

IEKP-KA/95-2

Silizium-Streifen-Detektoren
Entwicklung der Software
und
Messungen mit einer γ -Quelle

Stephan Meyer

30. Januar 1995

Diplomarbeit
Stephan Meyer
Institut für experimentelle Kernphysik IEKP
Universität Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Standardmodell und das DELPHI-Experiment	2
2.1	Das Standardmodell	2
2.2	Der LEP Beschleuniger	4
2.3	Das DELPHI-Experiment	5
2.4	Beschreibung von Detektorkomponenten	7
2.5	Auslesesystem und Trigger	8
3	Silizium und Streifendetektoren	9
3.1	Eigenschaften von Silizium	9
3.2	Der p-n-Übergang	11
3.3	Wechselwirkung von γ -Strahlung	13
3.4	Wechselwirkung von β -Strahlung	14
3.5	Streifendetektoren	16
3.6	Schaltungen zur Auslese	18
3.7	Der Auslesechip	19
3.8	Phasen der Datennahme und der Auslese	21
3.9	Detektormodule	24
3.10	Der Vertexdetektor von DELPHI	24
4	Der Meßplatz	28
4.1	Auslese-Elektronik	28
4.2	Die VME-Treiberkarte	29
4.3	Der VME-AD-Wandler	30
4.4	Die verwendeten radioaktiven Präparate	31
5	Die Signalverarbeitung	35
5.1	Rohdaten und Pedestalsubtraktion	36
5.2	Der Common Mode	37
5.3	Statistische Daten	39
5.4	Die Pulshöhe und erste Treffersuche	40
5.5	Datenreduktion online	42

5.6	Clusterdefinition	43
6	Die entwickelten Meßprogramme	45
6.1	VME Initialisierung	46
6.2	Hardware-Test	49
6.3	Die Programme zur Detektoruntersuchung	50
6.4	VI TestPulse2.vi	53
6.5	Das Dekomprimierprogramm EXTRACT	54
7	Ergebnisse und Ausblick	56
7.1	Test der Detektoren auf ihre Verwendbarkeit	56
7.2	Silizium als Kalorimeter	59
7.3	Energieeichung von Detektoren	64
7.4	Absorptionswahrscheinlichkeit von Photonen	66
7.5	Verteilung der Cluster auf die Streifen	68
7.6	Variation der Backplanespannung	68
7.7	Zusammenfassung	71
A	Kurzanleitungen zu Treiberkarte und VFLAM	78
A.1	Die VME Treiberkarte	79
A.1.1	Beschreibung der Elektronik	79
A.1.2	Die Frontplatte	80
A.1.3	Erläuterungen der einzelnen Register	81
A.1.4	Signale für Detektor- und Multiplexerchip	84
A.1.5	Startadresse	86
A.1.6	LEMO-Buchsen und Jumperkonfiguration	87
A.2	Das VFLAM	89
A.2.1	Beschreibung der Elektronik	89
A.2.2	Die Frontplatte	90
A.2.3	Die Register des VFLAM	90
A.2.4	SirMEM	92
A.2.5	Jumperkonfiguration	93

Kapitel 1

Einleitung

Halbleiter werden seit Anfang der 60er Jahre als Teilchendetektoren verwendet. In den ersten Jahren fanden sie vor allem als Kalorimeter Verwendung, durch die große Anzahl an erzeugten Ladungen. Durch die ständige Verbesserung der Reinheit und Verarbeitungstechnik von Silizium, kann man heute Si-Detektoren herstellen, die Ortsauflösungen von wenigen Mikrometern haben. Damit finden sie zunehmend Verwendung als Vertexdetektoren in Hochenergiephysik-Experimenten, da sie einen Nachweis von kurzlebigen Teilchen ermöglichen.

In Karlsruhe ist eine neue Arbeitsgruppe entstanden, die sich im Rahmen des DELPHI¹-Experiments mit dem Vertexdetektor beschäftigt. Ziel ist es, ein Labor aufzubauen, in dem Silizium-Wafer getestet und Module für den 96er Vertex-Detektor gebaut werden. Bevor die Module eingebaut werden, wird von jedem Streifen die Verstärkung bestimmt.

In dieser Arbeit widme ich mich dem Test der Detektoren mit einer γ -Quelle. Zu der Arbeit gehören:

- Die Entwicklung der notwendigen Software zur Auslese des Detektors.
- Schnelle Routinen für den γ -Test, um den Test in realistischer Zeit durchführen zu können und die Strahlungsdosis niedrig zu halten.
- Durchführung von Untersuchungen an Detektoren.

Die Software sollte dabei so allgemein wie möglich gehalten werden, um den Test von verschiedenen Arten von Detektoren zu ermöglichen.

¹DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification

Kapitel 2

Das Standardmodell und das DELPHI–Experiment

2.1 Das Standardmodell

Die Elementarteilchenphysik beschäftigt sich mit dem Aufbau der Materie in den kleinsten Dimensionen. Die bekannten Teilchen sind in zwei Gruppen aufgeteilt. Die Teilchen der ersten Gruppe, die Fermionen, haben einen halbzahligen Spin und sind die Grundbausteine der Materie. Die zweite Gruppe wird von den Bosonen gebildet, die ganzzahligen Spin tragen. Die Bosonen gelten als Träger der Kräfte. Die Wechselwirkungen werden durch Eichtheorien beschrieben, und die Teilnehmer einer Wechselwirkung lassen sich in Gruppen anordnen. Die Eigenschaften der Gruppe bestimmen die Art der Wechselwirkung. So ergibt sich aus dem Rang der Gruppe die Anzahl der Eichbosonen. Die Kraft zwischen den Teilnehmern wird durch den Austausch eines dieser Eichbosonen ausgeübt.

Ausgangspunkt der Entwicklung der Eichtheorien ist die Quantenelektrodynamik (QED), die die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt. Sie ist die beste Theorie, welche die Physiker heute haben. Die mit ihr entwickelten Konzepte der Renormierung und der lokalen Eichinvarianz sind in Experimenten mit hoher Präzision bestätigt worden. Auch die Anwendung der Störungsrechnung zur Beschreibung von Reaktionen höherer Ordnung, durch eine Entwicklung nach der Kopplungskonstanten, wird erfolgreich angewandt. Anschaulich wird dieses Verfahren durch die Einführung der Feynmangraphen, in denen die Ordnung durch die Anzahl der Vertices gegeben ist.

Wechselwirkung	Boson	Reichweite (m)
elektromagnetische WW	γ	∞
schwache WW	$W^- \quad Z^0 \quad W^+$	$\cdot 10^{-18}$
starke WW	Gluonen (g)	$\cdot 10^{-15}$

Tabelle 2.1: Wechselwirkungen und ihre Eichbosonen

	Ladung	Isospin
(Leptonen)		
$e \quad \mu \quad \tau$	-1	$+\frac{1}{2}$
$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$	0	$-\frac{1}{2}$
(Quarks)		
$u \quad c \quad t$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$
$d \quad s \quad b$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$

Tabelle 2.2: Fermionenfamilien der Materie

Die fundamentale Gruppe der QED ist die $U(1)$ und ihre Ladung ist die elektrische Ladung e . Mit dieser Ladung koppeln alle geladenen Teilchen an das Austauschboson, das Photon. Da dieses masselos ist, ergibt sich eine unendliche Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die Photonen koppeln nicht untereinander, sondern sind nur Vermittler der Kraft, da sie elektrisch neutral sind.

Aus der Beschreibung des β -Zerfalls in der Form einer 4-Fermion-Punktkopplung entstand die Theorie der schwachen Wechselwirkung. In diesem ersten Modell wurden die schwachen Ströme eingeführt. Bei der weiteren Entwicklung kam der Austausch von geladenen Bosonen hinzu. Um die kurze Reichweite der Wechselwirkung zu erklären, wurde ihnen eine Masse zugeteilt. Um die Ladungsänderung der beteiligten Reaktionspartner zu erklären, müssen die Eichbosonen geladen sein. Befriedigend wurde die Theorie erst, durch die Forderung eines weiteren neutralen Eichboson, welches die vorhandenen Divergenzen bei einigen Wirkungsquerschnitten beseitigte. Die Ladung ist der Isospin und die fundamentale Gruppe die $SU(2)$. Die linkshändigen Teilchen bilden $SU(2)$ -Doubletts mit $I = \frac{1}{2}$, die rechtshändigen Teilchen $SU(1)$ -Singletts mit $I = 0$. Eine weitere Besonderheit der schwachen Wechselwirkung ist die Paritätsverletzung. Nur die linkshändigen Teilchen sind am geladenen Strom beteiligt, während der ein Z_0 zwischen allen Teilchen ausgetauscht werden kann. In der Beschreibung äußert sich die Paritätsverletzung durch eine V-A-Struktur, einer Mischung aus vektoriellen- und axialvektoriellen Strömen.

Die Quantenchromodynamik ist das Analogon der QED für die starke Wechselwirkung. Beschreibende Gruppe ist die $SU(3)_{color}$, die 8 Eichbosonen und 3 Ladungszustände erfordert. Teilnehmer sind die Quarks, die in 3 Farben auftreten. Vermittler der Wechselwirkung sind die Gluonen, die selbst auch Farbladung tragen. Die Tatsache, daß die Gluonen sowohl Träger, als auch Teilnehmer der starken Wechselwirkung sind, erklärt die Phänomene des Confinements und der Variation der Kopplungskonstanten mit dem Impulsübertrag. Bei kleinen Impulsüberträgen geht α_s gegen 1, so daß die Störungstheorie nicht mehr anwendbar ist. Die Farbladung äußert sich in dem Verhältnis des hadronischen zum müonischen Wirkungsquerschnitt des Z_0 -Zerfalles. Die größere Wahrscheinlichkeit für die Bildung eines Quark-Antiquark-Paares, kann durch hinzufügen eines Faktors, für die 3 Farbladungszustände, konsistent beschrieben

werden.

2.2 Der LEP Beschleuniger

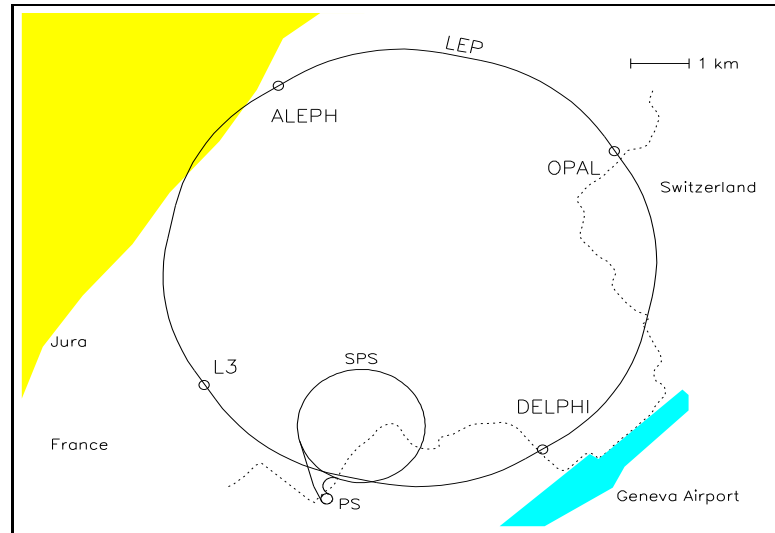


Abbildung 2.1: Die Lage des LEP-Speicherringes. Der LEP Speicherring erstreckt sich am Rande des Juras unter der Schweiz und Frankreich. Der Tunnel hat einen Umfang von 27km. An 4 der Wechselwirkungspunkte sind die Experimente ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL positioniert.

Um das Standardmodell zu überprüfen, wurde am CERN¹ der LEP² Beschleuniger gebaut. LEP ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 27 km. Er liegt in der Nähe des Juras unter dem Gebiet der Schweiz und Frankreich. In ihm werden die Elektronen und Positronen in einer Vakuumleitung gegensinnig auf Energien von 45,2GeV beschleunigt und dann gespeichert. Sie laufen in 4 (oder 4x4) Paketen (Bunches) um. Bei der Energie haben die e^+ und e^- fast Lichtgeschwindigkeit, so daß sie für einen Umlauf $\approx 89\mu s$ brauchen. Alle $22\mu s$ treffen sich die e^+ und e^- -Pakete an den Wechselwirkungspunkten. An 4 von diesen sind die Detektoren, ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL, positioniert.

Die Elektronen und Positronen werden in Paketen im Linearbeschleuniger LIL (Lep Injector Linac) erzeugt und auf 600MeV beschleunigt. Von hier kommen die Pakete in den „Electron Positron Accumulator“, EPA, um dann im Proton Synchrotron, PS, auf 3,5GeV beschleunigt zu werden. In den LEP-Speicherring werden die Pakete mit einer Energie von 22,2GeV eingespeist, die sie im Super Proton Synchrotron, SPS, erhalten haben. Im LEP werden sie auf die nominale Energie beschleunigt und mit dieser gespeichert. Dieser Aufbau wird in Abbildung 2.2 gezeigt.

