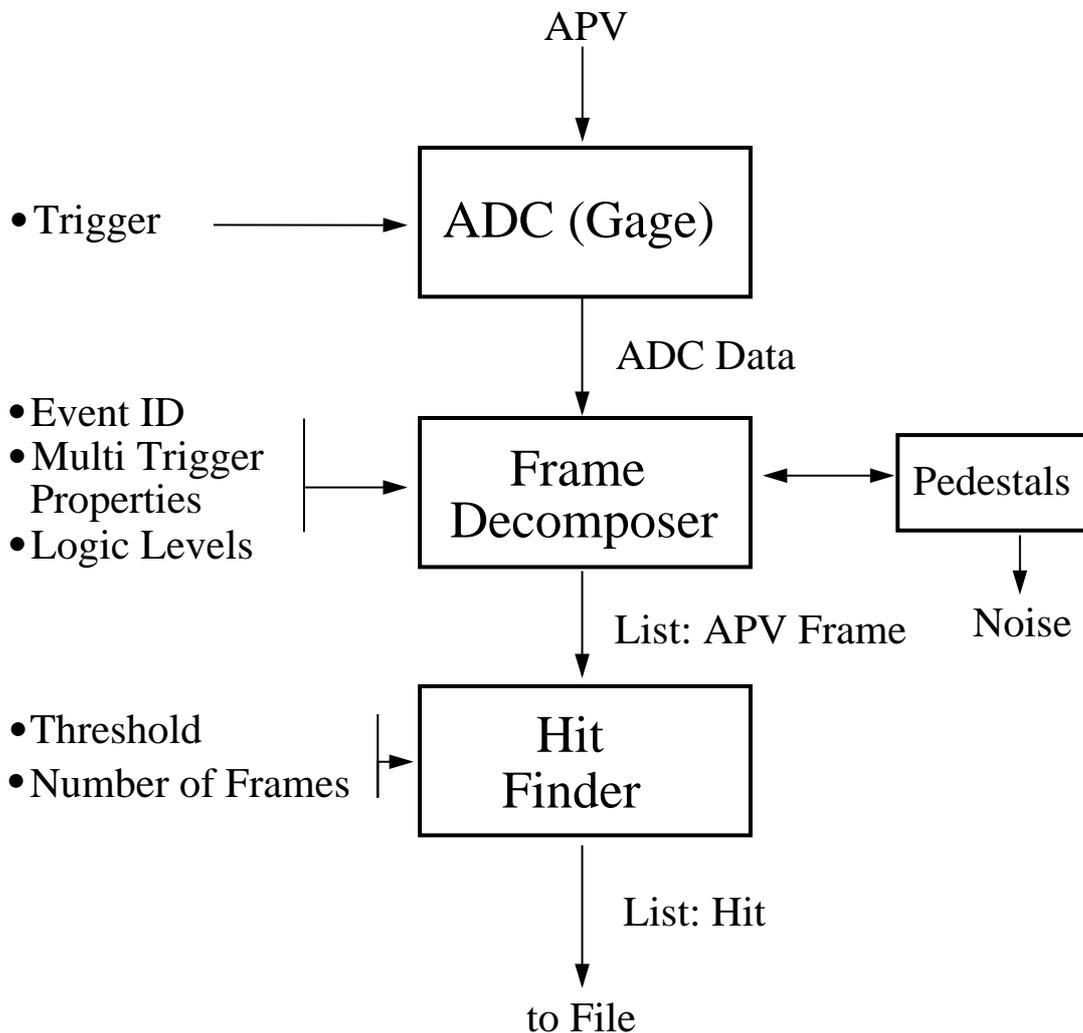
Mit dem `HitFinder` können nun aus den Frames die Treffer (Hits) herausgesucht werden. Dazu benötigt der `HitFinder` alle `APVFrames` zu einen Event, eine Diskriminatorschwelle und ein Minimum, in wievielen Frames der Hit über der Schwelle sein muss, um die Treffer vom Rauschen unterscheiden zu können. Sind die Hits gefunden, wird wiederum ein Container, in der Software als `APVHit` bezeichnet, angelegt. In diesem werden die Hit-Informationen gespeichert. Dazu gehört der Kanal, in dem der Hit gefunden wurde, in welchem Frame der Hit das erste mal über der Schwelle war, wie lang er über der Schwelle war und die maximale Pulshöhe. Zu Testzwecken gibt es die Variante alle für den Hit relevanten Frames zu erfassen und alle Pulshöhen in den `APVHit` zu füllen.

- **Onlinemonitoring und Sicherung der Daten**

Um bei laufendem Betrieb die Funktionalität der Anlage kontrollieren zu können, ist die Möglichkeit eines Onlinemonitoring integriert. Es werden laufend die extrahierten `APVFrames`, das Rauschen und die Pedestals der einzelnen Kanäle angezeigt. Des Weiteren ist ein `ClusterFinder` integriert, der aus den gefundenen Hits die zu einem Cluster zugehörigen heraussucht. Es werden die Clusterenergien histogrammiert und es gibt eine Übersicht über die Clustergrößen (Multiplizität). Gibt es bei der Extraktion der Frames oder bei der Suche nach Hits Probleme, können diese meist sehr einfach erkannt werden.

## Pedestalkorrektur

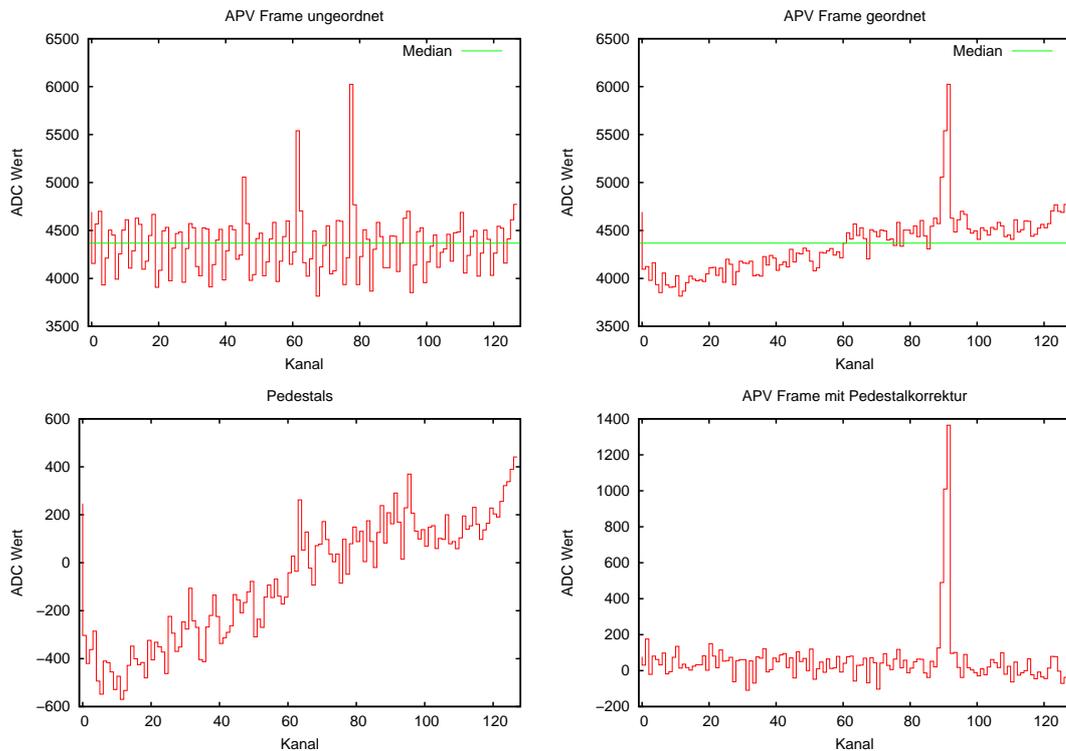
Sind die ADC-Werte für einen Frame extrahiert, müssen diese noch hinsichtlich der Pedestals korrigiert werden (Abbildung 3.8). Dazu ist es wichtig eine Nulllinie für jeden Frame zu bestimmen. Diese kann man nicht vorher festlegen, da sie aufgrund variierender Messbedingungen schwanken könnten. Sie wird für jeden Frame einzeln ermittelt, indem aus den ADC-Werten der Median bestimmt wird. Das garantiert, dass stark abweichende Kanäle nicht berücksichtigt werden. Solche Kanäle sind zum Beispiel



**Abbildung 3.7:** Überblick über die Datenextraktion an der Teststation. Die Pfeile geben an, in welche Richtung Daten geleitet werden.

diese, in denen Ladungen von Treffern enthalten sind und somit bedeutend mehr Inhalt haben.

Für die Pedestalkorrektur wird für jeden Kanal einzeln die Differenz aus ADC-Wert und Nulllinie ermittelt. Diese werden dann in einen Container geschrieben, der 1000 Einträge der jeweils letzten Frames enthält. Um dann den Frame zu korrigieren, wird der Mittelwert aus 1000 Werten bestimmt. Um den korrigierten Wert der aktuellen Kanäle im Frame zu erhalten, wird der Wert der Nulllinie und der Pedestalwert vom unkorrigierten abgezogen. Somit ist gewährleistet, dass, auch wenn sich die Nulllinie und die Pedestals der einzelnen Kanäle ändern, diese während der laufenden Messung angepasst werden. Aus den abgespeicherten Pedestals kann das Rauschen des Kanals ermittelt werden, indem die Standardabweichung aus den 1000 Werten bestimmt wird.



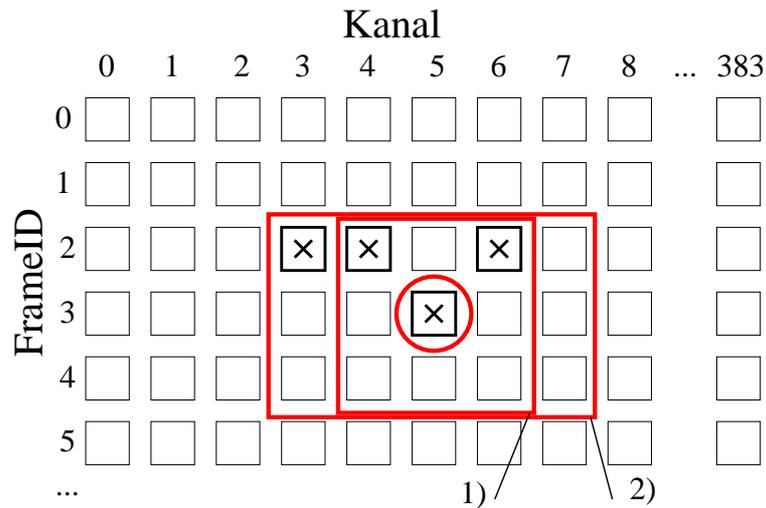
**Abbildung 3.8:** Es sind die Frames als Zwischenschritte für die Pedestalkorrektur dargestellt. Die vertikale Linie in den oberen Abbildungen entspricht der mit dem Median bestimmten Baseline des Frames. Die Grafik unten links enthält die Mittelwerte der Pedestals pro Kanal und unten rechts ist ein vollständig korrigierter Frame mit Hit (um Kanal 90) dargestellt.

### Suche nach Clustern

Damit während des Betriebs der Energieverlust der einzelnen Teilchen schon dargestellt werden kann, müssen alle Streifen herausgesucht werden, die zu einer Ladungswolke im Sensor gehören. Die Ladung teilt sich auf mehrere Kanäle auf, wenn die Ladungswolke größer als der Bereich eines Streifens ist. Um den Energieverlust bestimmen zu können, ist es wichtig die gesamte Ladung der Hits zu kennen.

Der `ClusterFinder` arbeitet nach folgendem Prinzip. Es werden alle Hits eines Events in einem zweidimensionalen Container geschrieben. Jeder Hit wird einem Kanal und einem Frame, und zwar dem, in dem die größte Amplitude des Hits zu finden war, zugeordnet. Der `ClusterFinder` macht nichts anderes als zu schauen, ob zu diesem Punkt im Container benachbarte Punkte liegen, in dem wiederum ein Hit zu finden ist (siehe Abbildung 3.9). Die Kanäle entsprechen den Kanälen am Sensor und sind somit von 0 bis 383 durchnummeriert. Da an den Sensorboards einzelne Streifen nicht an den APV25 *gebondet* sind, wird auch bei den übernächsten Nachbarn gesucht. So ist gewährleistet, dass die Cluster durch die fehlenden Kanäle nicht geteilt werden. Schon zusammengehörige Hits werden markiert und den entsprechenden Clustern, den `APVCluster`, zugeordnet. Ist der ganze Container abgesucht, werden die gefundenen

Cluster in einen Vektor geschrieben. Die Summe über die einzelnen Höhen der im Cluster zusammengehörigen Hits ist nun äquivalent zur im Sensor deponierten Ladung. Da für das Onlinemonitoring noch keine Kalibration zur Verfügung steht, werden im Spektrum nur die ADC-Werte aufgetragen. Die Clustermultiplizität ergibt sich aus der Anzahl der getroffenen Kanäle pro Cluster.