¹Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

²Large-Electron-Positron (Collider)

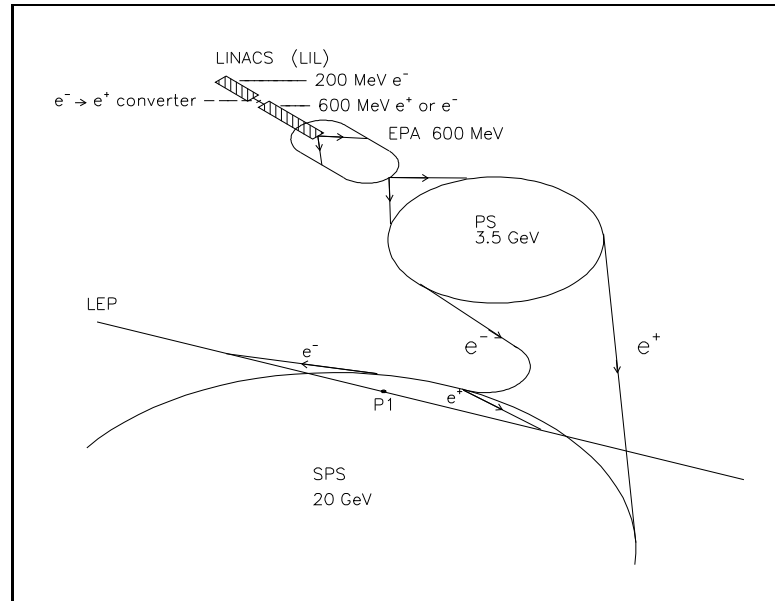


Abbildung 2.2: Die Vorbeschleuniger des LEP

Wenn die Pakete aufeinandertreffen, wechselwirken mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit e^+ und e^- . Mögliche Reaktionen sind die Streuung (Bhabha-Streuung), sowie deren Vernichtung unter Erzeugung eines Photons oder Z_0 -Eichbosons. Die Energie des Schwerpunktsystems ist so gewählt, daß das Z_0 -Boson möglichst häufig gebildet wird. Dieses zerfällt innerhalb von 10^{-18} s in verschiedene Elementarteilchen. Ziel des Detektors muß es sein, alle Teilchen zu identifizieren, um so den Zerfall genau rekonstruieren zu können. Durch das Laborsystem, welches bei einem Speicherring gleich dem Schwerpunktsystem ist, wird keine Raumrichtung bevorzugt. Der Detektor muß daher den ganzen Raumwinkel von 4π abdecken.

2.3 Das DELPHI-Experiment

DELPHI ist einer der Detektoren am LEP. Abbildung 2.3 zeigt seinen Aufbau. Man sieht in der Mitte den zylinderförmigen Zentraldetektor (Barrel). An beiden Seiten wird (fast) der restliche Raumwinkel durch die beiden Endkappen abgedeckt, wobei hier nicht alle Detektorenarten des Barrels vertreten sind. Schwachstellen sind der Übergang zwischen dem Barrel und den Endkappen, sowie der Bereich um das Strahlrohr.

Die Geometrie des Detektors begünstigt die Verwendung von Zylinderkoordinaten. Die z -Achse ist die Mitte des Strahlrohres, R und Φ beschreiben die Ebene senkrecht zu der z -Achse.

Die supraleitende Spule erzeugt ein Solenoid-Feld, von 1,23 T. Die Pakete im Strahlrohr verlaufen parallel zu den Feldlinien und werden somit nicht vom Feld abgelenkt. So wird ein Untergrund an Synchrotron-Strahlung im Detektor vermieden.

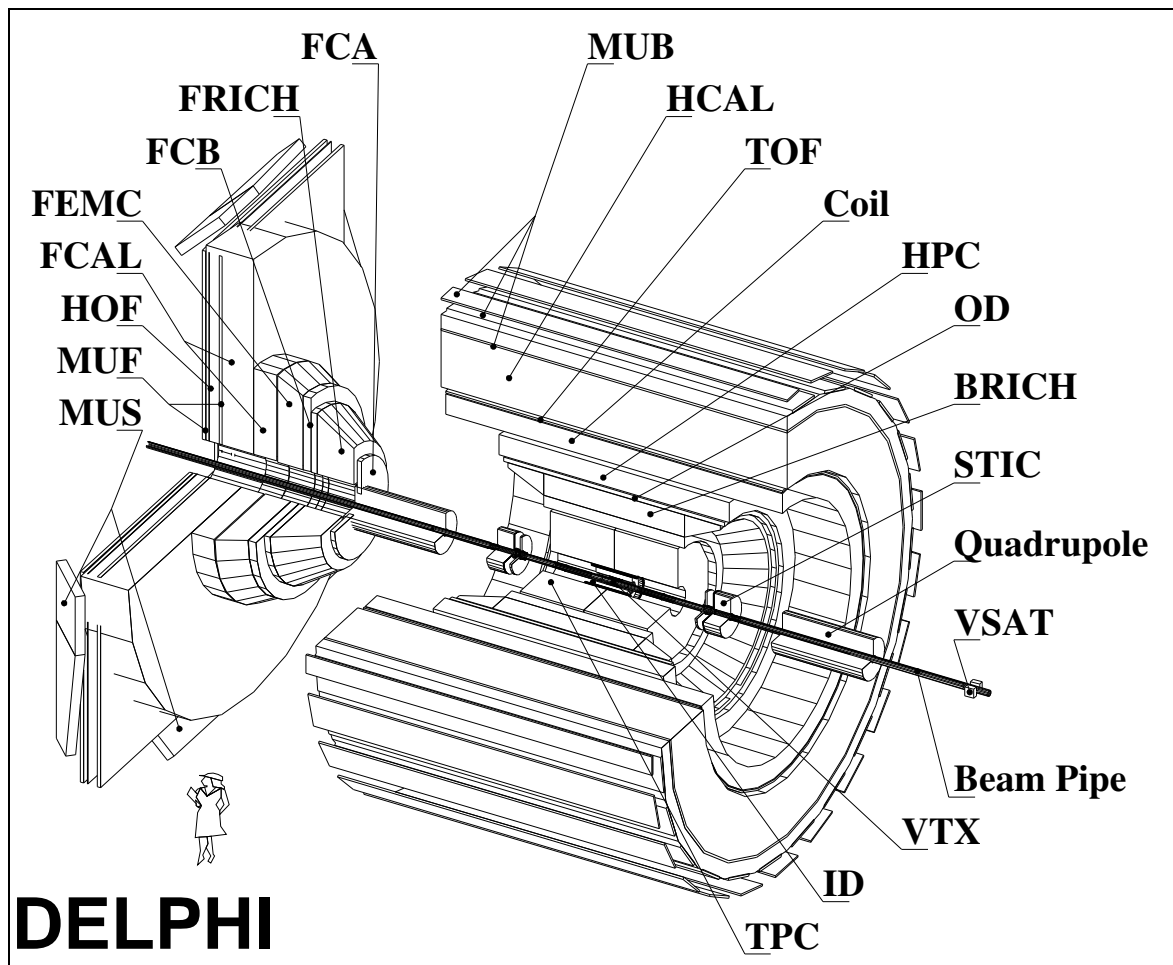


Abbildung 2.3: Ansicht des neuen DELPHI-Detektors. VTX: micro VerTeX detector; ID: Inner Detector; B-RICH: Barrel Ring Imaging CHerenkov counter; TPC: Time Projection Chamber; OD: Outer Detector; TOF: Time Of Flight detector; HCAL: Hadron CALorimeter; HPC: High density Projection Chamber; MUB: Barrel MUon chambers; FCA: Forward Chamber A; FRICH: Forward RICH; FCB: Forward Chamber B; FEMC: Forward ElectroMagnetic Calorimeter; FCAL: Forward hadron CALorimeter; HOF: Forward HODoscope; MUF: Forward MUon chambers; S-MU: Surround MUon chambers; STIC: Small angle TIlle Calorimeter; VSAT: Very Small Angle Tagger; The coil is a super conducting Coil and the lead of the HCAL is used as return yoke for the coil.

Geladene Zerfallsprodukte erfahren, in der Ebene senkrecht zum Strahlrohr, eine Ablenkung, aus welcher der Impuls bestimmt wird. Diese Feldform eignet sich vor allem für Zerfälle die Teilchen bevorzugt senkrecht zur Strahlachse emittieren. Andernfalls kann auch ein Torroidfeld benutzt werden. Dieses hat den Nachteil, daß das Joch in der Nähe des Strahlrohres ist. Durch das Material in der Nähe des Vertex kommt es häufiger zu Vielfachstreuung. Das Joch für den Solenoid-Magneten des DELPHI-Detektors

bildet das Eisen des Hadron-Kalorimeters (HCAL). Korrekturmagnete reduzieren Inhomogenitäten des Feldes auf weniger als 0,1 %

2.4 Beschreibung von Detektorkomponenten

Der Aufbau des DELPHI-Experimentes ist durch die zylinderförmige Spule geprägt. Die einzelnen Komponenten sind zum einen radial um das Strahlrohr herum, innerhalb und außerhalb des Magneten angeordnet. Abgeschlossen wird der Zylinder (Barrel) durch die beiden Endkappen. Ich beschreibe im Folgenden die einzelnen Komponenten des Detektors, die sich im Barrel befinden. In den Endkappen wiederholt sich diese Anordnung, bis auf einige Ausnahmen.

Ganz innen befindet sich der Vertex Detektor (VTX). Er besteht aus 3 Lagen von Silizium-Streifen-Detektoren, die bei einem Radius von 7, 9 und 11 cm sind. Es schließt sich der Inner Detector (ID) an. Dieser liefert mit den 5 Lagen von Vieldrahtproportionalkammern (MWPC) eine schnelle Triggerinformation. Zusätzlich befindet sich innen ein Ring mit Driftkammer. Der zentrale Spurdetektor ist die Zeitprojektionskammer (TPC). Alle Spurrekonstruktionen starten mit ihrer Information. Die TPC erstreckt sich vom Radius $R = 23\text{cm}$ bis zu $R = 120\text{cm}$ und ist 3m lang. Die Auslese erfolgt an den Endkappen, die in je 6 Sektoren unterteilt sind. In jedem Sektor sind 16 äquidistante Lagen mit je 192 Auslesedrähten. Die Signalhöhe ist proportional zum Ionisationsvermögen des Teilchens.

Der nächste Detektor ist der Ring-Imaging-Cherenkov-Counter (RICH). Er rekonstruiert den Winkel, unter dem das Cherenkov-Licht ausgestrahlt wird. Damit ist eine Teilchenidentifikation in einem großen Impulsintervall möglich. Der äußerste Spurdetektor ist der Outer-Detector (OD) mit einem Radius von $R = 200\text{cm}$. Er liefert eine schnelle Triggerinformation in $R\phi$ und z und erhöht die Impulsauflösung. Innerhalb des Solenoidmagneten befindet sich noch das elektromagnetische Kalorimeter (HPC). Es basiert auf dem Prinzip der Zeitprojektion, so daß die elektromagnetischen Schauer in 3 Dimensionen rekonstruiert werden. Die Dicke beträgt 18 Strahlungslängen, so daß viele Teilchen gestoppt werden und nur Hadronen und Müonen weiter nach außen kommen.

Auf die Spule ist eine Lage von 172 Szintillatoren montiert, der Flugzeit-Detektor (TOF). Er gibt die Zeitinformation des Events und ermöglicht eine Rückweisung von Spuren durch Teilchen aus der kosmischen Strahlung.

Es folgt das hadronische Kalorimeter (HCAL), das aus 20 Lagen Eisen besteht, zwischen denen Streamerkammern die Spuren nachweisen. Die Auslese erfolgt in Pads, die so geformt sind, daß sie Quader bilden, die in Richtung des Wechselwirkungspunktes zeigen. Das Eisen des Kalorimeters dient zusätzlich als Joch für den Magneten.

Den Abschluß bilden die Müonenkammern. Es sind Proportional-Driftkammern, die in 2 Lagen angeordnet sind. Die erste Lage befindet sich noch innerhalb des Jochs nach 90cm Eisen, die zweite ist nach weiteren 20cm Eisen auf das Joch montiert.

Für die Bestimmung der Luminosität sind noch der Small Angle Tagger (SAT) und

der Very Small Angle Tagger (VSAT) von Bedeutung. Beides sind Kalorimeter mit guter Ortsauflösung. Der SAT deckt den Polarwinkel in einem Bereich von $2,5^\circ$ bis $7,5^\circ$ ab, der VSAT von $0,29^\circ$ bis $0,4^\circ$. Sie registrieren Bhabha-Ereignisse³

2.5 Auslesesystem und Trigger

Jede Detektorkomponente hat ihre eigene Auslese-Elektronik und einen Front-End-Puffer. In Diesen schreibt der Detektor seine Daten für jeden BCO⁴. Die Information aller Komponenten für ein Event umfaßt etwa 40 – 100 kB. Um nicht Events, bei denen keine Wechselwirkung stattgefunden hat, auch sichern zu müssen, existiert ein Triggersystem. Dieses hat 4 Ebenen, von denen die beiden ersten reine Hardware-Trigger sind. Die Information ausgesuchter Detektoren wird hier logisch verknüpft, um eine Triggerentscheidung zu bekommen. Die Entscheidung der 1. Ebene fällt $3\mu\text{s}$ nach einem BCO, die der 2. nach $39\mu\text{s}$.

Fällt der 1. Trigger negativ aus, so steht der Detektor für den nächsten BCO wieder zur Verfügung. Anderenfalls wird die Entscheidung für die zweite Triggerebene gefällt. Bei einer negativen Entscheidung ist ein BCO verlorengegangen, bis der Detektor wieder einsatzbereit ist. Bei einem positiven 2. Trigger werden die Front-End-Puffer aller Detektorkomponenten geleert und die Daten werden im Crate-Event-Puffer gespeichert. Hierfür ist der Detektor für $3,5\text{ms}$ nicht sensitiv.

Die weitere Analyse geschieht asynchron zum BCO, per Software. Die Daten werden auf ihre Verträglichkeit, mit physikalisch interessanten Ereignissen, getestet. Unter Anderem wird dazu die Topologie der Signale überprüft. Wenn ein Event alle 4 Triggerebenen passiert hat, werden die Daten auf ein Data-Summary-Tape (DST) geschrieben. Bei der jetzigen Schwerpunktsenergie, von $\approx 91\text{ GeV}$, verbleibt eine Rate von etwa 3Hz.

³Bhabha-Streuung: $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

⁴BCO: Bunch Cross Over. Zeitpunkt, zu dem sich die e^+ - und e^- -Pakete am Wechselwirkungspunkt treffen.

Kapitel 3

Silizium und Streifendetektoren

3.1 Eigenschaften von Silizium

Silizium ist ein Element der IV Hauptgruppe und kristallisiert im Diamantgitter. So werden die 4 Valenzelektronen in kovalenten Bindungen abgesättigt. Der Abstand des Valenz- (VB) und des Leitungsbandes (LB) (E_G) beträgt bei Silizium ungefähr 1,1 eV. Die Besetzung der Niveaus geschieht nach der Fermiverteilung. Bei $T = 0\text{K}$ ist es ein Isolator. Bei Zimmertemperatur beträgt $kT \approx 0,026\text{eV}$. Es gelangen keine Ladungsträger vom Valenz- in das Leitungsband weshalb reines Silizium nicht leitet. Ein realer Kristall hat Verunreinigungen und Kristallfehler, die Niveaus in der verbotenen Zone bilden. So gelangen bei Raumtemperatur Elektronen in das Leitungsband, oder es entstehen Löcher im Valenzband (Defektelektronen). Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$n = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{kT}\right) \quad (3.1)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Hierbei sind n, p die Elektronen- bzw. Löcherdichte im Leitungsband (VB), $N_{L,V}$ die Zustandsdichten von Leitungs- und Valenzband, $E_{L,F,V}$ die Energien der unteren Leitungsbandkante, des Ferminiveaus und der oberen Valenzbandkante. k ist die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur.

Das thermische Gleichgewicht zwischen Generation und Rekombination ergibt folgenden Zusammenhang:

$$np = n_i^2 = N_V N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_V}{kT}\right) \quad (3.3)$$

n_i ist die Eigenleitungskonzentration.

Gilt $n = p = n_i$, so ist der Kristall eigenleitend. Das Ferminiveau liegt dann in der Mitte der verbotenen Zone.

Verunreinigt man den Einkristall durch die Ersetzung von Siliziumatome auf den Gitterplätzen durch Fremdatome, so wird die Leitfähigkeit erhöht. Nimmt man Elemente der III Hauptgruppe, so fehlt ein Elektron zur Bindung mit den nächsten Nachbarn. Schon bei Zimmertemperatur kann ein Elektron aus dem VB in die Akzeptorstelle angehoben werden. Es verbleibt eine Fehlstelle (Loch), die im VB wandert (p-Leiter). Ein Element aus der V Hauptgruppe hat ein Valenzelektron zu viel, daß bei Zimmertemperatur in das Leitungsband wechselt. Man spricht hier von einem n-Leiter. Die Beweglichkeit ist für Löcher und Elektronen verschieden (In Silizium gilt $\mu_e = 3 * \mu_h$). Das Fermi-niveau verschiebt sich in Richtung des Donator-, beziehungsweise des Akzeptorniveaus. Aus den Gleichungen 3.1 und 3.2 ergibt sich die Anzahl der Majoritätsladungsträger. Gleichung 3.3 bleibt weiterhin gültig, da die erhöhte Konzentration der einen Sorte dazu führt, daß sich die Konzentration der anderen Sorte durch Rekombination verringert.

Bei Raumtemperatur ist die Konzentration an Ladungsträger in reinem Silizium $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Bei einem Wafer von typischerweise 15 cm^2 Oberfläche und einer Dicke von $300 \mu\text{m}$ hat man somit $6,6 \cdot 10^9$ freie Ladungsträger. Durch Dotieren wird diese Zahl um 2 bis 5 Größenordnungen höher, da Ladungen aus ionisierten Störstellen hinzukommen. Die Erzeugung von $\approx 20 \cdot 10^3$ weiteren Elektron-Loch-Paare, durch Teilchendurchgänge sind nicht zu beobachten. Die freien Ladungen müssen entfernt werden. Eine Möglichkeit hierzu ist der p-n-Übergang, bei dem ein n-dotierter Bereich an einen p-dotierten Bereich grenzt.

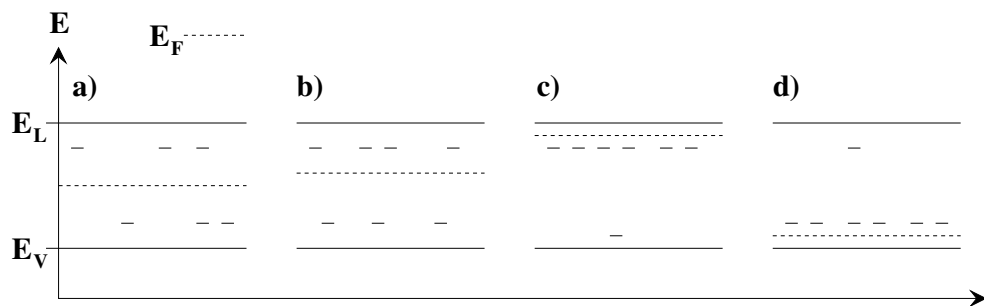


Abbildung 3.1: Bandstruktur für verschiedene Dopingkonzentrationen

- a) *Eigenleitendes Silizium: Das Fermi-niveau liegt in der Mitte der verbotenen Zone.*
- b) *schwach n-dotiert: Das Fermi-niveau ist leicht in Richtung des Leitungsbandes verschoben.*
- c) *stark n-dotiert: Das Fermi-niveau befindet sich dicht an der Kante des Leitungsbandes.*
- d) *stark p-dotiert: Das Fermi-niveau befindet sich dicht an der Valenzbandkante. Alle Akzeptorniveaus sind bei Raumtemperatur besetzt.*

3.2 Der p–n–Übergang

Das einfachste Model eines p–n–Überganges ist der Kastenansatz: Ein p– und ein n–dotierter Bereich werden in Kontakt gebracht, so daß sich die Konzentration freier Ladungsträger sprunghaft ändert. Durch den Kontakt bildet sich ein einheitliches Fermi-niveau in beiden Bereichen aus, indem sich die (chemischen) Potentiale der beiden Leitertypen verschieben. Im Kontaktbereich diffundieren Elektronen in die p–dotierte Zone und Löcher andersherum. Sie rekombinieren miteinander und es verbleiben die ionisierten Störstellen. Diese bilden die sogenannte Raumladungszone, die frei von Ladungsträgern ist. Dieses ist in Abbildung 3.2 c) zu sehen. Das Feld der Raumladung wirkt der Drift entgegen. Die Neutralität des ganzen Kristalls erfordert :

$$N_A w_p = N_D w_n \quad (3.4)$$

Hierbei sind N_A und N_D die Konzentrationen der (ionisierten) Akzeptoren und Donatoren, w_p und w_n die Dicke der Raumladungszone in dem p-dotierten bzw. n-dotierten Bereich. Die Poissongleichung lautet für das Kastenmodell im p–Bereich:

$$\frac{d^2 V_{p,n}}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{q N_{A,D}}{\epsilon} \quad (3.5)$$

Um das elektrische Potential zu erhalten, muß 3.5 zweimal integriert werden, mit den Randbedingungen $E(x = -w_p) = 0$ und $V(x = -w_p) = 0$:

$$E(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{q N_A}{\epsilon} (w_p - x) \quad (3.6)$$

$$V(x) = \frac{q N_A}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - w_p x + \frac{w_p^2}{2} \right) \quad (3.7)$$

Die Höhe der Potentialbarriere des p–Bereiches ist somit $V(0) = V_p$:

$$V_p = \frac{q N_A w_p^2}{2\epsilon} \quad (3.8)$$

Entsprechendes gilt im n–Bereich. Ohne äußeres Feld gilt $V_p + V_n = V_d$. Das Diffusionspotential V_d beträgt bei Raumtemperatur und normalen Dopingkonzentrationen einige 100 mV.

An den p–n–Übergang kann man eine Spannung in Richtung der Diffusionsspannung, die sogenannte Backplane–Spannung (V_{BP}), anlegen. Gleichung 3.8 bleibt gültig, wenn man V_d durch $V_B = V_d + V_{BP}$ ersetzt. Um deren Breite zu berechnen, löst man 3.8 nach w_p auf. Es ergeben sich die folgenden Formeln für die Breiten:

$$w_p = \sqrt{\frac{2\epsilon V_B}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right)}} \quad (3.9)$$

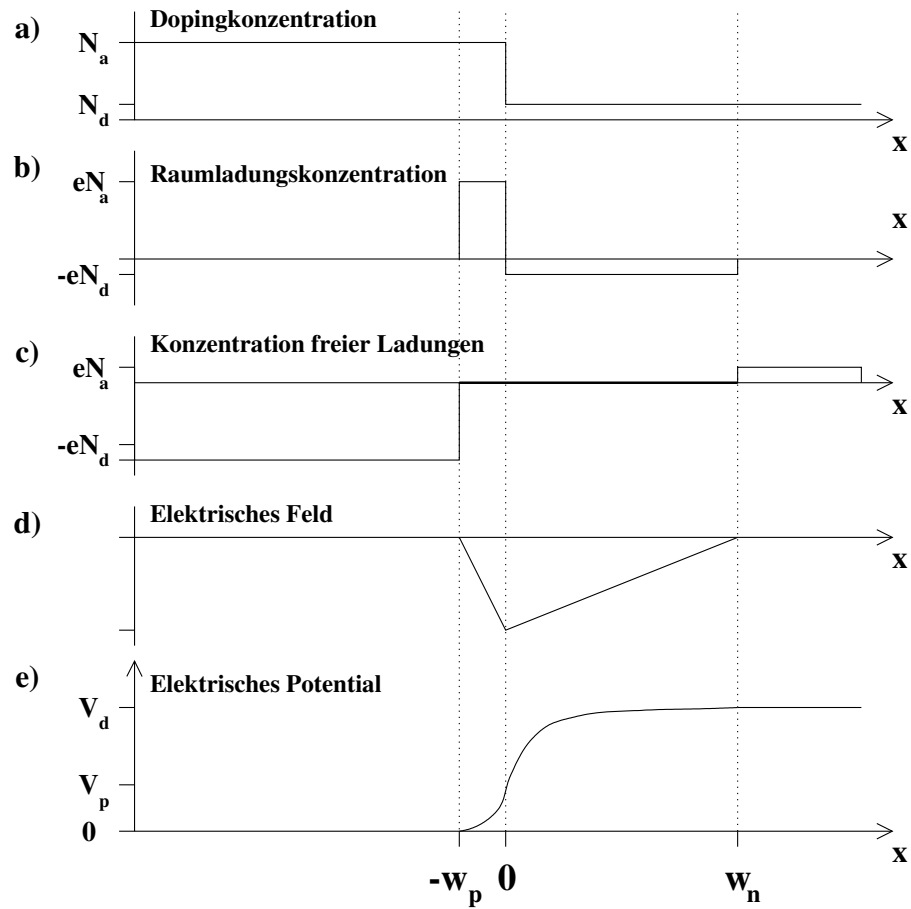


Abbildung 3.2: Physikalische Größen des p-n-Überganges Gezeigt ist ein asymmetrischer p-n-Übergang: die Dopingkonzentrationen der Akzeptoren ist höher als die, der Donatoren (a). Die Neutralität ergibt eine unterschiedliche Ausdehnung der Raumladungszone (b), innerhalb derer keine freien Ladungen mehr existieren (c). Aus der Poissongleichung ergeben sich elektrisches Feld (d) und elektrisches Potential (e). [13]

$$w_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_B}{qN_D \left(1 + \frac{N_p}{N_A}\right)}} \quad (3.10)$$

Die Raumladungszone ist nie ganz frei von Ladungsträgern, da durch thermische Anregung ständig neue Elektron-Loch-Paare gebildet werden. Durch das elektrische Feld driften die Ladungsträger zu den Elektroden. Die Wahrscheinlichkeit zur Rekombination ist sehr klein, so daß der Generationsstrom entsteht. Für die Stromdichte gilt [13]:

$$j_{gen} = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau_0} W \quad (3.11)$$

τ_0 ist die effektive Lebensdauer der Minoritätsladungen und W die Dicke der verarm-

ten Zone. Im Betrieb ist der Detektor vollständig verarmt, so daß nur τ_0 und, über n_i , die Temperatur einen Einfluß auf das Rauschen haben. Die Lebensdauer der Minoritäts-Ladungsträger hängt wesentlich von der Konzentration der Störstellen ab. Bei der Herstellung muß deshalb auf große Reinheit geachtet werden. Beim Betrieb ist eine konstante Temperatur notwendig, damit das Rauschen unverändert bleibt. Oberflächenströme, die an den Rändern auftreten, werden durch einen Guardring abgefangen, so daß sie keinen Einfluß auf den Betrieb des Detektors haben.

Wichtig für die Ausgangsspannung und das Rauschen ist auch die Kapazität des oÜberganges. Die Raumladungszone wird durch Flächen, senkrecht zu dem Übergang, begrenzt, welches einen Kondensator bildet. Dieser hat die Kapazität:

$$C = \frac{A\epsilon}{w_n + w_p} \quad (3.12)$$

3.3 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Silizium

Ungeladene Teilchen können von dem p-n-Übergang nicht direkt nachgewiesen werden. Es gibt 3 Effekte, über die Photonen geladene Teilchen erzeugen können. Diese Ladungen werden von dem Detektor registriert.

1. **Photoeffekt:** Das Photon löst aus der Schale eines Atoms ein Elektron. Die Elektronen entstammen hauptsächlich der K und L-Schale. Das herausgelöste Elektron hat die Energie des Photons, abzüglich der Bindungsenergie, mit der es an das Atom gebunden war.

$$E_k = h\nu - E_{Bind} \quad (3.13)$$

Das freie Niveau wird von Elektronen aus äußeren Schalen aufgefüllt unter Aussendung weiterer Photonen. Da die Energie der sekundären Photonen im Bereich der Ionisationsenergie der Materie liegt, ist deren Absorptionswahrscheinlichkeit groß und es wird die gesamte Energie des primären Photons registriert.