**Abbildung 3.9:** Veranschaulichung der Funktionsweise des ClusterFinders. Innerhalb der rot markierten Zellen wird nach 1) nächsten und 2) übernächsten Nachbarn gesucht, in denen Hits zu finden sind. Die 383 Kanäle entsprechen den Kanälen der drei Frontends auf dem Sensorboard.

## Kapitel 4

# Charakterisierung der Sensormodule

Zwei wichtige Messaufgaben sollen mit der Teststation möglich sein. Zum Einen ist es wichtig, neue Sensormodule auf ihre Funktionalität hin zu testen und somit die Funktionalität der Module in Dresden oder an anderen Messständen, wie den in Bonn, zu garantieren. Die andere Aufgabe ist es, anhand einfacher Messungen Erfahrung im Umgang mit Siliziumstreifensensoren zu sammeln, elektrische Eigenschaften zu erfassen, Messungen mit radioaktiven Quellen zu machen und mit den gewonnenen Daten die Auflösungsfähigkeit der Sensoren zu studieren.

### 4.1 Elektrische Charakterisierung

Um einen komplikationsfreien Ablauf der Messungen an der Teststation zu gewährleisten, ist es wichtig die elektrische Funktionalität bei jedem Einschalten der Anlage zu überprüfen. Nach dem Wechsel eines Sensor-Boards ist besondere Aufmerksamkeit geboten, damit durch einen eventuellen Kurzschluss keine Komponenten zerstört werden. So war es wichtig, in der Entwicklungsphase sinnvolle Werte für die einzelnen Parameter zu finden.

Der APV25 benötigt für den Betrieb folgende Spannungen  $VDD$ ,  $VDD/2$  und  $VSS$ . Sie werden bei Inbetriebnahme der Teststation auf die im Manual [Jon01] vorgegebenen Spannungen 2,5 V für  $VDD$  und 1,25 V für  $VDD/2$  eingestellt. Diese Spannungen stellen sich automatisch ein, wenn das Versorgungsboard angeschaltet wird. Dazu muss es noch keine Verbindung mit dem PC und der Steuersoftware geben. So werden die Frontends nicht durch zu hohe Spannungen beschädigt. In Tabelle 4.1 sind die Spannungen und Ströme und die daraus folgenden Leistungsaufnahmen aufgelistet. Diese Werte sind für drei APV25 gleichzeitig gemessen, da ein Sensor-Board drei Frontends enthält. Die Taktfrequenz beträgt 50 MHz. Die unterschiedlichen Leistungsaufnahmen resultieren aus den verschiedenen Modi den APV25 zu betreiben. Als erstes sind alle Ströme zur Speisung der analogen Signalverarbeitung ausgeschaltet. So ist nur der digitale Teil in Betrieb. Wenn der analoge Teil eingeschaltet wurde und noch keine Daten angefordert werden, steigen die Ströme an. Soll der APV25 nun Daten extrahieren,

	Spannung	Strom	Leistungsaufnahme
<b>nur digitaler Teil</b>			
VDD	2,51 V	0,11 A	0,28 W
VDD/2	1,25 V	0,00 A	0 W
<b>mit zugeschalteten Analogstufen</b>			
VDD	2,51 V	0,31 A	0,78 W
VDD/2	1,25 V	0,17 A	0,21 W
<b>laufende Messung</b>			
VDD	2,51 V	0,33 A	0,83 W
VDD/2	1,25 V	0,68 A	0,85 W

**Tabelle 4.1:** Leistungsaufnahme bei 50 MHz Taktfrequenz für drei unterschiedliche Betriebszustände des APV25. Die Leistungsaufnahme für drei Frontends beträgt bei vollen Betrieb nicht mehr als 1,7 W.

Register	Wert	Register	Wert
IPRE*	98	VFP	30
IPCASC*	52	VFS	160
IPSF*	34	VPSP	33
ISHA*	34	CDRV	variabel
ISSF*	34	CSEL	variabel
IPSP*	55	MODE	61
IMUXIN*	34	LATENCY	variabel
ICAL	variabel	MUXGAIN	16

**Tabelle 4.2:** Registereinstellungen des APV25 wie sie an der Teststation häufig verwendet werden. Die mit \* gekennzeichneten Register sind in der vom Manual vorgeschlagenen Einstellung

steigen die Ströme und die daraus resultierende Leistungsaufnahme noch weiter.

Da an der Teststation maximal nur sechs Frontends gleichzeitig laufen können, ist insgesamt mit nicht mehr als 3,34 W Leistungsaufnahme zu rechnen. Das heißt, dass die Frontends nicht extra gekühlt werden muss.

## 4.2 Bestimmung wichtiger Betriebsparameter

### 4.2.1 APV25-Registereinstellungen

Um die APV25-Registereinstellungen zu überprüfen, also die Werte aus dem Manual zu bestätigen, wurde für einen festen Satz an Registereinstellungen jeweils ein Register über den ganzen Wertebereich durchgefahren und die aufgenommenen Pulshöhen, das Rauschen und das Signal-zu-Rauschverhältnis aufgenommen. Es konnte bestätigt werden, dass alle nominellen Werte sinnvollen Einstellungen entsprechen. Im Anhang B sind die dazugehörigen Plots zu finden. In Tabelle 4.2 sind alle Registereinstellungen nochmal aufgeführt. Die nicht mit \* Gekennzeichneten sind an die Gegebenheiten der Teststation angepasst. Den Registern *ICAL*, *CDRV*, *CSEL* und *LATENCY* kann kein fester Wert zugeordnet werden, da sie während des Betriebs verändert wer-

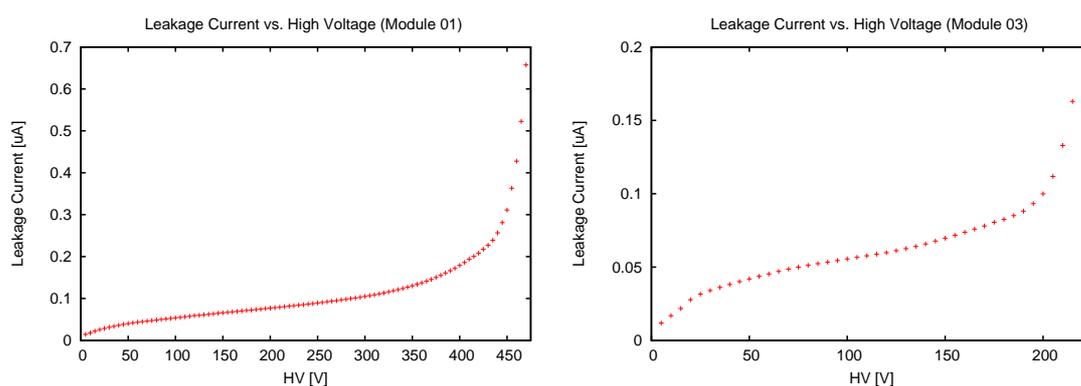
den.

Im Mode-Register werden folgende Einstellungen gesetzt. Es muss beachtet werden, an welcher Seite des Sensors der APV25 *angebunden* ist. Die Module, die derzeit an der Teststation betrieben werden, sind an der p-Seite mit dem Frontend verbunden und demzufolge muss die Polarität des Eingangsverstärkers invertiert werden. Die Auslesefrequenz beträgt 40 MHz. Da die Datenrate an der Teststation nicht sehr hoch ist, wird der APV25 im Peakmode betrieben und im 3-Sample-Mode jedes Sample aus der Pipeline ausgelesen. Außerdem muss für die Messung die analoge Signalverarbeitung eingeschaltet sein.

#### 4.2.2 Bestimmung der Depletionsspannung

Für den Betrieb der Siliziumstreifensensoren ist es von großer Wichtigkeit, die optimale Depletionsspannung zu finden, da zu hohe Spannungen den Sensor zerstören könnten und bei zu kleinen Spannungen die Depletionszone eventuell noch nicht richtig ausgebildet und somit die Nachweiseffizienz für geladene Teilchen geringer ist.

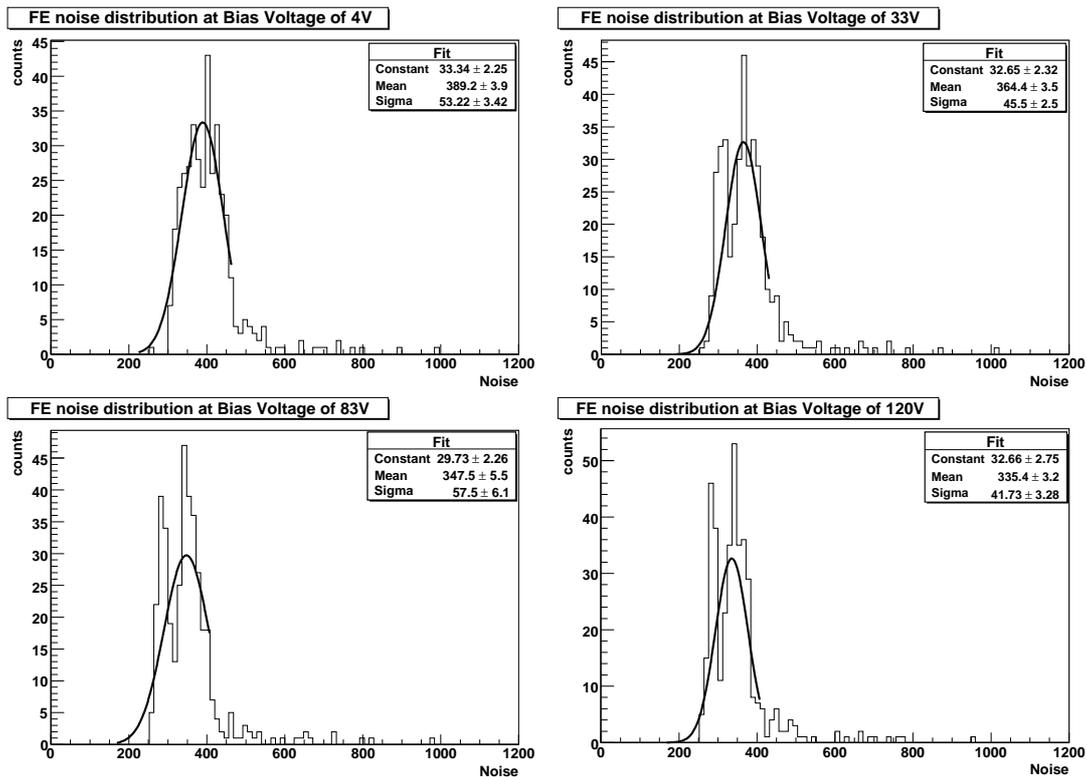
Um den Bereich für die optimale Spannung abzuschätzen, wurden für drei Module älterer Bauart die Leckströme bis in den Durchbruchbereich aufgenommen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Diese Messungen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Durchbruch liegt für die zwei gemessenen Module bei sehr unterschiedlichen Spannungen. Für Modul 01 kann man ab 400 V einen starken Anstieg des Stromes erkennen, bei Modul 03 ab 175 V. Es wurde noch das Modul 02 vermessen und der Durchbruch lag etwa bei 200 V. Die Schwankungen hängen wahrscheinlich von der Qualität der Sensoren ab. Sind diese stark verunreinigt, dann ist der Leckstrom ohnehin größer.



**Abbildung 4.1:** Zwei Leckstrommessungen verschiedener Module. Der Durchbruchbereich der Module unterscheidet sich sehr stark. Bei Module 01 beginnt er etwa bei 400 V, bei Module 03 bei 175 V.