Das herausgelöste Elektron erzeugt, durch Ionisation, weitere Elektron-Loch-Paare. Wenn es gestoppt wird, ist die Anzahl an Elektron-Loch-Paaren:

$$N_e = N_h = \frac{E_k}{w} \pm \Delta N \quad (3.14)$$

wobei N_e die Zahl der erzeugten Elektronen und N_h die Zahl der Löcher ist. w ist die mittlere Energie, die benötigt wird, um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen. Sie beträgt für Silizium 3,6eV, wovon 1,1eV der Abstand der Bandkanten ist. Die restliche Energie geht in die Anregung von Phononen im Kristall. Für ΔN gilt:

$$\Delta N = \sqrt{FN} \quad (3.15)$$

wobei F der sogenannte Fano-Faktor ist. Sein Wert wurde für Silizium experimentell zu 0,1 bestimmt.

2. **Comptoneffekt:** Der Comptoneffekt ist ein Stoß des Photons und eines (freien) Elektrons, wobei das Elektron als ruhend angenommen wird. Durch den Stoß überträgt das Photon einen Teil seiner Energie auf das Elektron und wird um den Winkel von Θ seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt. Das Elektron kann wieder weitere Elektron–Loch–Paare erzeugen (s.o.). Das Photon überträgt immer nur einen Teil seiner Energie.

Für den Comptoneffekt gilt folgende Energierektion:

$$h\nu' = h\nu + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \Theta) \quad (3.16)$$

Das gestreute Elektron hat daher die kinetische Energie:

$$E_k = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \Theta)} \quad (3.17)$$

Die übertragene Energie hängt hier vom Winkel ab, um den das Photon gestreut wird. Die kinetische Energie des Elektrons ist maximal, wenn der Stoß zentral erfolgte und das Photon entgegengesetzt zurückläuft ($\cos(\Theta) = -1$). Setzt man die Energie der Photonen der ^{241}Am -Quelle ein, so erhält man $\approx 11\text{keV}$ als maximale kinetische Energie des Elektrons.

3. **Paarbildung:** Als letzte Möglichkeit kann das Photon im Festkörper in ein $e^+ - e^-$ -Paar zerfallen. Um die Energieerhaltung nicht zu verletzen, muß das Photon eine Energie haben, die größer ist, als die Ruhemasse von Elektron und Positron. Das Positron ist in Materie kurzlebig und anniliert, nachdem es gestoppt wurde, mit einem Elektron unter Aussendung zweier Photonen von je $h\nu = m_0c^2 = 511\text{keV}$. Da diese Photonen nur einen kleinen Wirkungsquerschnitt haben, verlassen sie den Detektor ohne Wechselwirkung. Es wird somit nicht die gesamte Energie deponiert.

Bei einer Energie von 60keV , welche mit der Energiedeposition von MIPs¹ in $280\mu\text{m}$ Si vergleichbar ist, tritt dieser Effekt nicht auf.

Der lineare Schwächungskoeffizient ist in Abbildung 3.3 wiedergegeben. Er beschreibt die Absorptionswahrscheinlichkeit pro zurückgelegtem Weg in der Materie, in Abhängigkeit von der Energie der Photonen.

3.4 Wechselwirkung von β -Strahlung in Silizium

Geladene Teilchen ionisieren Materie, bei ihrem Durchgang. Das Ionisationsvermögen von geladenen Teilchen wird durch die Bethe–Bloch–Formel beschrieben[11]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 N Z}{m_0 v^2} \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2 E}{2I^2(1 - \beta^2)} \right) \right] \quad (3.18)$$

¹MIP (Minimal Ionizing Particles): Teilchen, die die minimale Energie im Detektor deponieren

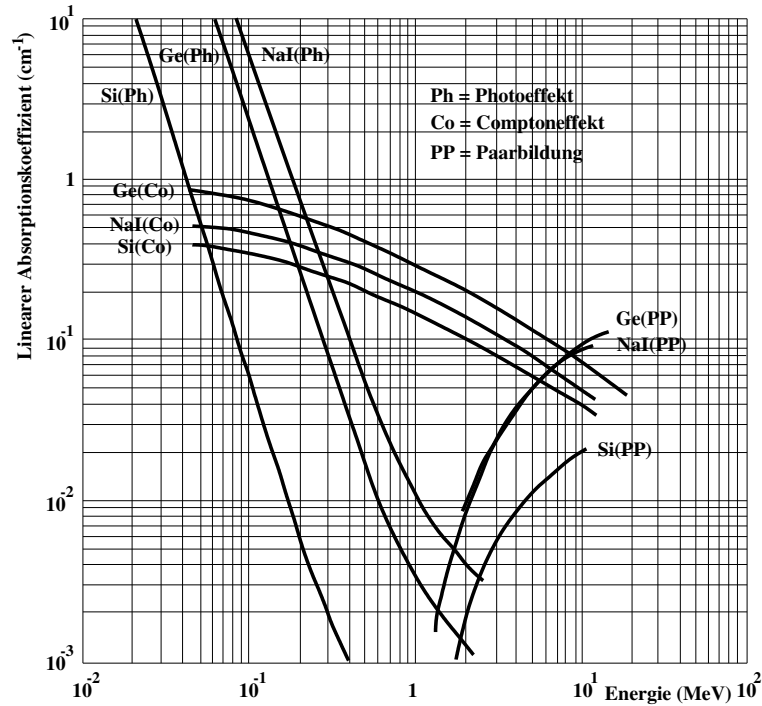


Abbildung 3.3: Linearer Schwächungskoeffizient in Silizium. Der lineare Schwächungskoeffizient ist, für die drei Reaktionen der Photonen in Silizium, Germanium und Natriumjodid, als Funktion der Energie des Photons aufgetragen [2].

Es ist N die Neutronen-, Z die Protonenzahl der durchstrahlten Materie und m_0 die Ruhemasse der Elektronen. I ist die mittlere Ionisationsenergie in der durchstrahlten Materie. z und v sind Ladung und Geschwindigkeit der einfallenden Teilchen, sowie E deren Energie. Die Gleichung 3.18 gilt für alle Arten von geladenen Teilchen.

Einfallende Elektronen haben, bis auf relativistische Korrekturen, die gleiche Masse, wie die Elektronen in der Materie. Bei Stößen wird ein Teil der Teilchen unter großen Winkeln gestreut, so daß die Bahnen nicht mehr geradlinig sind. Möller und Bethe haben Gleichung 3.18 für Elektronen angepaßt[2]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 N Z}{m_0 v} \left[\ln \frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1 - \beta^2)} + f(\beta) \right] \quad (3.19)$$

mit der Korrekturfunktion:

$$f(\beta) = \frac{1}{8} + \left(\frac{9}{8} + \ln 2\right)(1 - \beta^2) - \left(\frac{1}{4} + 2 \ln 2\right)\sqrt{1 - \beta^2} \quad (3.20)$$

Der Verlauf von Gleichung 3.19, für Silizium, ist in Abbildung 3.4 aufgetragen. Teilchen, die Energien haben, bei der das Ionisationsvermögen minimal ist, heißen englisch *minimal ionising particle*, kurz *MIP*. Bei Elektronen liegt das Minimum bei $\approx 1,5$ MeV. Aus der Kurve kann man die Energie ablesen, die von Elektronen im Detektor im

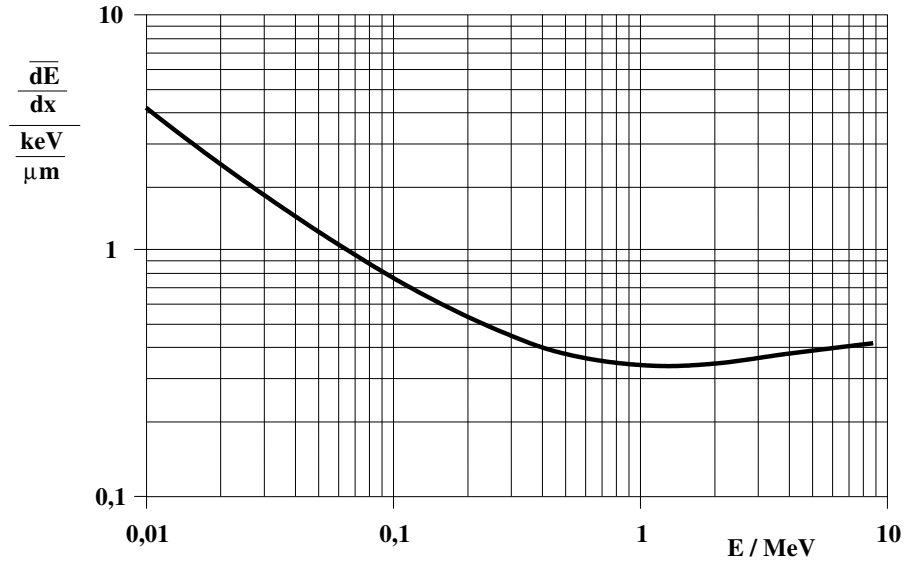


Abbildung 3.4: Ionisationsvermögen von Elektronen in Silizium Es ist das mittlere Bremsvermögen von Elektronen in Silizium aufgetragen. Das Bremsvermögen wird minimal, für Elektronen mit Energien von $\approx 1,5$ MeV. Zu höheren Energien wächst $\frac{dE}{dx}$ logarithmisch mit der Energie.

Mittel deponiert wird. Bei senkrechtem Einfall ist die Wegstrecke $280 \mu\text{m}$. Bei einer kinetischen Energien von $1,1$ MeV ist die Energieänderung zu vernachlässigen, so daß gilt:

$$\overline{E} = \frac{dE}{dx}(1,1\text{MeV}) \cdot 280 \mu\text{m} = 90 \text{ keV} \quad (3.21)$$

Die Anzahl der erzeugten Elektron–Loch–Paare ist somit $90 \cdot 10^3 / 3,6 = 25 \cdot 10^3$ und um einen Faktor $1,5$ höher, als bei den Photonen der Ameritiumquelle. Die wahrscheinlichste Energiedeposition ist, entsprechend einer Landauverteilung, mit ≈ 70 keV kleiner.

3.5 Streifendetektoren

Streifendetektoren werden aus hochresitivem n–Silizium hergestellt, auf dessen Oberseite stark p-dotierte Diodenstreifen aufgebracht werden. Die Rückseite ist bei den einseitigen Detektoren ganzflächig stark n-dotiert. Für den Diodenkontakt $p^{++}n$ gilt $N_A \gg N_D$. Die Formel für die Breite der Raumladungszone $W = w_p + w_n$ vereinfacht sich, unter Verwendung der Resistivität ρ zu:

$$W \approx w_n = \sqrt{2\epsilon\rho\mu V_B} \quad (3.22)$$

Um den Detektor voll zu verarmen, ist bei Verwendung eines hochresitiven Materials, nur eine kleine Verarmungsspannung notwendig ($20 - 100\text{V}$). Die Feldstärke ist somit groß genug, um die Ladung schnell genug zu den Elektroden abzuführen, bevor

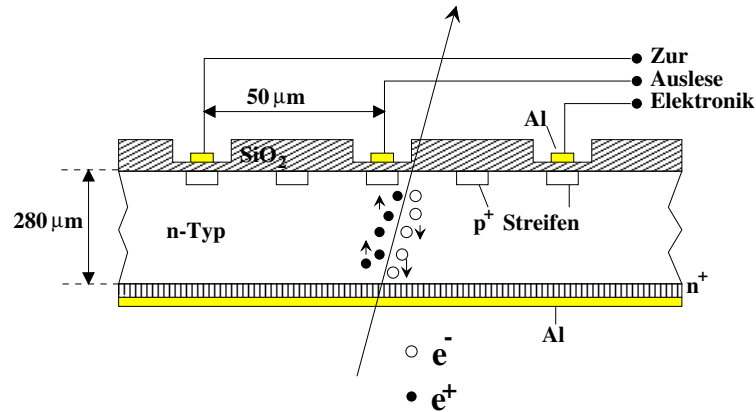


Abbildung 3.5: Schnitt durch einen einseitigen Detektor. Auf der Oberseite eines n-Typ Si-Wafers werden schmale p-Streifen aufgebracht, die den p-n-Übergang bilden. Durch einen dünnen Isolator getrennt, wird über jedem zweiten Streifen Aluminium aufgedampft. Wenn die Rückseite (Backplane) auf positives Potential gelegt wird, driften generierte Ladungen zu den Elektroden. Der Koppelkondensator wird von den Dioden- und Aluminiumstreifen gebildet, die durch SiO_2 voneinander isoliert sind.

sie rekombinieren. Es werden alle generierten Ladungen gesammelt und ausgekoppelt. Bei kleinen Feldstärken ist die Driftgeschwindigkeit relativ gering. Die Ladungswolke verbreitert sich durch Diffusion, und verteilt sich auf mehrere Streifen (ideal sind 2). Der Ladungsschwerpunkt kann so besser rekonstruiert werden und die Ortsauflösung verbessert sich.

Gleichung 3.12 vereinfacht sich mit den obigen Annahmen zu:

$$C = A \sqrt{\frac{\epsilon}{2\rho\mu V_B}} \quad (3.23)$$

Mit der Resistivität und der Beweglichkeit der Elektronen ergibt sich die Kapazität des Diodenstreifens aus seiner Fläche.