Um die Leckstrommessungen für alle weiteren Detektormodule durchzuführen und diese nicht im Durchbruchbereich zu betreiben, wurde mit Hilfe der drei Probemessungen eine obere Grenze für die Depletionsspannung festgelegt. Dies ist wichtig, da

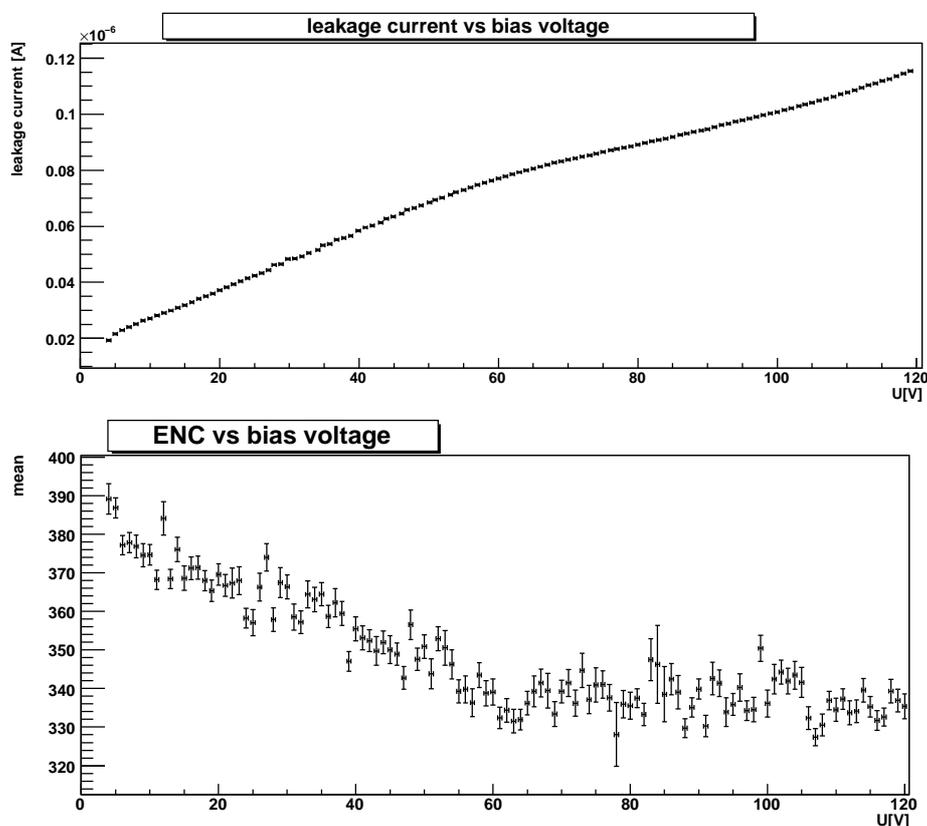
die Leckstrommessung und die Messung zum Rauschen des Sensors möglichst automatisiert laufen sollen und eine ständige Kontrolle der Leckströme nicht möglich ist. Die niedrigste Durchbruchspannung lag für Modul 03 bei 175 V. Das bedeutet, dass die Hochspannung an den Modulen auf keinen Fall größer als 175 V sein darf. Die maximale Spannung der automatisierten Messungen ist auf 120 V festgelegt. Dies entspricht ungefähr der doppelten Depletionsspannung, so dass der richtige Bereich für die Spannungen gut zu erkennen sein dürfte.



**Abbildung 4.2:** Das mittlere Rauschen der Kanäle bei fester Hochspannung wird mit Hilfe eines Gaußfits bestimmt. Nach oben hin abweichende Kanäle werden im Fit nicht berücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der optimalen Depletionsspannung ist, das kapazitive Rauschen am Sensor zu beobachten, wenn man die Hochspannung am Sensor erhöht (siehe Abschnitt 2.1.2). Da an den fertigen Modulen keine Möglichkeit besteht, direkte galvanische Verbindungen mit dem Sensor herzustellen, muss man das Rauschen mit Hilfe des Frontends ermitteln. Das Rauschen lässt sich in der Art bestimmen wie es im Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurde. Dieses Rauschen ist die Summe aus dem Rauschen des Frontends und dem Rauschen das am Sensor auftritt. Für die Bestimmung der optimalen Depletionsspannung aus dem Rauschen ist der absolute Wert nicht von Bedeutung. Es reicht, die relativen Änderungen zu betrachten.

Konkret wird für die Messung das Rauschen jedes einzelnen Kanals in Abhängigkeit der Hochspannung aufgenommen. Für die Analyse wird ein mittleres Rauschen bestimmt, indem die Werte aller Kanäle in ein Histogramm gefüllt werden. Das mittlere Rauschen resultiert aus dem Mean-Parameter eines Gaußfits, der über die Werte gelegt wird. Der Wertebereich für den Fit wird nach oben beschränkt, so dass zu hohem Rauschen abweichende Kanäle nicht berücksichtigt werden. Für Modul 09 sind in Abbildung 4.2 für vier Spannungen die dazugehörigen Histogramme dargestellt. Trägt man nun das mittlere Rauschen über der Hochspannung auf, ist zu sehen, dass das Rauschen ab einer bestimmten Spannung nicht mehr sinkt. An dieser Stelle ist die Depletionszone über die ganze Sensordicke ausgebreitet.

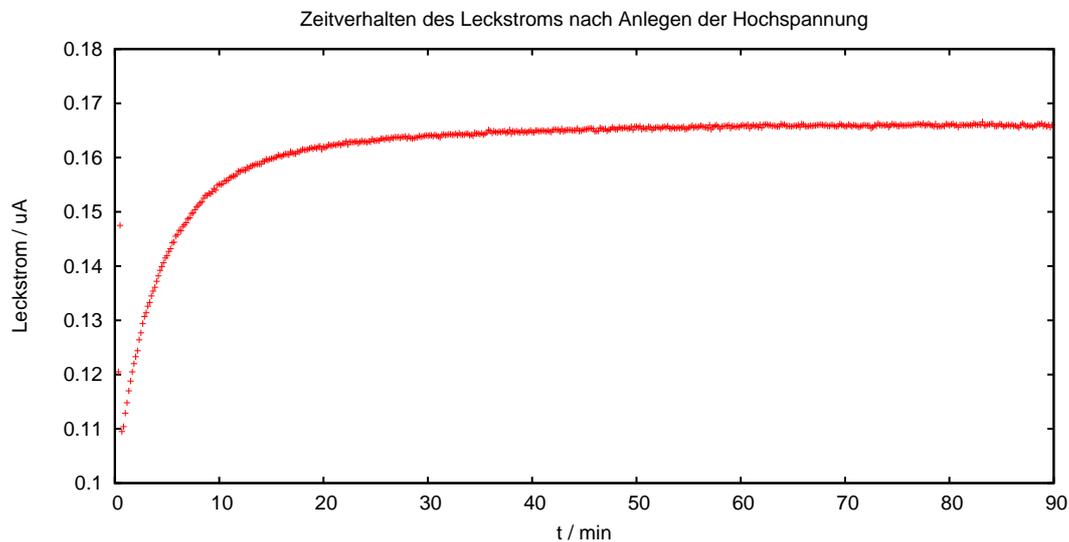


**Abbildung 4.3:** Leckstrom und Rauschen in Abhängigkeit der Hochspannung am Sensor. Die Fehler des Rauschens resultieren aus der Standardabweichung des Gaußfit.

In Abbildung 4.3 ist für das Modul 09 der Leckstrom und das Rauschen über der Spannung aufgetragen. Über das Abknicken des Leckstromes und über die Sättigung des Rauschens kann man nun eine optimale Depletionsspannung für dieses Modul ermitteln. Diese liegt bei 65 V. Beide Methoden liefern das gleiche Ergebnis, so dass man von ihrer Richtigkeit ausgehen kann.

### Ausbildung der Depletionszone

Das Wachsen der Depletionszone folgt dem Anlegen der Hochspannung etwas verzögert. Zum Einen ist zwischen Hochspannungsversorgung und Sensor noch ein Tiefpass, der für die Stabilität der Hochspannung am Sensor sorgt. Zum Anderen beeinflussen Driftvorgänge der freien Ladungsträger im Sensor die Stabilität der Depletionszone. Um immer mit einem vollständig depletierten Sensor zu arbeiten, ist es von Bedeutung die Größenordnung dieser Verzögerungszeit abzuschätzen. Dazu wurde an den Sensor eine Hochspannung von 60 V angelegt. Ab dem Anlegen der Hochspannung wurde nach festgelegten Zeitintervallen der Leckstrom gemessen. Verändert sich der Leckstrom nicht mehr und nimmt man an, dass sich die Temperatur nicht mehr signifikant ändert, kann man davon ausgehen, dass der Sensor vollständig depletiert ist. Das Resultat so einer Messung ist in Abbildung 4.4 dargestellt und man kann ihr entnehmen, dass sich der Leckstrom durch den Sensor nach etwa 20 min nicht mehr ändert. Diese Zeit ist abzuwarten, bevor Messungen mit ionisierender Strahlung gestartet werden. Der Einfluss der Temperatur müsste an dieser Stelle noch genauer untersucht werden. Doch besteht zur Zeit nur die Möglichkeit die Temperatur in der Nähe des Sensors zu messen. Da erst ein Temperatúrausgleich mit der umgebenden Luft stattfinden muss, ist die Temperaturmessung zeitlich verzerrt. Ein Temperatursensor auf dem Sensor-Board im unmittelbaren thermischen Kontakt mit dem Sensor würde hier Abhilfe schaffen und ist in neueren Versionen vorgesehen.



**Abbildung 4.4:** Zeitverhalten des Leckstromes bei einer angelegten Hochspannung von 60 V. Nach ca. 20 min ist der Leckstrom konstant und man kann davon ausgehen, dass der Sensor vollständig depletiert ist. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass in den ersten Sekunden der Leckstrom fällt. Dies ist auf das Anlegen der Hochspannung selbst zurückzuführen, da etwa 40 s benötigt werden, um 60 V zu erreichen. In dieser Zeit kommt es zu Umladevorgängen in den für die Stabilität der Hochspannung wichtigen Kondensatoren.

### 4.3 Interne Kalibration

Um den APV25 zu kalibrieren, wird für alle Kanäle nacheinander eine definierte Ladungsmenge in den Vorverstärker injiziert. Die Ladungsmenge hängt davon ab, was im *ICAL*-Register eingestellt ist und ergibt sich aus  $n \cdot 625$  e, wenn  $n$  der im Register eingestellte Wert ist. Wird nun für einen Kanal der volle Registerbereich durchgemessen, kann man eine genaue Zuordnung von den Werten, die bei der Digitalisierung entstehen, zu den erfassten Ladungsmengen am Vorverstärker machen. Dies ist für jeden Kanal einzeln erforderlich. Es kann vorkommen, dass durch starkes Rauschen in einem Kanal ein Eintrag entsteht, der gerade über der Diskriminatorschwelle liegt. Auf diese Weise ordnet man der im *ICAL*-Register eingestellten Ladungsmenge einen falschen ADC-Wert zu. Damit rauschende Kanäle keinen Einfluss auf die Kalibration haben, ist es notwendig, bei der Analyse auch nur die Kanäle zu betrachten, in die Ladungen injiziert wurden.

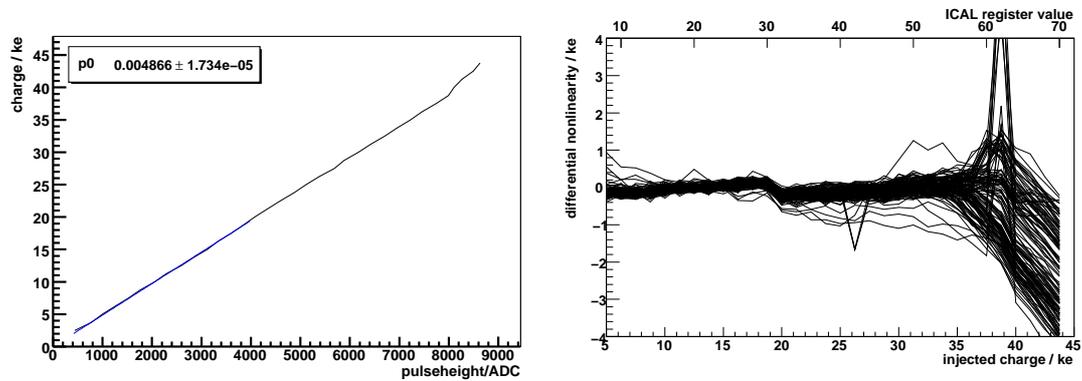
Da es nicht zweckmäßig ist, alle Punkte der Kalibration zu speichern, wird ein Fit mit der Funktion  $Q = p \cdot ADC$  an den Graphen angepasst (Abbildung 4.5). So ist die spätere Zuordnung von ADC-Werten zu Ladungen durch eine einfache Rechnung möglich. Und es sind für jeden Frontend nur 128 Parameter und die zugehörigen Fehler zu speichern. Für die Kalibrierung der Messdaten nach der Messung stehen die Kalibrationsparameter dann als ASCII<sup>1</sup>-File oder in einer Datenbank abgespeichert zur Verfügung.

In den Abbildungen 4.5 ist für einen Kanal die Kalibrationskurve und die Abweichung aller Kanäle vom Fit dargestellt. Man kann sehen, dass im Bereich kleiner Ladungsmengen bis 30 ke der lineare Fit gute Ergebnisse erzielt. Erst im Bereich größerer Ladungsmengen wird die Parametrisierung unbrauchbar. Des Weiteren kann man bei der *ICAL*-Registereinstellung von 31 Abweichungen sehen, die beim Erzeugen der Ladungspulse entstehen. Anscheinend haben die Widerstände zum Erzeugen der Pulse kleine Schwankungen.

### 4.4 Messungen mit ionisierender Strahlung

An der Teststation ist es möglich, über lange Zeiträume hinweg kosmische Myonen beim Durchqueren des Sensors nachzuweisen. Bei einem horizontal angeordneten Detektor rechnet man mit einem Myonenfluss von etwa  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  [C. 08]. Das heißt, dass wir mit der Fläche unserer Teleskopsensoren etwa  $I \approx 4.4 \text{ min}^{-1}$  zu erwarten haben. Diese Rate ist zu klein, um innerhalb eines Tages signifikante Messergebnisse zu bekommen, was die Untersuchung der Sensormodule und der entstandenen Daten sehr zeitaufwendig macht. Um die Eventraten zu erhöhen, kann man eine Quelle über dem Sensor positionieren. Dazu wurde häufig mit einer <sup>90</sup>Sr Quelle gearbeitet. Es handelt sich dabei um einen Beta-Strahler mit einer maximalen Elektronenergie von 546 keV [LUN09]. Für das gesamte Zerfallsspektrum müssen die Tochterkerne mit berücksichtigt werden. So hat das beim Zerfall entstehende <sup>90</sup>Y eine Zerfallsenergie

<sup>1</sup>American Standard Code for Information Interchange

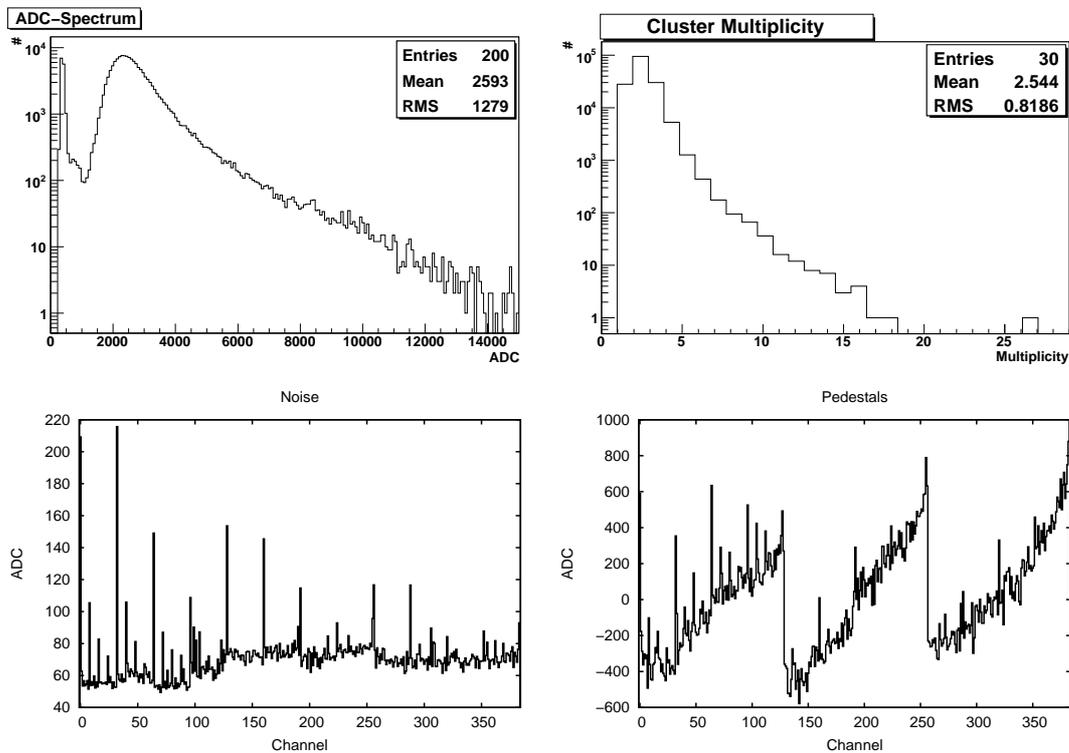


**Abbildung 4.5:** Fit zur Parametrisierung der Kalibration eines Kanals. Der Fit reicht über einen Bereich an ADC-Werten von 400 bis 4000. Rechts ist die Abweichung vom Fit für alle Kanäle dargestellt. Den Knick bei 31 im ICAL-Register kann man mit Abweichungen beim Erzeugen der Ladungspulse erklären.

von 2,282 MeV. Mit der zur Verfügung stehenden Quelle kann man Eventraten von  $86 \frac{1}{s}$  erzeugen. Dies ist die Anzahl der Teilchen pro Zeiteinheit, die der Szintillator unterhalb des Sensors erfasst. Mit dem entstandenen Signal werden die Trigger ausgelöst. Doch werden nicht alle Teilchen nachgewiesen, da Totzeiten durch die Datenerfassung entstehen. Beim Aufnehmen der maximalen Anzahl von Frames pro Event, ist es möglich etwa 12 Events pro Sekunde zu erfassen. Diese Rate ist ausreichend, um innerhalb weniger Stunden gute Energieverlustmessungen zu erhalten.

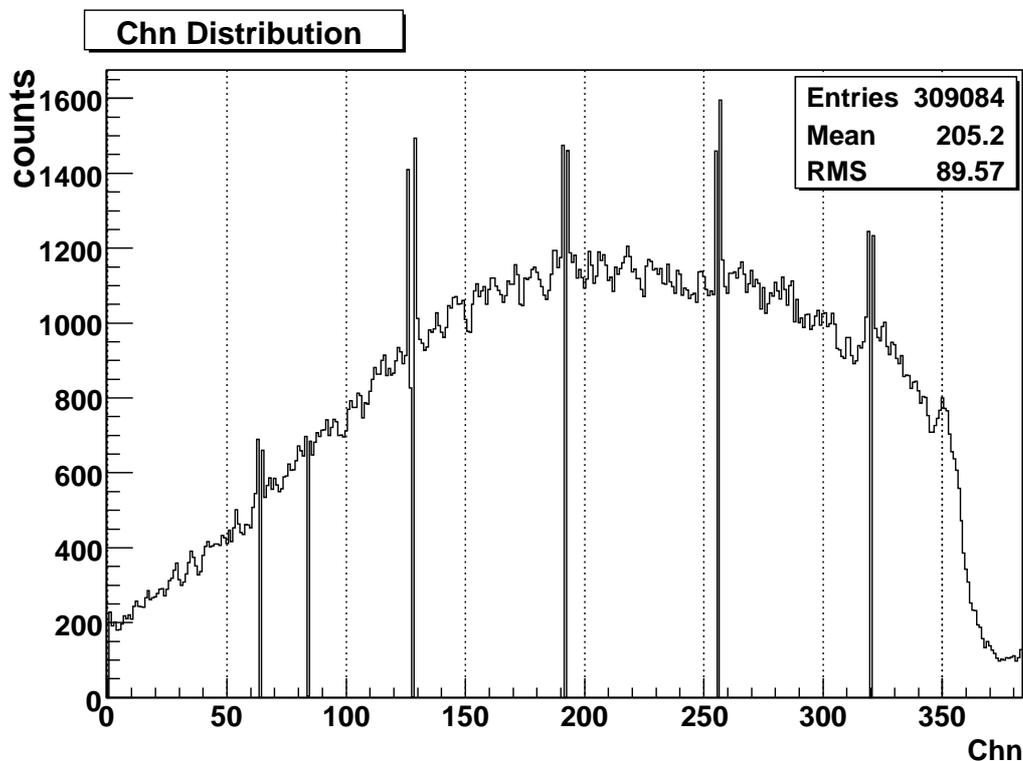
In Abbildung 4.6 ist der Energieverlust und die Clustermultiplizität einer Messung mit  $^{90}\text{Sr}$  dargestellt. Dies ist das Spektrum, welches beim Onlinemonitoring entstanden ist und es ist zu beachten, dass dieser Darstellung noch keine Kalibration zugrunde liegt und somit die am Sensor erfassten Ladungen als ADC-Werte angegeben sind. Die Kalibration soll offline, also nach der Messung geschehen, um Rechenzeit zu sparen. Das Rauschen und die Pedestals sind ebenfalls während der Messung zugänglich und können zur Funktionskontrolle der Anlage dienen.

Des weiteren kann man auf einfache Art und Weise die Intensitätsverteilung der Quelle bestimmen (siehe Abbildung 4.7). Dazu wird die Anzahl der Hits einer Messung pro Kanal aufgetragen. Man erkennt, dass die Quelle nicht genau über der Mitte des Sensors positioniert war. Außerdem ist zu sehen, dass ab Kanal 352 hin zu höheren Kanälen die Anzahl an erfassten Treffern sinkt. Da der Sensor an dieser Stelle auf das Sensor-Board geklebt ist, werden viele der Elektronen aus der Quelle hier schon gestoppt und erreichen nicht den Szintillator um einen Trigger auszulösen. Würde man nicht die Treffer pro Kanal auftragen, sondern die Schwerpunkte der gefundenen Cluster mit einer minimalen Clustermultiplizität von 2, könnte man noch bessere Ergebnisse erzielen. Die hier im Plot stark abweichenden Kanäle würden nicht mehr auftreten. Doch kann man anhand dieser wichtige Aussagen machen, die für die Charakterisierung der Module gerade interessant sind.



**Abbildung 4.6:** Beim Onlinemonitoring entstandene Histogramme zum Energieverlust und zur Multiplizität einer Messung mit  $^{90}\text{Sr}$ . Es ist zu beachten, dass der Messung noch keine Kalibration zugrunde liegt und somit der Energieverlust über ADC-Werten aufgetragen ist. Unten sind das Rauschen und die Pedestals der Kanäle aufgetragen.

Einige Kanäle haben gar keine Einträge. Sie sind entweder nicht *gebondet* oder beim Auslesen sind Probleme aufgetreten. Andere Kanäle haben mehr Inhalt als die benachbarten. Diese zeigen entweder ein erhöhtes Rauschen oder sie liegen direkt neben den nicht *gebondeten* Kanälen und die entstandenen Ladungsträger wurden von diesem Kanal aufgesammelt. Aufgrund produktionstechnischer Schwierigkeiten sind an jedem APV25 der Kanal 0 und 64 von vornherein nicht angeschlossen. Dieser Fakt ermöglicht es, gerade diese Kanäle als Beispiel für andere nicht angeschlossene Kanäle zu nehmen. Da alle Kanäle eines Sensor-Boards gezeigt sind, könnte man Unstetigkeiten in den Eintragungsmengen zwischen den Frontends sehen. Dies deutet darauf hin, dass das Signal unterschiedlich stark verstärkt wird, die Diskriminatorschwelle aber für alle Frontends gleich ist. So könnte man die Schwelle für jeden Frontend separat einstellen. Dieses Problem wird bei der späteren Analyse für die Ortsauflösung, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, berücksichtigt, indem bei jedem Hit nochmals die Amplitude mit dem Rauschen des Kanals verglichen wird. Ist die Amplitude des Hits signifikant kleiner als das Rauschen wird dieser verworfen.



**Abbildung 4.7:** Verteilung der angesprochenen Kanäle des Moduls 12 einer Messung mit  $^{90}\text{Sr}$ . Kanal 0, 64, 128, 192, 256 und 320 sind nichtgebundene Kanäle. Da die deponierte Ladung von den Nachbarkanälen erfasst wird, sind die Einträge dieser etwas erhöht. Weitere defekte Kanäle sind die Kanäle 83 und 127. Die geringen Einträge ab Kanal 352 sind das Resultat der Befestigung des Sensors auf der PCB.