Die Auskopplung des Signals kann auf zwei Weisen erfolgen. Zum einen gleichspannungsmäßig (DC): Die Diode wird über einen großen Widerstand vorgespannt. In diesem Widerstand erzeugt der Strom, durch die Teilchenspuren erzeugt, einen Spannungsabfall. Die Spannung am Widerstand wird verstärkt und gemessen. Durch eine Variation der Sperrströme der einzelnen Streifen, ist der Nullpunkt der einzelnen Kanäle sehr unterschiedlich. Hierdurch wird der dynamische Bereich der Messung für die Offset-Variation benötigt und steht nicht mehr für das Signal zur Verfügung.

Bei unseren Detektoren wird daher der zweite Weg gewählt: Die Ladungen werden kapazitiv ausgekoppelt (AC). Dafür wird auf die Diodenstreifen noch ein Aluminiumstreifen, durch einen dünnen Isolator getrennt, aufgebracht. Die Aluminiumstreifen werden mit der Auslese-Elektronik verbunden und die Diodenstreifen sind daher ohne definiertes Potential. Deshalb werden sehr hochohmige Widerstände, die Biaswiderstände, benötigt. Diese legen die p-Streifen auf ein geeignetes Potential, so daß

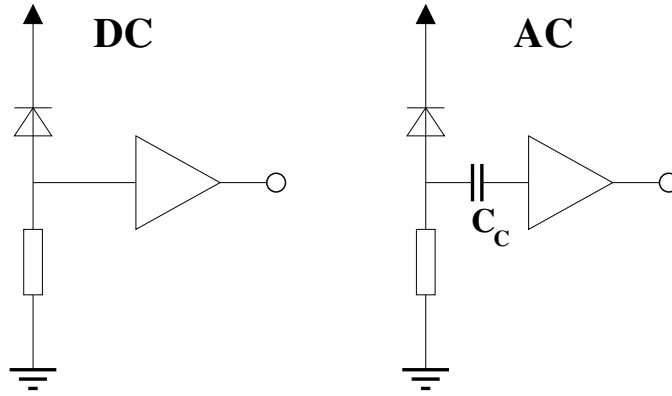


Abbildung 3.6: Auskopplung des Signals der Streifen. Bei der DC-Kopplung ist der Detektor nur die Diode. Im anderen Fall sind Diode Biaswiderstand und Kondensator auf dem Wafer integriert.

die Dioden mit einer Spannung an der Detektorrückseite in Sperrichtung vorgespannt werden können.

Bei einem einwandfreien Detektor sind die Biaswiderstände mit Masse verbunden. Gibt es jedoch Fehler in der Isolatorschicht, so ist der Streifen ohmisch (DC) gekoppelt; Man spricht dann von einem Pin Hole. Wenn ein Strom fließt, wird ein Teil der Ladung, durch die Kapazität zwischen 2 Streifen C_i , auf die Nachbarn verteilt. Um den Strom, und damit die Störung von benachbarten Streifen, zu begrenzen, wird das Potential der Diodenstreifen, dem des Aluminiumstreifens angepaßt. Durch den Potentialausgleich fließt kein Strom, und die benachbarten Streifen können benutzt werden. Bei mehreren Pin Holes muß dieses Verfahren nicht mehr funktionieren.

3.6 Schaltungen zur Auslese

Die örtlich dicht benachbarten Streifen bilden auch zum Nachbarn eine Kapazität, die eine Verteilung der Ladung auf mehrere Streifen bewirkt. Das elektrische Schaltbild hierzu ist in Abbildung 3.7 gezeigt.

Die Spannung am Ausgang V_o ist der Quotient aus gesammelter Ladung und effektiver Kapazität. Das Verhältnis von Signal zu Rauschen ist bei gegebener Rauschspannung V_n [15]:

$$\frac{V_{So}}{V_{no}} = \frac{1}{V_{Ni}} \frac{\Delta Q}{C_p \left[\frac{C_f}{C_c} + 1 \right] + C_f} \quad (3.24)$$

Hierbei sind C_d und C_i über:

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_i} \quad (3.25)$$

zu C_p zusammengefaßt. Bei C_i sind nur die nächsten Nachbarn berücksichtigt. Für ein großes Signal-zu-Rauschabstand müssen C_i und C_d klein gehalten werden. Die

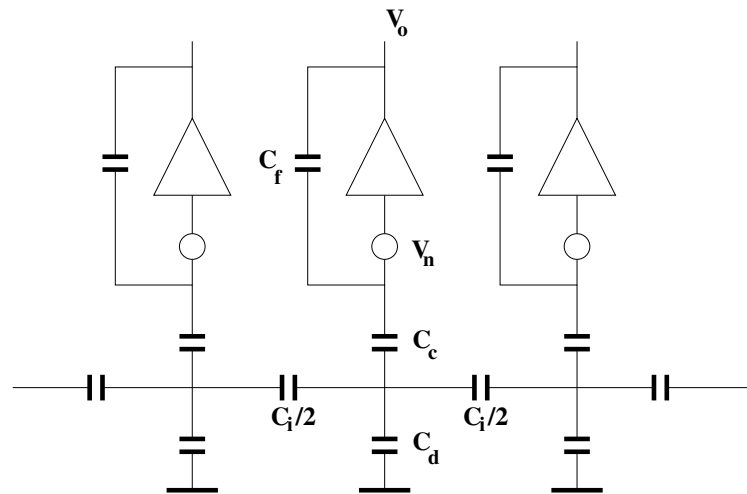


Abbildung 3.7: Schaltbild für die kapazitive Kopplung der Streifen. C_c ist die Koppel-, C_f die Rückkopplungskapazität. C_i ist die Kapazität zum nächsten Streifen und C_d die zur Detektor-Rückseite. V_n ist die Rauschspannung und V_o die Spannung am Ausgang. [10]

Messung des Verhältnisses von Signal-zu-Rauschen gehört zum Test für jeden Detektor und ist in 7.3 ab Seite 64 beschrieben.

3.7 Der Auslesechip

Alle Chips die von uns für die Auslese von Streifendetektoren verwendet werden, haben 128 Kanäle. Jeder Kanal besteht aus einem ladungsempfindlichen Vorverstärker, dessen Ausgangsspannung auf zwei Kondensatoren gespeichert werden kann. Diese werden über eine Schieberegister, Kanal für Kanal, mit den beiden Analog-Ausgängen verbunden. Jeder vierte Eingang ist über einen Kondensator C_{Cal} mit einem der 4 Kalibrier-Eingänge verbunden.

Die Chips, die in Karlsruhe verwendet werden, sind der MX-3 und der Triplex. Beides sind CMOS-Typen². Beim Triplex kommt zu den oben genannten Elementen noch eine Triggerlogik. Diese liefert am Ausgang ein Signal, wenn mindestens ein Kanal ein Signal hat, das eine gegebene Schwelle überschreitet. Außerdem ist der neuere Triplex-Chip deutlich rauschärmer, so daß auch kleinere Signale noch nachgewiesen werden können. Das Blockschaltbild für einen Kanal ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

Zusätzlich befindet sich ein 128-Bit Schieberegister auf dem Chip, mit dem alle Kanäle nacheinander mit den Analogausgängen verbunden werden. Der Triplexchip ist eine Erweiterung des MX-3 um eine Triggerlogik, die Treffer detektiert und gegebenenfalls ein Signal liefert. So muß der Chip nur ausgelesen werden, wenn mindestens ein Treffer vorliegt. Außerdem wurde der Vorverstärker sehr rauscharm aufgebaut. Das

²CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

Rauschen wird in ENC³[13], der äquivalenten Ladung zum Rauschsignal angegeben. Es beträgt beim MX-3 im Mittel 700 ENC, beim Triplex nur 300 ENC, für den Chip. Mit Detektoren, einer kapazitiven Last am Eingang, erhöhen sich die Werte auf 2000 ENC, respektive 700 ENC. Das Blockschaltbild des Verstärkers ist in Abbildung 3.8 wiedergegeben.

MX3 und Triplex

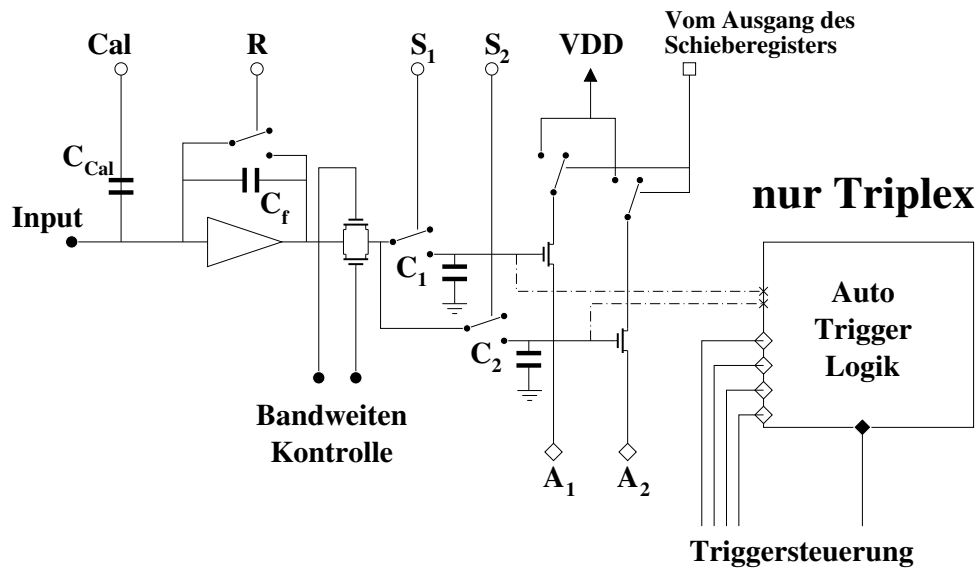


Abbildung 3.8: Schaltbild des MX-3 Chips (Auszug). Der einzige funktionelle Unterschied, zwischen dem MX-3 und dem Triplex ist, die Triggerlogik. Ein Treffer, in mindestens einem der Kanäle, erzeugt ein einen Impuls am Triggenerausgang. Es werden 2 Kondensatoren verwendet, um Auswirkungen von Störungen auf den Analogleitungen zu verringern.[15]

Der Triplexchip hat eine unterschiedliche Verstärkung der einzelnen Kanäle. Die Verstärkung der einzelnen Kanäle ist, in erster Näherung, eine lineare Funktion der Kanalnummer. Das Rauschen zeigt die gleiche Abhängigkeit, so daß der Signal-zu-Rauschabstand konstant bleibt. Durch eine Veränderungen im Timing kann dieser Effekt verringert werden. Das Optimum ist jedoch von Chip zu Chip verschieden. Im Experiment darf nur eine Einstellung verwendet werden, so daß nur einige Chips optimal eingestellt sind.

³ENC: Equivalent Noise Charge

3.8 Phasen der Datennahme und der Auslese

Die Auslesechips sind so ausgelegt, daß sie zu vorgegebenem Zeitpunkt sensitiv sind. Nur während eines BCOs kann es zu einem Ereignis kommen, so daß der Detektor nur alle $22\mu\text{s}$ aktiv sein muß. Diese Phase heißt die Datennahme. Die Steuerungssignale der Datennahme sind **Reset**, **S1**, **S2**, **Window** und **Test**. Solange Reset aktiv ist, wird der Eingangsverstärker kurzgeschlossen. Wenn als nächstes S1 und S2 aktiv werden, entladen sich die beiden Haltekondensatoren C1 und C2. Ab dem Zeitpunkt, zu dem Reset inaktiv ist, wird die Ladung der Streifen auf den Kondensatoren C1 und C2 gespeichert. Danach wird für die Samplingzeit der Schalter S2 geschlossen, so daß nur noch C1 mit dem Verstärker verbunden ist. Als letztes der Datennahme wird auch S1 geschlossen und danach der Verstärker wieder kurzgeschlossen. Die Kondensatoren halten jetzt ihre Spannung, bis eine weitere Datennahme folgt.

Die Umsetzung, der auf den Kondensatoren gespeicherten Ladung, geschieht in der Auslesephase. Über Analogschalter werden nacheinander die Kondensatoren aller Kanäle mit den beiden Analogleitungen verbunden. Dieses wird über die Signale ϕ_1 , ϕ_2 (nur beim MX-3), **SI** und **CVRT** bestimmt. Die beiden Takte schieben die Information in dem 128-Bit-Schieberegister weiter. Am Eingang erscheint genau einmal das Shift-In, welches jeden Ausgang einmal auf LOW legt. Damit werden die Kondensatoren C_1 und C_2 mit den beiden Analogleitungen verbunden. Das Signal CVRT bestimmt, zu welchem Zeitpunkt der ADC das Analogsignal digitalisiert. Ein geeigneter Zeitpunkt läßt sich über den Convert-Scan (siehe 6.5 auf Seite 52 finden. In den Abbildungen 3.9 und 3.11 sind die Zeiten der Datennahme und der Auslese für die beiden Chips wiedergegeben. Die Einhaltung des Timings ist beim Triplex-Chip sehr wichtig, um das Rauschen auf dem niedrigen Niveau von $300\text{ }e^-$ zu halten. Der MX-3 arbeitet mit einem abweichenden Timing, welches stärker variiert werden darf.

Die Datennahme in wenigen Schritten:

1. Am Anfang ist der Verstärker kurzgeschlossen. Beide Kondensatoren sind offen.
2. S_1 und S_2 gehen von 0 auf 1: die Kondensatoren werden entladen.
3. R geht von 1 auf 0: der Verstärker ist ladungsempfindlich und beide Kondensatoren sammeln Ladungen, die auf dem Streifen erzeugt werden.
4. S_1 geht von 1 auf 0: Kondensator C_1 wird vom Streifen getrennt und nur auf C_2 werden noch Ladungen gesammelt. Das sensitive Fenster beginnt.
5. *Window* ist kurz aktiv: Wenn ein Trigger innerhalb der Zeit kommt, folgt der Datennahme- eine Auslesephase.
6. S_2 geht von 1 auf 0: Beide Kondensatoren sind vom Streifen entkoppelt und speichern die Spannung bis zum nächsten Zyklus oder der Auslesephase.
7. *Reset* geht von 0 auf 1: Der Verstärker ist wieder kurzgeschlossen und das Ende der Datennahme ist erreicht.