## 4.5 Qualitätssicherung

### 4.5.1 Funktionstest

Eine wichtige Aufgabe der Teststation ist der Funktionstest von Detektormodulen. Um Zeit zu sparen, sollten diese Tests weitestgehend automatisiert werden. Folgende Eigenschaften sollten immer aufgenommen werden, wenn ein Sensormodul auf Funktionalität hin überprüft werden soll:

- Leckstrommessung und Messung des kapazitiven Rauschens des Sensors, um die optimale Depletionsspannung zu bestimmen
- Aufnehmen einer internen Kalibration für alle Kanäle
- Messen einer Quellenverteilung zur Identifizierung fehlerhafter Kanäle

Diese Messung wurde für alle in Dresden befindlichen Module durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 4.3 aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass es doch erhebliche Schwankungen zwischen den Sensormodulen gibt. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Zum Einen stammen die Sensoren aus verschiedenen Produktionsreihen, in denen

Modul	$V_{Dep}$	Leckstrom bei $V_{Dep}$	Defekte Kanäle
4	80 V	0,064 $\mu$ A	mehr Einträge: 0, 1, 2, 8-12, 69, 70, 128, 129, 136-140, 265, 257, 264 -268
9	65 V	0,085 $\mu$ A	weniger Einträge: 35
11	70 V	0,062 $\mu$ A	weniger Einträge: 135, 207
12	75 V	0,064 $\mu$ A	weniger Einträge: 85
14	40 V	0,105 $\mu$ A	weniger Einträge: 338, 352 mehr Einträge: 353
15	30 V	0,105 $\mu$ A	
16	35 V	0,14 $\mu$ A	mehr Einträge: 118 weniger Einträge: 119

**Tabelle 4.3:** Ergebnisse einiger Modultests. Zu den Modulen wurden die optimale Depletionsspannung  $V_{Dep}$  und der Leckstrom an dieser Stelle bestimmt. Da die genauen Ursachen der abweichenden Kanaleinträge nicht bekannt ist, ist nur die Richtung der Abweichung angegeben.

die Eigenschaften der Wafer<sup>2</sup> schon erheblich schwanken können. Weitere Probleme treten beim *bonden* der Frontends an die Sensoren auf. Bei Modul 4 sind viele nach oben abweichende Kanäle zu finden. Die genaue Ursache dafür ist nicht klar, da die Möglichkeit die betroffenen Kanäle einzeln zu kontaktieren derzeit noch nicht besteht. Bei den anderen Modulen kommt es eher zu dem Effekt, dass bei manchen Kanälen weniger Einträge zu finden sind. Dies hat offenbar seine Ursache in der Verbindung zum Sensor. Ist der Widerstand im Vergleich zu den Nachbarkanälen groß, kann die Ladung schlechter abgesaugt werden.

#### 4.5.2 Archivierung der Moduleigenschaften

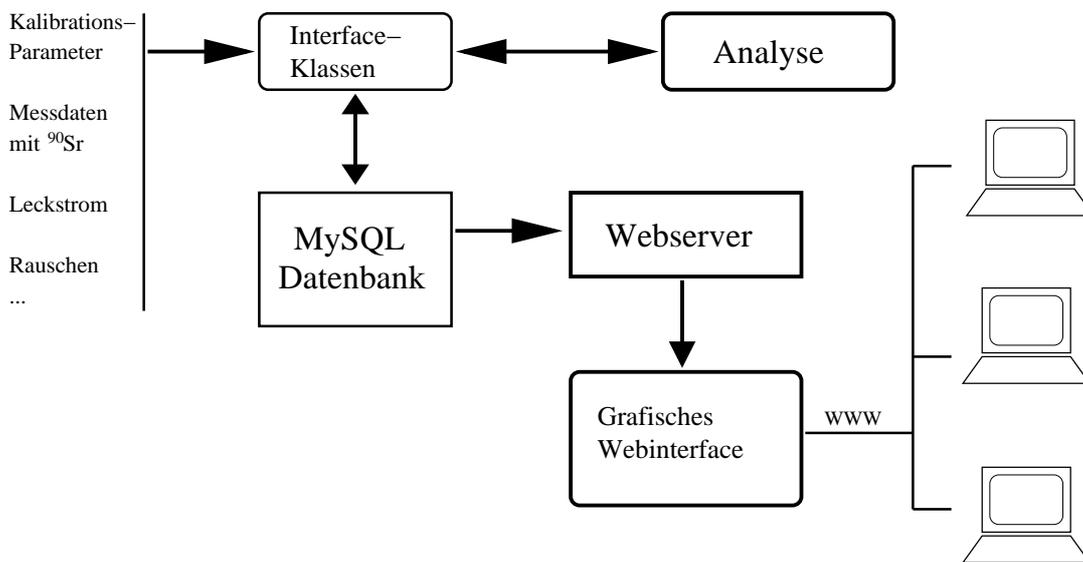
Um die Fülle an Datensätzen zu den einzelnen Modulen gut zu archivieren, ist es sinnvoll diese in eine Datenbankstruktur einzubetten. Dazu wurde eine *MySQL*-Datenbank angelegt. Diese ermöglicht einen einfachen Zugriff auf die enthaltenen Datensätze. Dies soll sowohl über das lokale Netzwerk, als auch über das Internet geschehen können. So können die Moduleigenschaften allen Arbeitsgruppen unabhängig vom Standort leicht zugänglich gemacht werden. Ein schematischer Überblick ist in Abbildung 4.8 zu finden.

Der in Dresden wichtigste Aufgabenbereich dieser Datenbank ist die Aufnahme der Kalibrationsparameter. Diese werden aus den Kalibrationsmessungen generiert und automatisch den richtigen Datensätzen zugeordnet. Im Anschluss können die Parameter dann unter anderem zur Umrechnung der Trefferamplituden in Ladung herangezogen werden. Dazu wurden Klassen in der Software realisiert, die eine Schnittstelle zwischen der Datenbank und der Analysesoftware bereitstellen. Dem Nutzer wird durch Angabe der Modulnummer des gewünschten Sensormoduls und der bei der Messung verwen-

<sup>2</sup>englisch: Scheibe; Hier als die Bezeichnung für die bei der Produktion von Halbleiterelementen üblichen dünnen Siliziumscheiben

deten Registereinstellungen der gewünschte Datensatz zur Verfügung gestellt.

Eine andere Aufgabe ist es, alle Moduleigenschaften über eine geeignete Weboberfläche übersichtlich zugänglich zu machen. Dazu war es notwendig, einen Webserver zu realisieren, der auf die Datenbank zugreifen kann. Die Analysesoftware muss nun die Eigenschaften der Module ermitteln und geeignete Plots erstellen. Diese werden dann in der Datenbank gespeichert. Über *PHP*<sup>3</sup>-Scripte ist nun in Anfängen eine Weboberfläche realisiert. Einige Beispiele sind im Anhang C zu finden.



**Abbildung 4.8:** Schematische Darstellung der Archivierung und der Nutzung von Moduleigenschaften. Wichtige Eigenschaften können über die Interface-Klassen in die Datenbank gefüllt werden. Über letztere greift auch die Analysesoftware auf die Datenbank zu. Über einen Webserver und das Internet werden alle interessanten Modulcharakteristiken zugänglich gemacht.

<sup>3</sup>Einfache Scriptsprache zum Erstellen von dynamischen Webseiten

# Zusammenfassung und Ausblicke

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, einen Teststand für Siliziumstreifensensormodule aufzubauen. Dabei wurde viel Erfahrung im Umgang mit diesen Detektoren gesammelt. Aus diesen Erfahrungen heraus sind, in einem iterativen Prozess aus Hard- und Softwareentwicklung, wichtige Tests formuliert worden, um solche Sensoren zu charakterisieren. Es können für den Betrieb solcher Module wichtige Eigenschaften bestimmt werden. Zu diesen gehören Leckströme, Rauschen, Fronteneinstellungen, Depletionsspannungen und Kalibrationsparameter aller Kanäle. Diese Eigenschaften können in einer dafür angelegten Datenbank gespeichert werden und sind somit leicht und übersichtlich zugänglich. Zur Zeit ist diese nur in Dresden lokal zugänglich. Das aufsetzen eines robusten Webservers, der die Daten auch für andere Institute zugänglich macht ist eine Aufgabe die viel Zeit in Anspruch nimmt und nicht im Rahmen dieser Arbeit erledigt werden konnte. Doch sind alle Funktionen, für die Anbindung einer solchen Datenbank in bestehende Systeme, bereitgestellt.

Es wurden alle Module, die für die Teststation in Dresden vorgesehen waren, vermessen. Doch da die entwickelten Tests nicht von Anfang an zu Verfügung standen, sind nicht für alle Module die genannten Parameter bestimmt worden. Einige der Sensormodule wurden an andere Standorte gebracht. So müssen die fehlenden Eigenschaften noch vor Ort vermessen werden.

Es ist möglich, Messungen mit ionisierender Strahlung vorzunehmen. Dabei kann man online, also während der Messung, die Funktionsweise des Aufbaus testen und mögliche Fehler aufspüren und beseitigen. Erste Messergebnisse wurden aufgenommen. Die entstandenen Daten können abgespeichert werden, um diese nach der Messung auszuwerten. Die Teststation ist für den Betrieb von zwei Sensorboards ausgerüstet. So besteht die Möglichkeit, mit zwei Sensoren oder mit einem doppelseitig *gebondeten* Sensor Studien zu Ortsauflösung zu machen. Doch ist dies allein ein sehr umfangreiches Gebiet und könnte ein eigenständiges Thema einer weiterführenden Arbeit sein.

Einige Verbesserungen der Teststation sind möglich, die hier kurz zusammengefasst werden sollen. Das feste Anbringen eines Temperatursensors auf dem Sensorboard würde die Erfassung von temperaturabhängigen Größen ermöglichen. Eine Kalibration mit verschiedenen monoenergetischen Photonen müsste aufgenommen werden, um die interne Kalibration auf ihre Genauigkeit hin zu prüfen. Interessante Ergebnisse würde auch die Möglichkeit liefern, die Sensoren direkt galvanisch zu kontaktieren. So könnte man die Eigenschaften einzelner Streifen untersuchen und durch gezielte Manipulation

der Sensoren mögliche Fehler und deren Auswirkungen studieren. Aus diesen Erfahrungen könnte man dann Schlüsse auf das Verhalten des ganzen Sensors ziehen. Ein Beispiel wäre die Auswirkung auf den Leckstrom. Wie hoch ist der Strom eines Streifens und wie stark unterscheidet sich dieser von anderen?

# Anhang A

## Ergänzendes zur Software der Teststation

### A.1 Extrahieren der Frames aus dem Datenstrom

Bei dem `FrameDecomposer` handelt es sich um eine eigene Klasse in der Software der Teststation (vgl. Abschnitt 3.2.1). Diese Klasse ist verantwortlich dafür, aus den Datenströmen, die die ADC-Karte liefert, die Frames des APV25 herauszufinden. Um dies zu realisieren, ist eine Reihe von Schritten nötig. Als erstes muss mitgeteilt werden, wo sich die Diskriminatorschwelle (`fThreshold`) befindet. Dies wird benötigt, um im digitalen Teil des Frames logisch 1 von logisch 0 zu unterscheiden. So werden beim Anlegen des `FrameDecomposer` verschiedene feste Werte eingestellt. `fNrPedestalValues` gibt an, wie groß der Container sein soll aus dem die Pedestals errechnet werden. `fZeroLevel` und `fOneLevel` geben an, an welchen Stellen die Logiklevel zu erwarten sind.

```
FrameDecomposer::FrameDecomposer(int FeId)
: fFeId(FeId)
{

    fNrPedestalValues=1000;
    fZeroLevel=2000;
    fOneLevel=11000;
    fThreshold = 4500;
    SetEps();
    SetInitialEps();

    for (int i=0; i<128; ++i)
    {
        fpedestiterator[i] = 0;
        fPedSum[i] = 0;
    }
}
```

So wird für jeden Frontend ein extra `FrameDecomposer` angelegt. Die Zuordnung geschieht über die `FeID`. Um nun den Frames zu extrahieren übergibt man ein `std::valarray<int>` mit den von der ADC-Karte gesampelten Daten und wie schon in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, die `eventID`, `triggerperiod`, `triggercount` und `apv3sample`, um eine eindeutige Zuordnung der Frames zu gewährleisten. Als Ergebnis liefert der `FrameDecomposer` einen `std::vector<APVFrame>`, in dem alle für ein Event gefundene Frames enthalten sind.

```
std::vector<APVFrame> ExtractFrames(const std::valarray<int>& data,
                                   long int eventID,
                                   int triggerperiod,
                                   int triggercount,
                                   bool apv3sample);
```

Im Folgendem soll genauer auf die Arbeitsweise dieser Funktion eingegangen werden. Es wird nur der *3-Sample-Mode* betrachtet werden, da der *1-Sample-Mode* analog zum *3-Sample-Mode* behandelt wird. Als erstes werden alle für die Funktion wichtigen Variablen angelegt und gegebenenfalls initialisiert.

```
std::vector<APVFrame> FrameDecomposer::ExtractFrames(.....);
{
    fmedian.clear();
    fbaseline.clear();
    frawdata.clear();
    forddata.clear();

    std::valarray<int> _data = data;
    std::vector<APVFrame> framelist;
    int id=0;
    int* Pos = &_amp;_data[0];
    int nrOne = 0;
    long int timestamp = 0;
    int triggerid = 0;
```

Als nächstes wird begonnen die Daten nach den drei Startbits des Frames zu durchsuchen. Mit `Pos` wird immer auf die aktuelle Stelle im Array gewiesen. Diese kann erhöht und erniedrigt werden und so wird Schritt für Schritt das Array durchgesucht, bis man am Ende angelangt ist. Der Diskriminator gibt `true` oder `false` zurück, je nachdem ober der Werte über oder unter der Schwelle `fThreshold` war.

```

if (apv3sample)
{
//hier die routine für den 3 Samplemode
    try
    {
        while (Pos! =&_data[_data.size()])
        {
            if (Diskriminator(*Pos)) nrOne++;
            else nrOne = 0;
            Pos++;
            if (nrOne == 3){
                if (id == 3) {id = 0; triggerid++;}
                timestamp = triggerid * (triggerperiod + 1) ;
                nrOne=0;
                int* Pos_copy = Pos;
            }
        }
    }
}

```

Ist nun ein Frame identifiziert, kann man `GetFrame(int* &it)` auffordern anhand der Position im Array den Frame zu extrahieren. Diese Funktion gibt ein `APVFrame` zurück. Dem `APVFrame` werden nun noch die fehlenden Informationen übermittelt und dann zusammen mit den anderen gefundenen ausgegeben.

```

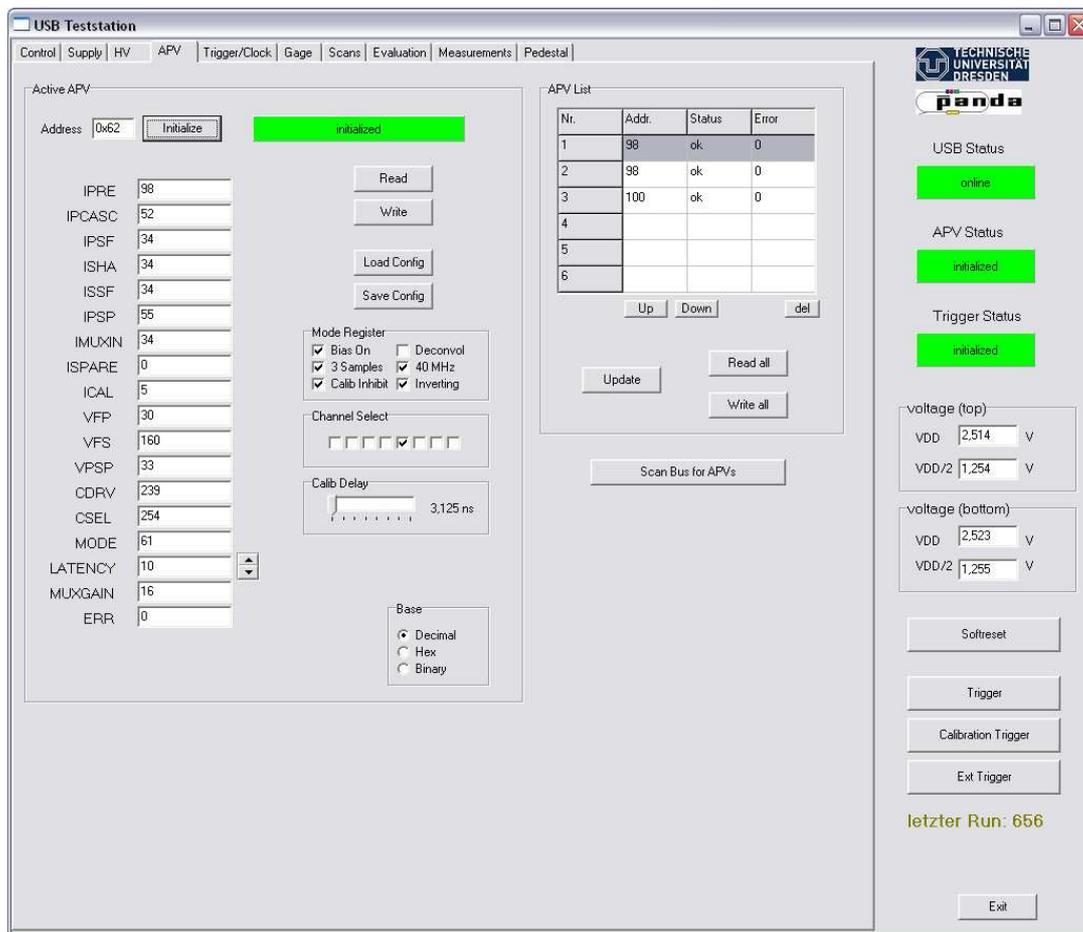
        framelist.push_back(GetFrame(Pos));
        framelist.back().SetEventID(eventID);
        framelist.back().SetTriggerID(triggerid);
        framelist.back().SetTriggerTimestamp(timestamp);
        framelist.back().SetFrameID(id++);
        GetFrameZeroSupp(Pos_copy);
    }
}

} catch (...) {}
}
else
{
//hier die Routine für den 1 sample Mode
.....
}
return framelist;
}

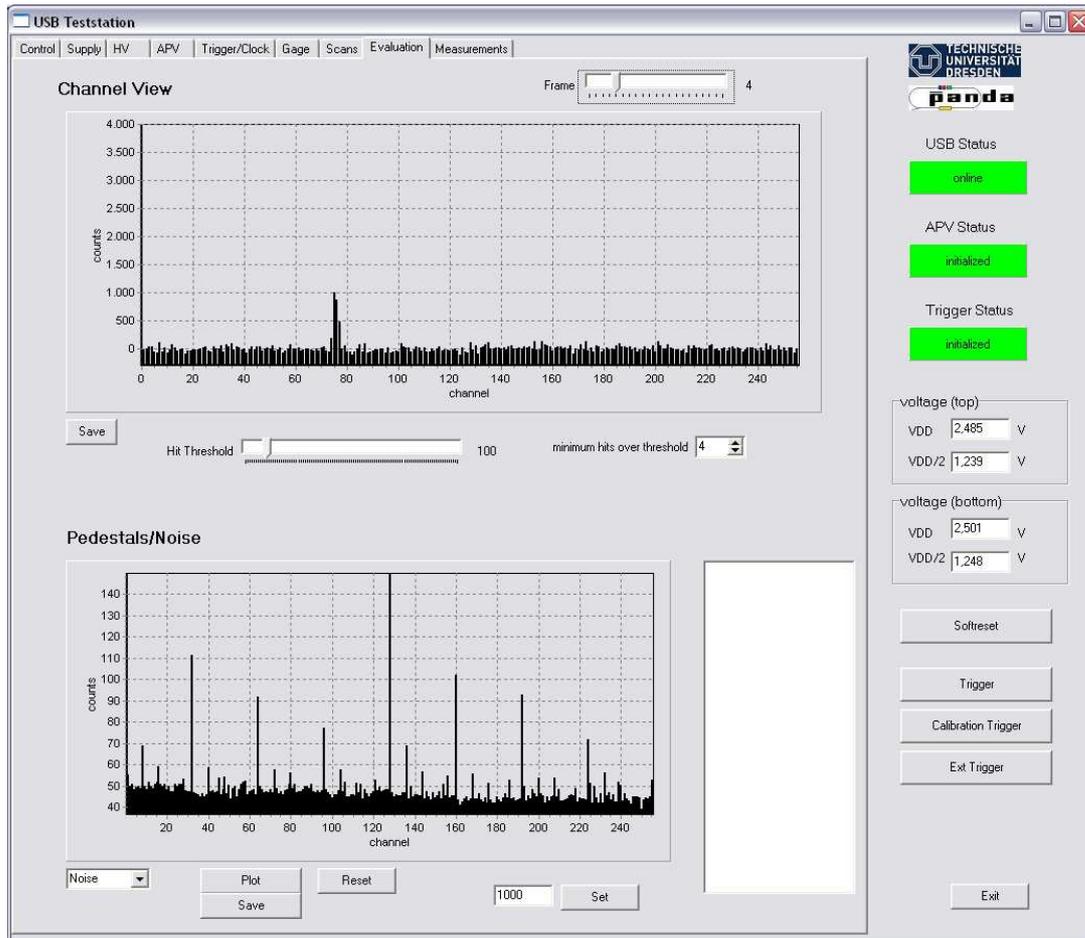
```

## A.2 Grafische Oberfläche der Software

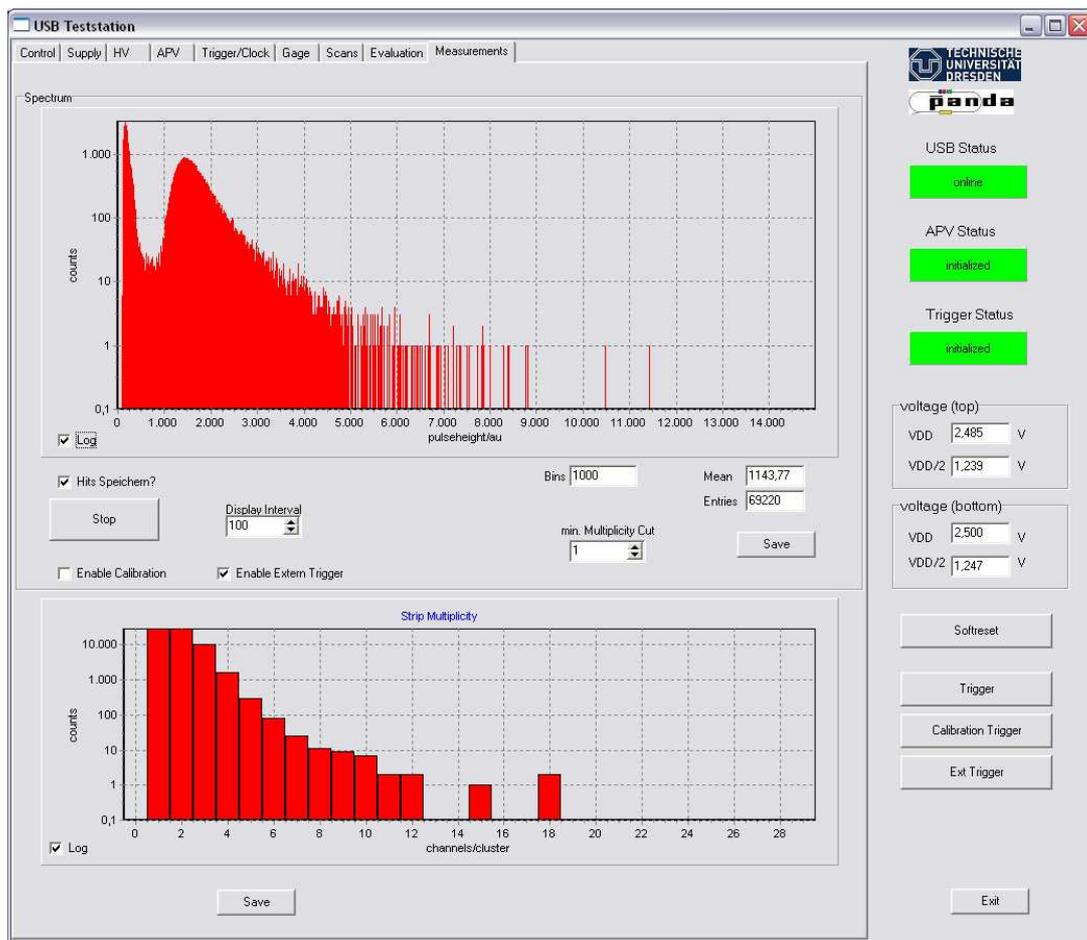
Für die Software der Teststation wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, um die Handhabung vor und während der Messung zu vereinfachen. Es ist möglich alle Betriebsparameter einzustellen und auszulesen. Dazu gehören die Versorgungsspannungen für den APV25, die Hochspannung für die Depletion des Sensors und alle Einstellungen, die für die Verwendung des Triggers erforderlich sind. Eine andere wichtige Aufgabe der Software ist die Visualisierung der bei laufenden Messungen anfallenden Daten. Die einzelnen Schritte der Datenextraktion können eingesehen werden. Dazu gehört das Rauschen der einzelnen Kanäle, die für die Korrektur der Frames wichtigen Pedestals und die beim Clustering entstandenen Trefferamplituden. So kann zu jeder Zeit ein reibungsloser Ablauf gewährleistet werden. Die einzelnen Funktionen sind mit Hilfe einer Reiterstruktur voneinander abgetrennt. Einige Screenshots sind in Abbildung A.1 bis A.3 gezeigt.