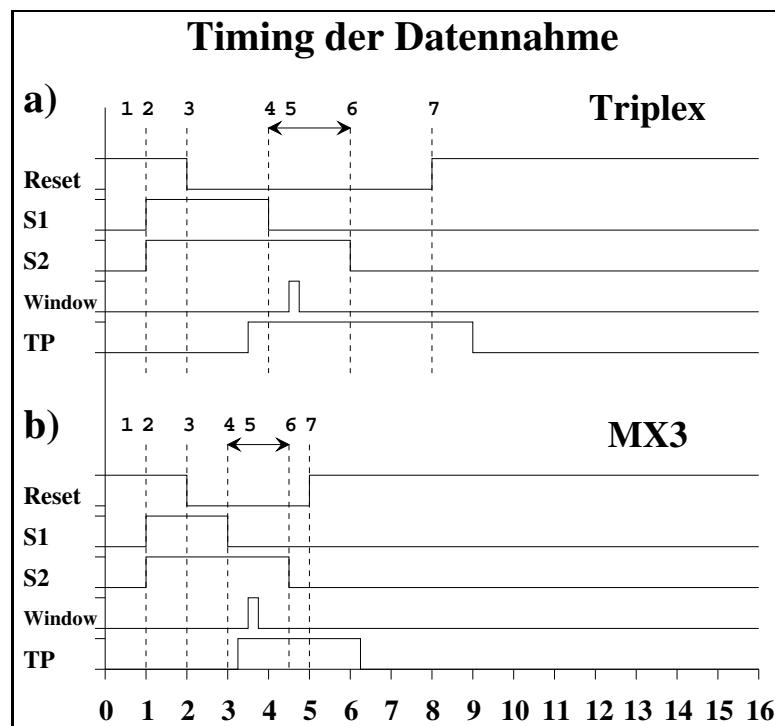


Abbildung 3.9: Das Timing der Datennahme. Der Pfeil markiert das sensitive Fenster, in der gesammelte Ladung nachgewiesen wird. Eine Erklärung zu den Zeiten von 1 – 7 findet sich im Text.

Zur Kalibrierung der Verstärker, kann auf jeden Eingang eine bekannte Ladung gesammelt werden. Hierzu dienen die 4 *Calibrate-Lines*, auf die ein Spannungspuls gegeben wird, der über den Kondensator C_{Cal} kapazitiv auf den Eingang gekoppelt wird. Eine nähere Beschreibung folgt in Abschnitt 6.4 ab Seite 53

Während der Auslesephase werden nacheinander die Kondensatoren C_1 und C_2 der Kanäle mit der beiden Analogleitungen A_1 bzw. A_2 verbunden. Hierfür wird ein Schieberegister mit 128 Bit genutzt. Mit zwei Takten, den Φ -clocks, wird das Schieberegister getaktet. Ein Ausschnitt von 3 Stufen des Schieberegisters ist in Abbildung 3.10 gezeigt. Beim Triplex-Chip wird der Takt Φ_2 intern erzeugt, indem Φ_1 verzögert wird. Den Eingang des Schieberegisters bildet das SI . Nach n weiteren Takten verbindet der Ausgang Q_n des Schieberegisters die Speicherkondensatoren des n -ten Kanals mit den Analogleitungen. Nach 128 Takten erhält man von der letzten Stufe das SO , welches als Eingang für den nächsten Chip dienen kann.

Die Auslesechips werden auf ein Hybrid geklebt. Das Hybrid verteilt die Signale vom Stecker an die Chips und die Wafer. In der Abbildung 3.12 ist ein Photo von einem Ausschnitt des Moduls wiedergegeben. Es zeigt das Hybrid A047 des *Outer Layer* mit 5 MX-3 Chips. Unten links sieht man das Flachbandkabel aus Kapton, mit dem die Signale von der Repeaterkarte zum Detektor geführt werden. Die Bonddrähte zwischen Chip und Wafer sind als eine Fläche zu erkennen. Da der Abstand zwischen

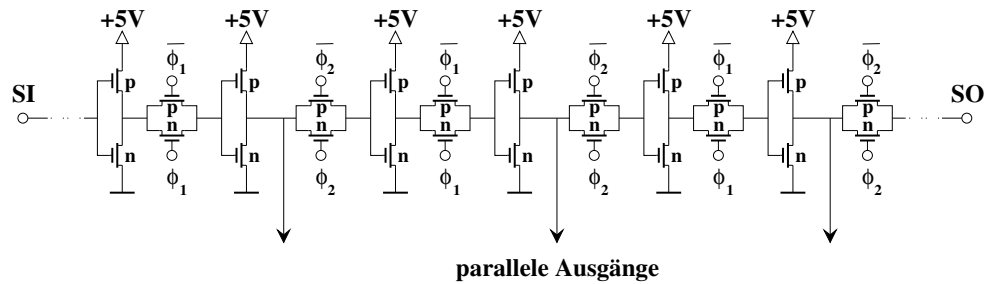


Abbildung 3.10: Schaltbild des Schieberegisters des MX-3 (Auszug). Ein Impuls am Eingang wird bei jedem Takt um eine halbe Stufe weitergeschoben. So werden, nacheinander, die Kondensatoren jedes Kanals mit dem Analogausgang verbunden. Nach 128 Takten erscheint am Ausgang ein Impuls, der auf den Eingang des nächsten Chips gelegt werden kann. So wird eine Umsetzung der Kanäle mehrerer Chips auf einer Analogleitung ermöglicht. [15]

2 ausgelesene Streifen nur $50\mu\text{m}$ beträgt, wird in 2 Lagen gebondet, so daß die Drähte den doppelten Abstand haben.

Auf jedem Hybrid befindet sich um das linke Befestigungsloch ein Metallring. Die Lage der Streifen auf jedem Wafer werden relativ zu diesem Punkt bis auf $5\mu\text{m}$ vermessen. Hat man alle Module einer Halbschale auf der Unterstützung montiert, wird dieser Ring verwendet, um die Lage aller Module im Raum zu bestimmen. Im Experiment ist dann die Lage der Streifen eines Wafers bis auf $20\mu\text{m}$ bekannt.

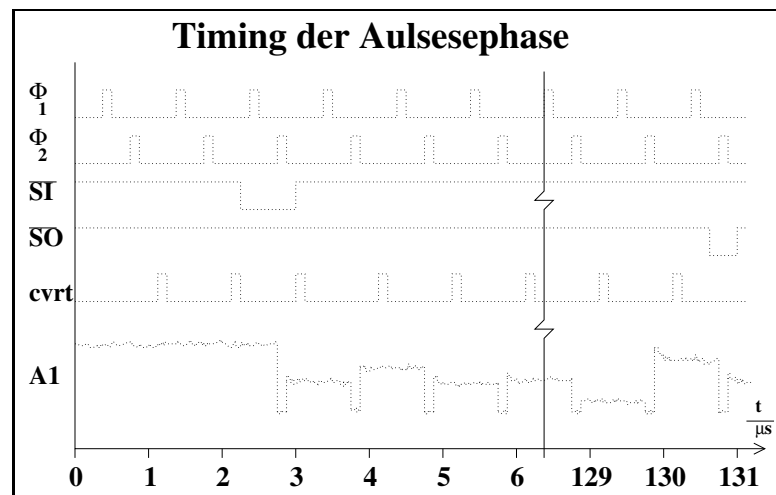


Abbildung 3.11: Das Timing der Auslese. Der Triplex erzeugt das Signal Φ_2 intern, durch eine Verzögerung des Φ_1 -Taktes. Zum Zeitpunkt, zu dem CVRT aktiv ist, wandelt der ADC das Analogsignal um. Am Ausgang A1 ist nacheinander das Potential der Kondensatoren C_1 aller Kanäle zu sehen.

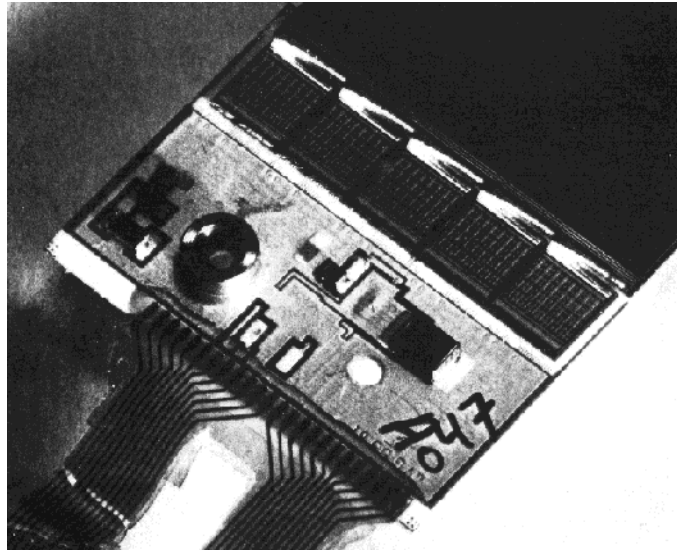


Abbildung 3.12: Blick auf ein Hybrid des 93er Outer Layer. Der Metallring ist eine Referenzmarkierung, die für die Vermessung der Module wichtig ist. Das Kapton-Kabel unten links, verbindet den Detektor mit der Auslese-Elektronik. [10]

3.9 Detektormodule

Die Module für den Outer Layer des neuen Vertex-Detektor bestehen aus zwei Lagen von einseitigen Wafern. Auf der Oberseite befinden sich je 4 Wafer mit Streifen in Richtung der z -Achse, die an den Enden ausgelesen werden. Der Abstand zweier Diodenstreifen ist $25\text{ }\mu\text{m}$, wobei nur jeder zweite ausgelesen wird. Jeder Wafer ist $6,4\text{ cm}$ lang, $3,2\text{ mm}$ breit und hat 640 Streifen. Mit diesen wird die $R\Phi$ -Koordinate bestimmt. Die Unterseite hat ihre Streifen um 90° gedreht und mißt die RZ -Koordinate der Spuren. Der Abstand der Streifen ist hier von Wafer zu Wafer verschieden. Bei kleinen $|z|$ ist ein Wafer, mit einem Auslese-Abstand von $50\text{ }\mu\text{m}$, der RZ-1280. Es schließt sich einer mit $100\text{ }\mu\text{m}$ (RZ-640) und zwei mit je $200\text{ }\mu\text{m}$ (RZ-320) an. Für den Vertex der meisten Spuren gilt $|z| < 2\text{ cm}$. Die RZ-320 Wafer haben 11 cm Abstand von der Strahlachse und $|z| > 12\text{ cm}$. Bei einem Einfallswinkel von $> 45^\circ$ verteilen sich die Ladungen auf einen Bereich von $300\text{ }\mu\text{m}$ oder mehr.

3.10 Der Vertexdetektor von DELPHI

Der Vertex-Detektor besteht aus 2 Hälften. Die relative Lage der Module zueinander, ist auf jeder dieser Hälften bis auf $20\text{ }\mu\text{m}$ vermessen. Beim Einbau werden die Schalen, durch eine mechanische Führung, aneinander gesetzt.

Der Vertex-Detektor, der von 1993 bis 1995 verwendet wird, ist in Abbildung 3.15 zu sehen, und wird im Folgenden als *alter* Detektor bezeichnet. Er besteht aus 3 zylindrischen Lagen. In jeder Lage besteht ein Modul aus 2 Hybriden und 4 Wafern,

Seitenansicht eines neuen Moduls der äußeren Lage

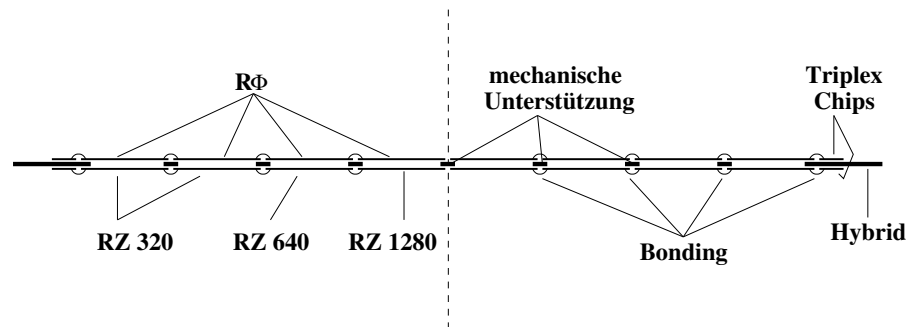


Abbildung 3.13: Seitenansicht eines Moduls des neuen Outer Layer

von denen jeweils 2 an einem Ende ausgelesen werden. Die Lagen sind verschachtelt aufgebaut, um den Einfallswinkel nicht zu groß werden zu lassen. Alle Module haben $\approx 10\%$ Überlapp. Durch Spuren mit 6 Treffern kann so eine Justierung der Position der Module erfolgen.