**Abbildung A.1:** Teil der Grafischen Oberfläche in der Steuer- und Messsoftware der Teststation. Es gibt die Möglichkeit, für sechs APV25 die Register einzustellen und auszulesen.



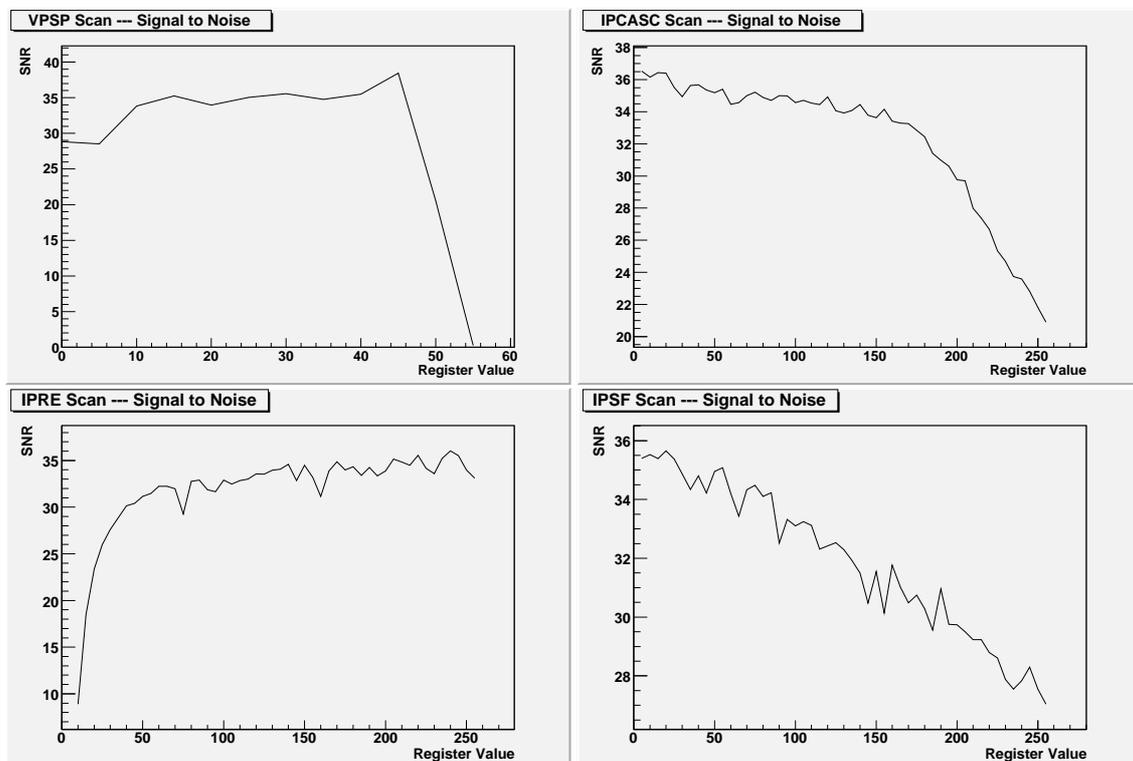
**Abbildung A.2:** Teil der Grafischen Oberfläche in der Steuer- und Messsoftware der Teststation. Im oberen Bereich sind die Pulshöhen der einzelnen Kanäle als ADC-Werte zu sehen. Unten ist das Rauschen der Kanäle dargestellt. Die Nummern bezeichnen die Streifennummer am Sensor. An den Schiebereglern kann man die Schwelle und die minimale Anzahl von Frames über der Schwelle einstellen



**Abbildung A.3:** Teil der Grafischen Oberfläche in der Steuer- und Messsoftware der Teststation. Im Oberen Histogramm ist der Energieverlust und im unteren die Multiplizität dargestellt. Außerdem sind umfangreiche Einstellungen möglich, um die Arbeitsparameter für die Messung anzupassen.

## Anhang B

# APV25-Registerscans



**Abbildung B.1:** Scans über die APV25-Register. Vergleiche Tabelle 3.1. Für jedes Register wurde bei nominaler Einstellung der anderen Register und festem *ICAL* der Registerwert durchgemessen. Hier ist das Signal zu Rauschverhältnis aufgetragen.

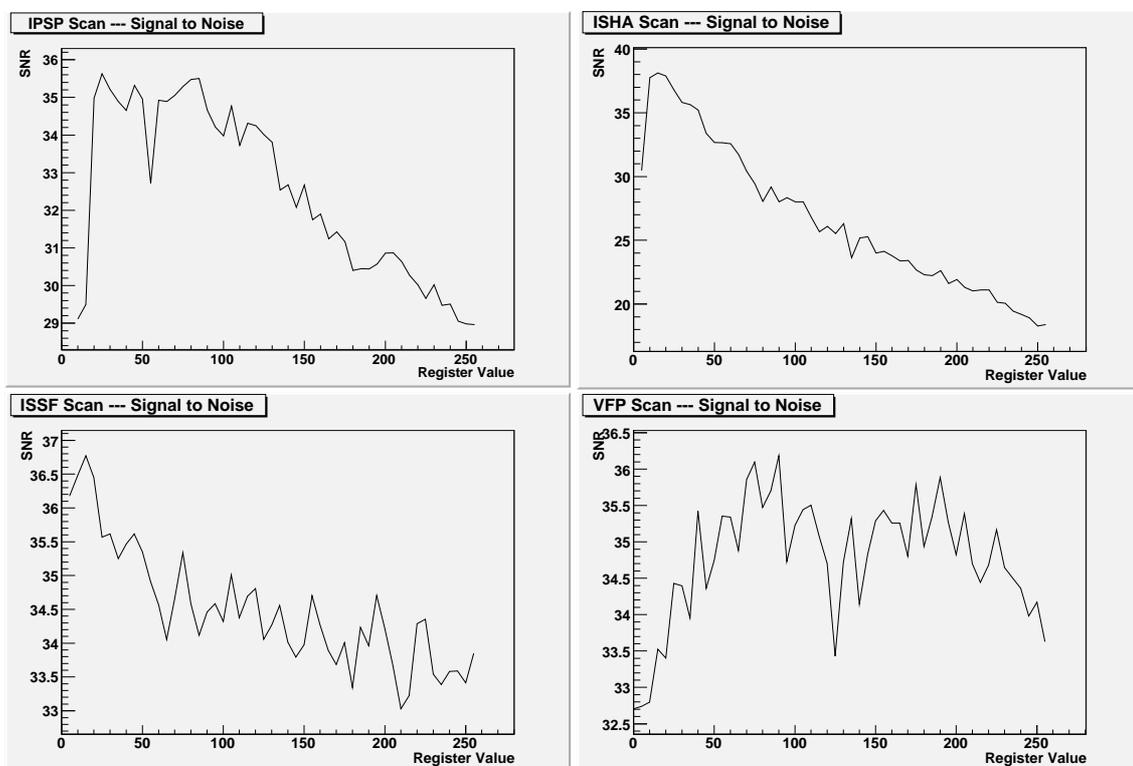
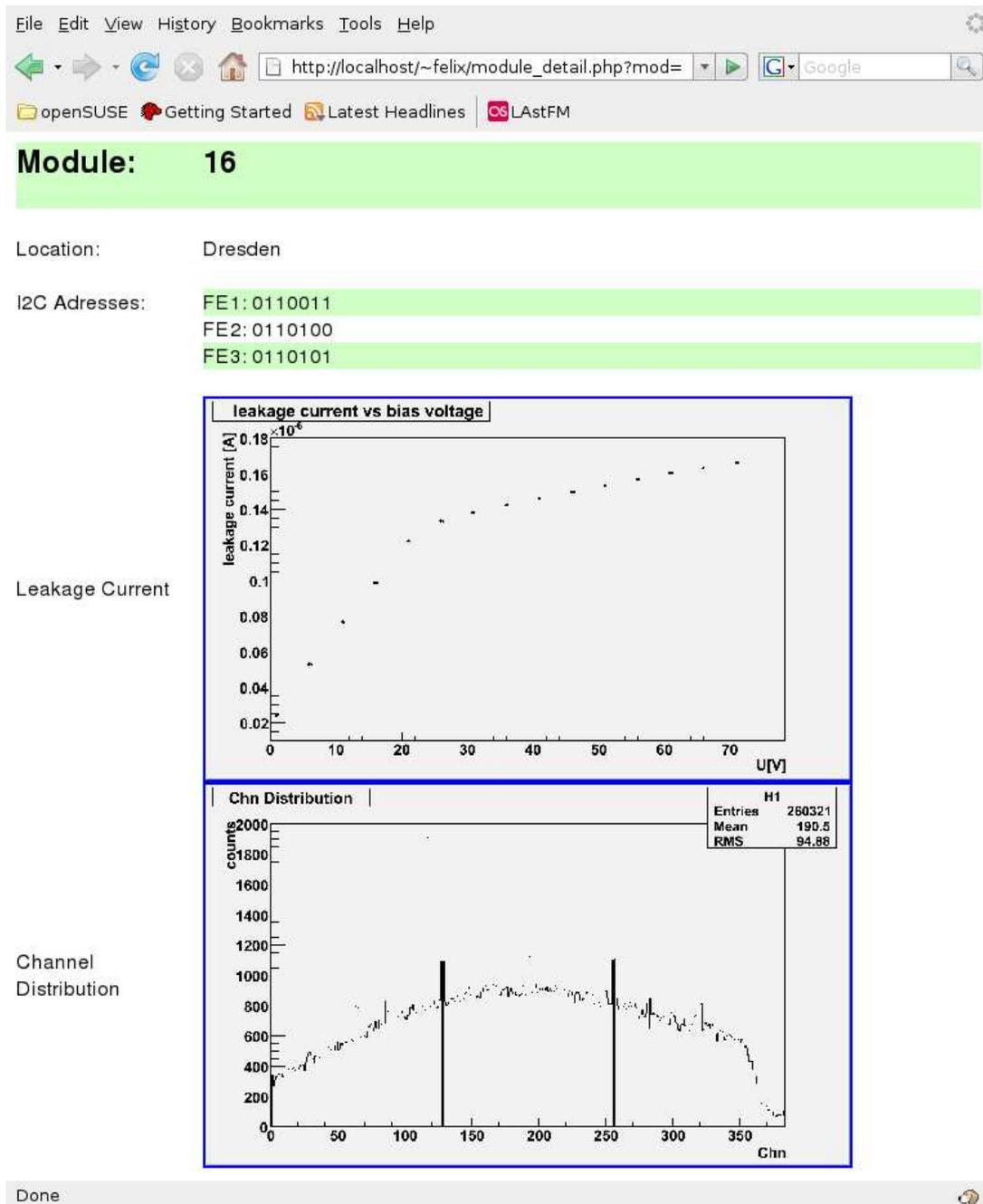