Für den Ausbau von LEP, auf eine Schwerpunktsenergie von 200GeV, wird die Akzeptanz des Vertex-Detektor verbessert. Zum einen werden Outer- und Inner Layer auf 8 Wafer verlängert. Zusätzlich kommen in den Vorwärtsbereich noch Pixel- und Ministrip-Detektoren, die aber eine schlechtere Ortsauflösung haben. Die Hälfte einer Halbschale ist in Abbildung 3.17 zu sehen. Links erkennt man die 3 Lagen von den neuen

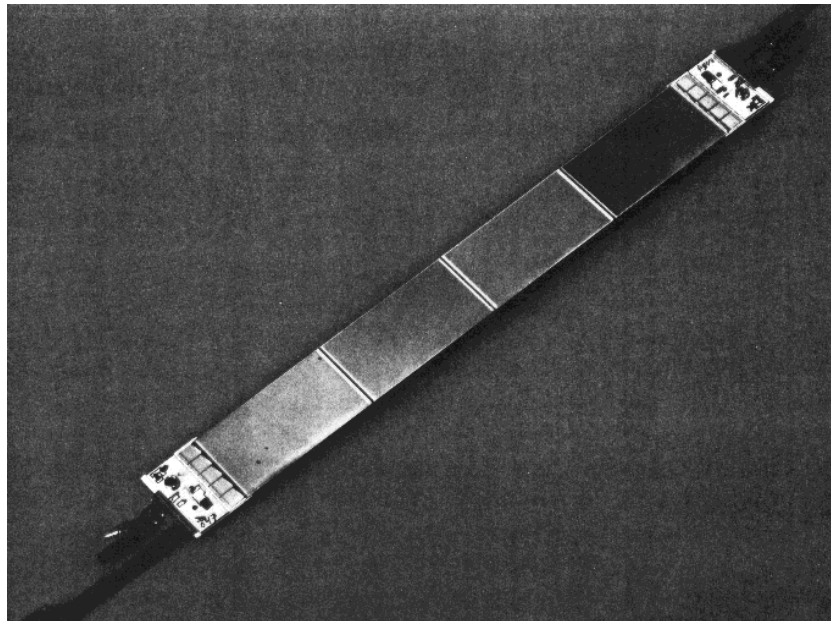


Abbildung 3.14: Ein Modul des Outer-Layer des alten Vertex-Detektors

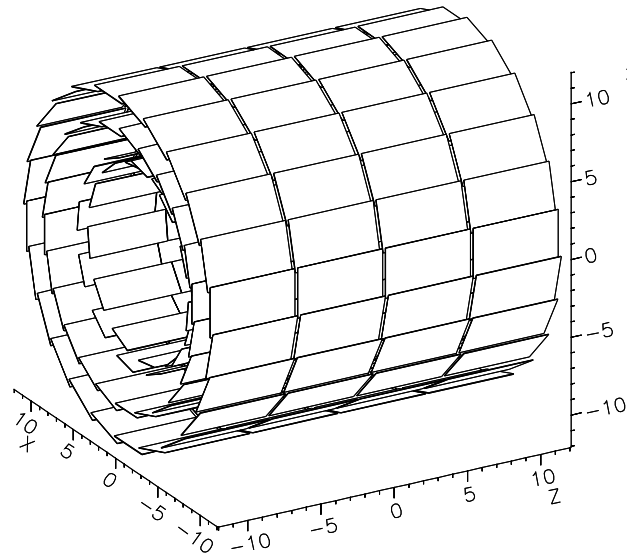
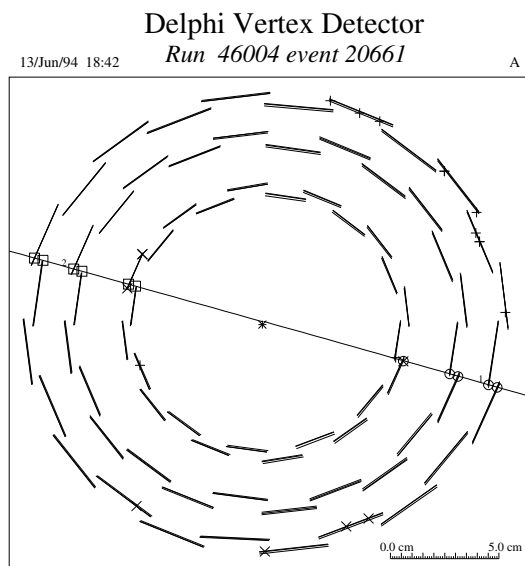


Abbildung 3.15: Skizze des Vertex-Detektors, wie er seit 1993 im Einsatz ist. Der Closer und der Outer Layer sind doppelseitig, der Inner Layer hat seine Streifen nur parallel zur Strahlachse.

Modulen, von denen die beiden äußeren deutlich verlängert wurden. Rechts sieht man



Die Spuren von Müonen sind kaum gekrümmt, so daß, in der Überlapp-Region, 6 Treffer einer Spur möglich sind. Hierdurch ist eine genaue Justierung der Module zueinander möglich.

Abbildung 3.16: Ereignis $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ mit 6 Treffern pro Spur

deutlich die Kühlrohre, mit denen die Wärme der Auslesechips abtransportiert wird. Auf der Halterung aus Aluminium sieht man außen die Ministrips, und etwas verdeckt auch die Pixeldetektoren. Durch Verzögerungen in der Lieferung der Wafer, wird das 95er Upgrade frühestens Ende 1995 zum Einsatz kommen.

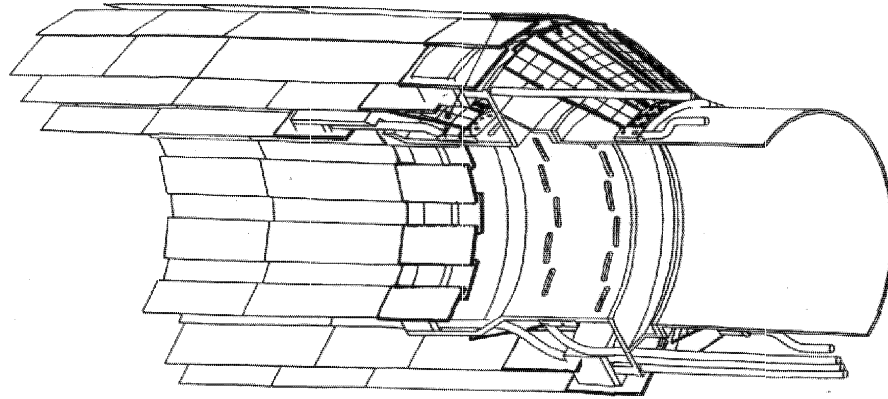
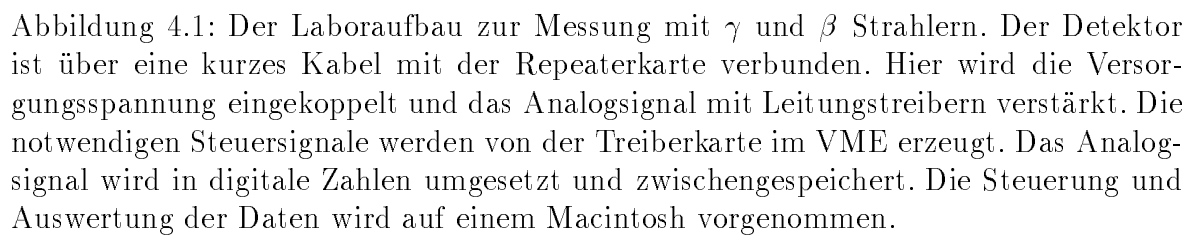


Abbildung 3.17: Skizze des neuen Vertex-Detektors. Es ist nur eine Hälfte der Halbschale dargestellt. Der Closer Layer bleibt weiterhin 4 Wafer lang. Inner- und Outer Layer wurden auf 8 Wafer verlängert. Ab diesem Design, wird der Detektor mit Wasser gekühlt, deren Rohre am rechten Rand zu erkennen sind.

Die Module der äußeren Lage werden verschachtelt auf dem Träger angeschraubt. Deren Oberseiten zeigen abwechselnd nach außen oder nach innen.

Der Meßplatz für Silizium–Streifen–Detektoren

Der komplette Aufbau für Messungen mit radioaktiven Präparaten ist in Abbildung 4.1 dargestellt.



Von den Detektormodulen geht ein Flachbandkabel aus Kapton zu der Repeaterkarte. Diese liefert die notwendigen TTL-Signale für die Steuerung der Auslesechips auf dem Hybrid. Die Signale werden hier von differentiellen Empfänger umgeformt. Zusätzlich werden hier die Versorgungsspannungen eingespeist und das Analogsignal wird verstärkt. Für jeden der beiden Auslesechips, MX-3 und Triplex, wird eine eigene Karte benutzt. Die Steuersignale gelangen von der Treiberkarte, einem VME-Einschub¹, zum Repeater. Die Treiberkarte erzeugt die notwendigen Signale für die Steuerung der Datennahme, der Auslese des Detektors und synchronisiert den ADC mit der Auslese. Der ADC befindet sich auf einem zweiten VME-Einschub und kann das analoge Signal mit einer Rate von 1Mhz abtasten. Die Auflösung ist 10 Bit plus 1 Bit für den Überlauf. Bis zu 4096 Kanäle können digitalisiert auf der Karte gespeichert werden.

Das VME-Crate wird von einem Performa 600² gesteuert, auf dem LabVIEW 3.0 läuft. Zeitkritische Routinen sind in C geschrieben und mit Think C++ 6.0 compiliert. LabVIEW ist eine graphische Programmieroberfläche, für die am CERN eine Schnittstelle zur VME-Steuerung geschrieben wurde.

Die beiden Einschübe verwenden nur die Standard VME Adressierung über einen 24 Bit breiten Adreßbus. Die fehlenden Adreßbits 24 – 31 sind durch die Nummer des VME-Crates (bei uns 0) und die Programmierung des VME-CAMAC-Controllers im Performa 600 festgelegt. Dies ergab bei uns die Einstellungen `0xC0h`. Die Datenübertragung wird nur mit 16 Bit Breite, im Single Transfer Mode, erlaubt. VME Richtlinien fordern von Karten, die 16 Bit des Datenbusses nutzen, neben einem 16 Bit Zugriff, daß die Daten auch über die unteren 8 Bit nacheinander übergeben werden können. Diese Forderung wird weder von der Treiberkarte, noch vom VFLAM erfüllt. Die Karten belegen somit immer 2 Byte auf geraden Adressen

4.2 Die VME-Treiberkarte

Die Treiberkarte ist ein VME-Einschub, welcher die Signale erzeugt, die für die Auslese von Silizium-Streifen-Detektoren benötigt werden. Da für Treiberkarte und VFLAM von LEPSI³ keine Handbücher existieren, wurde Anleitung zur Bedienung erstellt [23], die ich im Anhang A wiedergebe. Hier stelle ich die Funktionsweise an Hand des Blockschaltbildes aus Abbildung 4.2 kurz dar.

Die Signale der Datennahme werden im RAM 1, die der Auslese in RAM 2 abgelegt. Für die Messung werden die Adressen mit konstantem Takt hochgezählt. An den Ausgängen der Speicher erscheinen die Werte der Bits aller Adressen nacheinander. Diese zeitliche Abfolge definiert das Signal, welches als Differenzsignal an der Frontplatte zur Verfügung steht. Über *Twisted-Pair*-Leitungen kann das Signal mehrere Meter übertragen werden. Der Empfänger muß es auf geeignetes Potential umwandeln.

¹VME: Versa Module Eurocard

²Performa 600: PC der Firma Apple

³Lepsi, Straßbourg, France

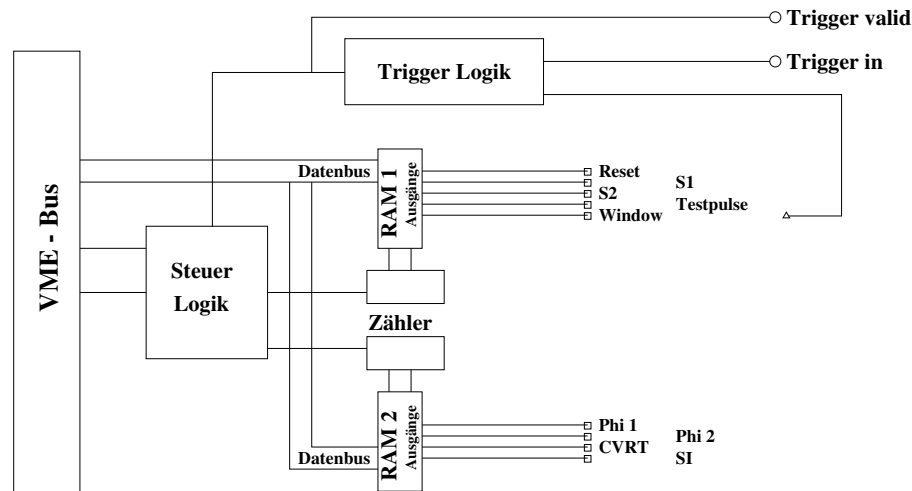


Abbildung 4.2: Blockschaltbild der VME-Treiberkarte. Das Herz der Karte sind 2 RAMs, die über das VME geschrieben werden können. Im Betrieb werden die Adressen hochgezählt, und an jedem Ausgang steht ein Signal für die Detektorauslese zur Verfügung. Für Messungen wird die Datennahme solange wiederholt, bis ein Trigger am Eingang akzeptiert wurde. Hiernach folgt die Auslesephase, welche die Messung beendet.

Die Steuerlogik generiert solange neue Datennahmen, bis ein Trigger, der an der oberen LEMO-Buchse zugeführt wird, akzeptiert wird. Einer Datennahme mit gültigem Trigger folgt die Auslese der Chips. Die Karte kann danach per Software für den nächsten Zyklus gestartet werden.

4.3 Der VME-AD-Wandler

Der zweite Einschub für das VME-Crate ist die Karte mit dem AD-Wandler, das VFLAM⁴. Es ist eine Weiterentwicklung des SIROCCO⁵, welche die höhere Geschwindigkeit des VME-Busses nutzt.