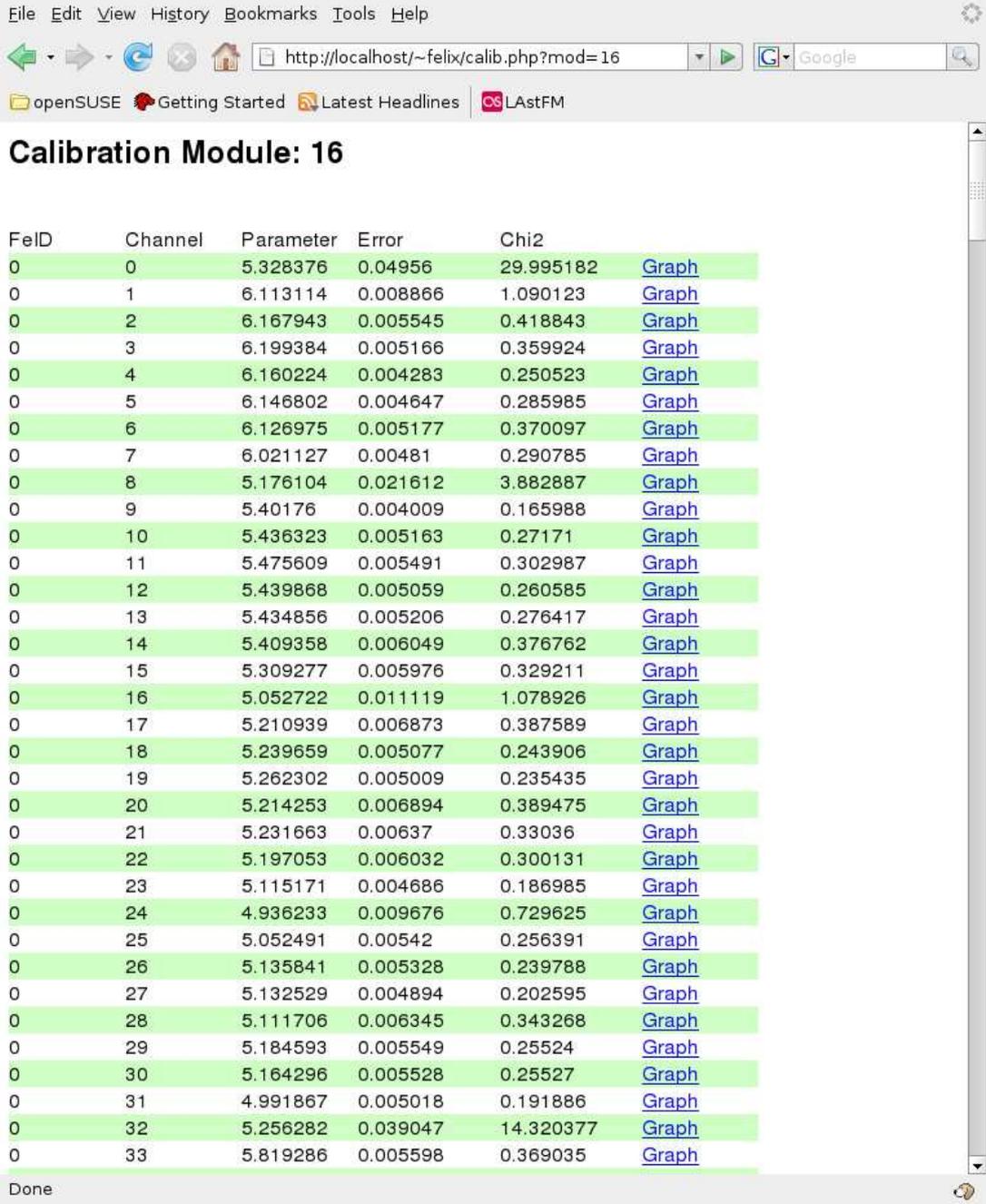
Abbildung B.2: Scans über die APV25-Register.

## Anhang C

# Datenbankzugriff über Webfrontend



**Abbildung C.1:** Die I<sup>2</sup>C-Adressen, die Ergebnisse der Leckstrommessung und der Überblick über die Quellenverteilung und somit über die Funktionalität der Kanäle zusammengefasst auf einer Seite.



Calibration Module: 16

FeID	Channel	Parameter	Error	Chi2	
0	0	5.328376	0.04956	29.995182	<a href="#">Graph</a>
0	1	6.113114	0.008866	1.090123	<a href="#">Graph</a>
0	2	6.167943	0.005545	0.418843	<a href="#">Graph</a>
0	3	6.199384	0.005166	0.359924	<a href="#">Graph</a>
0	4	6.160224	0.004283	0.250523	<a href="#">Graph</a>
0	5	6.146802	0.004647	0.285985	<a href="#">Graph</a>
0	6	6.126975	0.005177	0.370097	<a href="#">Graph</a>
0	7	6.021127	0.00481	0.290785	<a href="#">Graph</a>
0	8	5.176104	0.021612	3.882887	<a href="#">Graph</a>
0	9	5.40176	0.004009	0.165988	<a href="#">Graph</a>
0	10	5.436323	0.005163	0.27171	<a href="#">Graph</a>
0	11	5.475609	0.005491	0.302987	<a href="#">Graph</a>
0	12	5.439868	0.005059	0.260585	<a href="#">Graph</a>
0	13	5.434856	0.005206	0.276417	<a href="#">Graph</a>
0	14	5.409358	0.006049	0.376762	<a href="#">Graph</a>
0	15	5.309277	0.005976	0.329211	<a href="#">Graph</a>
0	16	5.052722	0.011119	1.078926	<a href="#">Graph</a>
0	17	5.210939	0.006873	0.387589	<a href="#">Graph</a>
0	18	5.239659	0.005077	0.243906	<a href="#">Graph</a>
0	19	5.262302	0.005009	0.235435	<a href="#">Graph</a>
0	20	5.214253	0.006894	0.389475	<a href="#">Graph</a>
0	21	5.231663	0.00637	0.33036	<a href="#">Graph</a>
0	22	5.197053	0.006032	0.300131	<a href="#">Graph</a>
0	23	5.115171	0.004686	0.186985	<a href="#">Graph</a>
0	24	4.936233	0.009676	0.729625	<a href="#">Graph</a>
0	25	5.052491	0.00542	0.256391	<a href="#">Graph</a>
0	26	5.135841	0.005328	0.239788	<a href="#">Graph</a>
0	27	5.132529	0.004894	0.202595	<a href="#">Graph</a>
0	28	5.111706	0.006345	0.343268	<a href="#">Graph</a>
0	29	5.184593	0.005549	0.25524	<a href="#">Graph</a>
0	30	5.164296	0.005528	0.25527	<a href="#">Graph</a>
0	31	4.991867	0.005018	0.191886	<a href="#">Graph</a>
0	32	5.256282	0.039047	14.320377	<a href="#">Graph</a>
0	33	5.819286	0.005598	0.369035	<a href="#">Graph</a>

Abbildung C.2: Alle zu einem Sensorboard ermittelten Kalibrationsparameter.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Kopplungskonstante $\alpha_s$ der starken Wechselwirkung . . . . .	2
1.2	Überblick über den PANDA -Detektor . . . . .	5
1.3	Querschnitt durch den Micro-Vertex-Detektor . . . . .	8
2.1	Vierwertige Kristallstruktur . . . . .	10
2.2	Ausbildung neuer Energieniveaus bei dotierten Halbleitern . . . . .	11
2.3	Überblick über den p-n-Übergang . . . . .	12
2.4	Leckstrom durch den Sensor schematisch . . . . .	12
2.5	Schematischer Aufbau eines doppelseitigen Streifensensor . . . . .	14
2.6	Mikroskopische Aufnahmen der Siliziumstreifensensoren der Teststation	15
2.7	Energieverlust verschiedener Teilchen . . . . .	17
3.1	Schematischer Aufbau der Teststation . . . . .	19
3.2	Laborplatz der Teststation . . . . .	20
3.3	Sensorsboard mit Sensor und APV25 . . . . .	21
3.4	Interne Schaltung eines Kanals des APV25 . . . . .	22
3.5	Ausgehendes Signal des APV25 . . . . .	25
3.6	Schema der Datenausgabe des APV25 . . . . .	26
3.7	Überblick über die Datenextraktion . . . . .	29
3.8	Schritte der Pedestalkorrektur . . . . .	30
3.9	Veranschaulichung der Funktionsweise des ClusterFinders . . . . .	31
4.1	Leckstrommessungen bis zum Durchbruch des Stromes . . . . .	34
4.2	Bestimmung des mittleren Rauschens durch einen Gaußfit . . . . .	35
4.3	Leckstrom und Rauschen vs. Hochspannung . . . . .	36
4.4	Zeitverhalten des Leckstroms bei einer angelegten Hochspannung von 60 V . . . . .	37
4.5	Fit an die Kalibration . . . . .	39
4.6	Energieverlust, Multiplizität, Pedestals und Noise als Resultate einer Messung mit $^{90}\text{Sr}$ . . . . .	40
4.7	Verteilung der angesprochenen Kanäle einer Messung . . . . .	41
4.8	Schematische Darstellung der Archivierung und der Nutzung von Modul- eigenschaften . . . . .	43
A.1	Grafische Oberfläche mit APV25-Registern . . . . .	49
A.2	Grafische Oberfläche mit Framedecomposer . . . . .	50

A.3 Grafische Oberfläche mit Energieverlust und Multiplizität . . . . .	51
B.1 Scans über die APV25-Register (1) . . . . .	52
B.2 Scans über die APV25-Register (2) . . . . .	53
C.1 Webinterface: Moduleigenschaften . . . . .	55
C.2 Webinterface: Kalibrationsparameter . . . . .	56

# Tabellenverzeichnis

3.1	I <sup>2</sup> C-Register des APV25 und die Funktionen . . . . .	23
3.2	Das APV25-Mode-Regster . . . . .	24
4.1	Leistungsaufnahme des APV25 . . . . .	33
4.2	Registereinstellungen des APV25 . . . . .	33
4.3	Ergebnisse einiger Modultests . . . . .	42

# Literaturverzeichnis

- [Bai04] Robert John Bainbridge. *Influence of Highly Ionising Events on the CMS APV25 Readout Chip*. PhD thesis, Blackett Laboratory Imperial College London, 2004.
- [C. 08] C. Amsler et al. Cosmic rays. *Physics Letters*, B667(1), 2008.
- [Col08] Panda Collaboration. Technical design report for: Panda electromagnetic calorimeter. *www.gsi.de*, 2008.
- [Jon01] Lawrence Jones. APV15-S1 User Guide Version. *RAL Microelectronics Design Group*, Sep. 2001.
- [L. 99] M. J. French Q. Morrissey A. Neviani RAL UK M. Raymond G. Hall IC UK P. Moreira G. Cervelli CERN Switzerland L. L. Jones. The APV25 deep submicron readout chip for CMS detectors. *5th Workshop on Electronics for the LHC Experiments (LEB 99), Snowmass, Colorado*, Sep. 1999.
- [Leo87] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1987.
- [LUN09] LUNDS Universitet. WWW Table of Radioactive Isotopes. <http://ie.lbl.gov/toi/>, 01 2009.
- [Lut01] Gerhard Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [Nev99] Andrea Neviani. APV25-S0 - Calibration Circuit. Technical report, CERN Switzerland, July 1999.
- [PRSZ97] Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz, and Frank Zetsche. *Teilchen und Kerne*. Springer Verlag, 1997.
- [Wür19] Thomas Würschig. Utilization of Double-Sided Silicon Strip Detectors within the PANDA Micro-Vertex-Detector. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, **N30-140**, (2008)2215-2219.
- [Wü09] Thomas Würschig. PANDA Micro-Vertex-Detector (MVD). <http://panda-wiki.gsi.de/cgi-bin/view/Mvd/MvdPublic>, 01 2009.





# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Diplomarbeit so kräftig unterstützt haben.

Besonderer Dank geht an Prof. Dr. H. Freiesleben der es mir ermöglicht hat, die Arbeit noch an der TU-Dresden schreiben zu können.

Gleiches gilt auch für Prof. Dr. K.-Th. Brinkmann. Ihm danke ich noch für die Möglichkeit das Thema meiner Arbeit in der Forschungsgruppe, die ich im Vorfeld getan habe, im Rahmen meiner Diplomarbeit fortzusetzen.

Vielen Dank auch an H. G. Zaunick für die geduldige Beantwortung meiner Fragen und das Durchlesen meiner Arbeit und die Tipps zur Verbesserung dieser.

Meine Eltern möchte ich an dieser Stelle nicht unerwähnt lassen. Sie haben mich die Zeit meines Studiums finanziell und moralisch unterstützt und somit dieses Studium erst möglich gemacht.



Hiermit versichere ich, daß ich diese Arbeit selbständig und bis auf die angegebenen ohne zusätzliche Hilfsmittel verfaßt sowie alle Quellen und Zitate kenntlich gemacht habe.

Felix Krüger