Das Blockschaltbild des VFLAM ist in Abbildung 4.3 wiedergegeben. Das differentielle Analogsignal wird verstärkt und zu einem, per Software einstellbaren, Wert addiert. Im Gegensatz zur FastBUS-Version im Experiment ist dieser Offset für alle Kanäle gleich. Die Wandlung geschieht mit einem Flash-ADC⁶, der eine Genauigkeit von 10 Bit hat und bei Überlauf das elfte Bit setzt. Für unsere Messungen wird der Takt von der Treiberkarte generiert. Der LEMO-Eingang ist unbenutzt. Die Zahl von Wandlungen muß ein Vielfaches von 256 sein, so daß nach der Umsetzung nur die relevanten Zellen des Speichers ausgelesen werden.

⁴VFLAM: Vme FLash Adc Multipurpose module

⁵SIROCCO: Silicon strip ReadOut Camac COntroler

⁶Flash-ADC: Alle Bits stehen auf einmal zur Verfügung

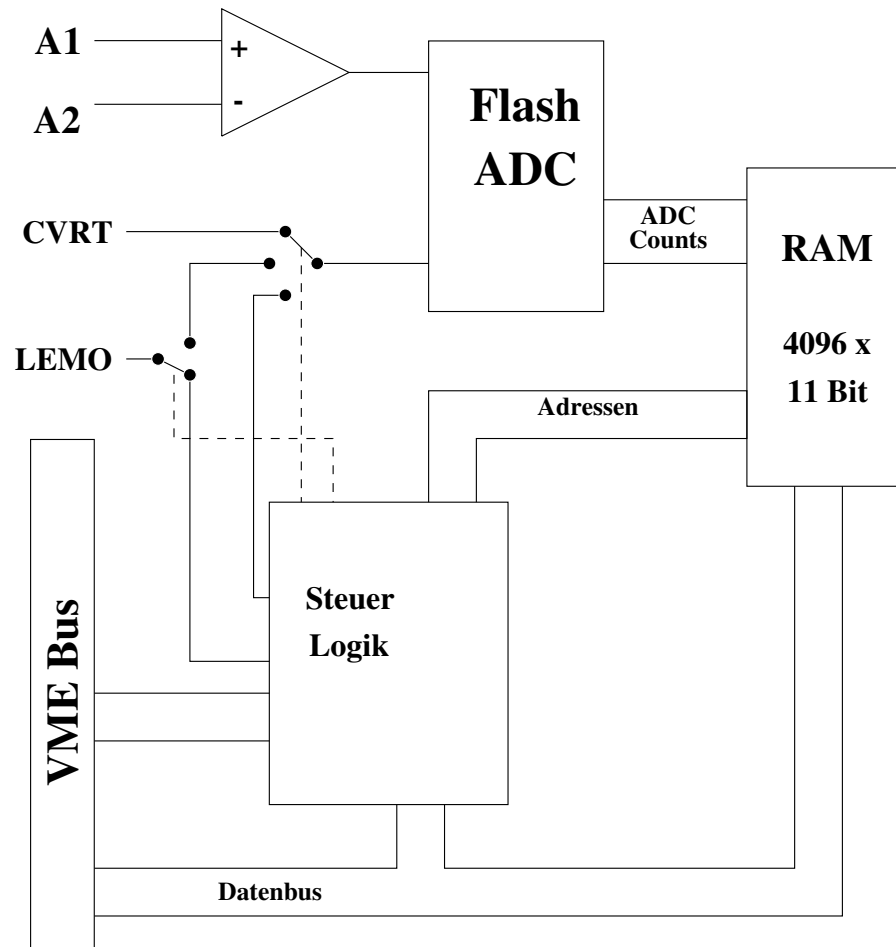


Abbildung 4.3: Blockschaltbild der VFLAM-Karte. Die beiden Analogsignale werden subtrahiert und in digitale Werte mit 10 Bit umgewandelt. Der Takt hierfür kann über Twisted Pair, die LEMO-Buchse kommen, oder intern erzeugt werden. Die Daten von bis zu 4096 Streifen können gespeichert werden. Der LEMO-Eingang kann wahlweise Start-, Stoppsignal oder Takt für die Umsetzung sein.

Der genaue Schaltplan mit einer kurzen Erläuterung der Funktionsweise findet sich in [20]. Eine Beschreibung der Register und Programmierung ist im Anhang A wiedergegeben. [23]

4.4 Die verwendeten radioaktiven Präparate

Die Am^{241} Quelle

Zur Energieeichung der Silizium Streifen Detektoren wird eine Am^{241} Quelle verwendet. Ameritium zerfällt unter Aussendung von α -Teilchen in Neptunium. Die Halbwertszeit

für diesen Zerfall beträgt 458 Jahre, so daß bei unseren Messungen von einer konstanten Rate ausgegangen werden kann. Das Termschema ist Abbildung 4.4 wiedergegeben. Da α -Strahlung unerwünscht ist, wird diese abgeschirmt. Beim Zerfall entsteht ein angeregter Kern des Np^{237} . Dieser geht in den Grundzustand unter Aussendung eines oder mehrerer Photonen.

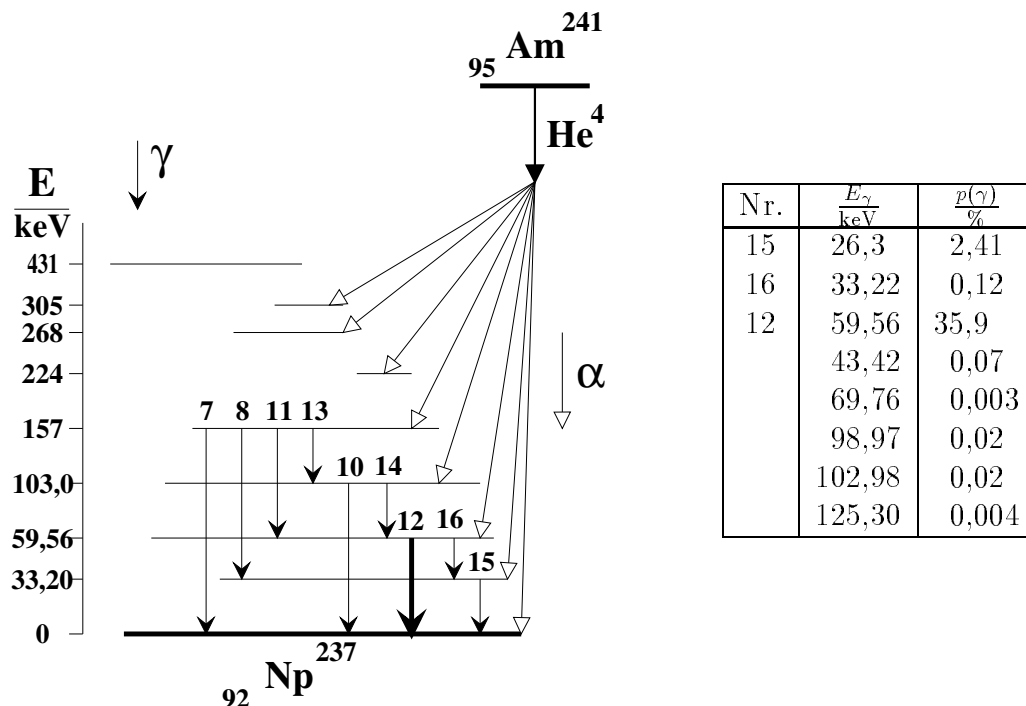


Abbildung 4.4: Termschema für den Zerfall von Americium 241. Ich habe hier die wichtigsten γ -Linien aus [8] (Seite 1062) wiedergegeben. Die relative Intensitäten der Linien sind aus [12]. Beim Detektortest ist nur die Linie 12 (59,56keV) von Interesse.

Das Gamma-Spektrum hat eine dominante Linie bei 59,56keV. Neben den Linien aus Abbildung 4.4 existieren noch sehr viele weitere. Bis auf zwei haben diese alle Wahrscheinlichkeiten von weniger als 0,1%. Eine Skizze des Spektrums ist in Abbildung 4.5 aufgetragen.

Die Energie der wichtigsten Linie ist 59,56keV und liegt damit etwas tiefer, als die Energiedeposition eines MIPs in 280 μm von 90keV. Der Detektor wird somit auf seine Sensitivität für MIPs getestet. Der Signal-zu-Rauschabstand aller Streifen sollte etwa gleich sein. Für die alten Module, die mit dem MX-3-Chip ausgelesen werden, liegt der Signal-zu-Rauschabstand bei etwa 8,3. Der deutlich rauschärmere Triplex-Chip ergibt Werte von über 20. Bei der Energiedeposition eines MIPs, ist dieser Wert noch mit $\frac{90}{60} = 1,5$ zu multiplizieren.

Die Effektivität für den Photoeffekt in Silizium ist bei der Energie von 60keV nur sehr klein. Die Absorbtionswahrscheinlichkeit für die 3 möglichen Reaktionen von Photonen in Silizium ist in Abbildung 3.3 wiedergegeben. Nur weniger als 1% der Pho-

Intensitäten der wichtigsten Photonen des Zerfalles von Ameritium

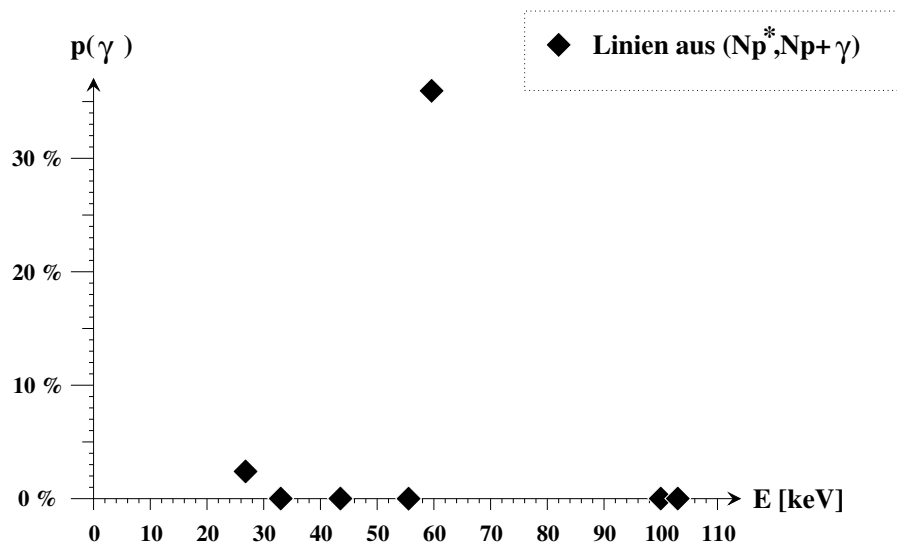


Abbildung 4.5: Wahrscheinlichkeit für Gammalinien des Ameritiums

tonen machen einen Photoeffekt. Die Wahrscheinlichkeit für den Comptoneffekt ist etwas größer, doch liegt die Comptonkante, für die Photonen mit 60keV, bei 11keV. Comptonelektronen lassen sich, bei Verwendung des MX-3-Chips, nicht einwandfrei von Rauschuntergrund trennen und erhöhen somit das Rauschen scheinbar.

Aus Gleichung 3.14 folgt mit der Energie von 59,56keV für die erzeugte Ladung:

$$Q = Ne = \frac{59,56\text{keV}}{3,6\text{eV}} e \approx 16.500e \quad (4.1)$$

Die Sr^{90} Quelle

^{90}Sr ist ein β -Strahler, bei dessen Zerfall



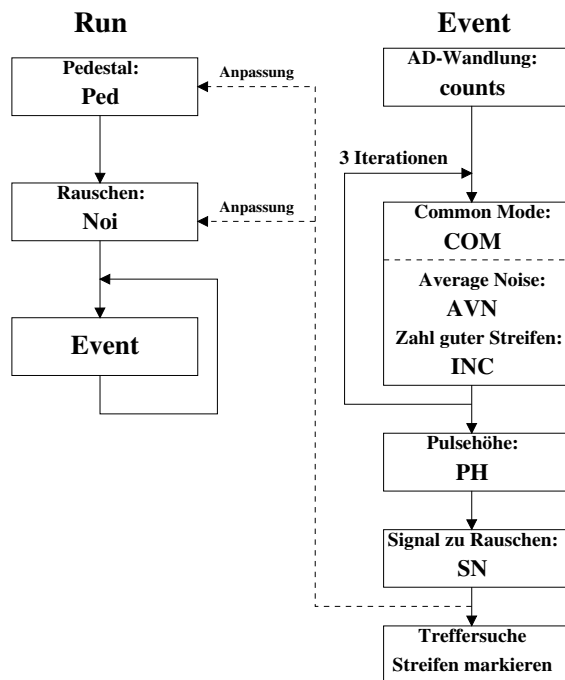
ein Elektron mit einer maximalen Energie von 0,546MeV entsteht. Der Zerfall geschieht mit 100 % Wahrscheinlichkeit und einer Halbwertszeit von 28,5a. Das Yttrium zerfällt ebenfalls zu 100 % in Zirkonium, wobei ein Elektron von maximal 2,2MeV ausgesandt wird.

Im Gegensatz zu Photonen können die Elektronen getriggert werden. Hierfür werden 2 Lagen von szintillierenden Fasern verwendet. Der Detektor wird zwischen beiden Lagen positioniert. Eine Auslese erfolgt nur, wenn eine Koinzidenz von Singlen beider Triggerlagen vorliegt. Zum einen ist so bei jeder Auslese ein Treffer vorhanden. Durch die notwendige Energiedeposition in der zweiten Szintillatorlage werden Elektronen

aus dem Zerfall mit einer maximalen Energie von 0,5 MeV unterdrückt. Die Elektronen, welche verbleiben, haben im Mittel eine Energie von 1,1 MeV und haben daher minimale Energiedeposition.

Kapitel 5

Die Signalverarbeitung



Die einzelnen Größen beschreibe ich, in der Reihenfolge ihrer Berechnung während der Auslese, in den angegebenen Abschnitten.

5.1 *ADC-counts*

5.1 *Pedestal und Noise*

5.2 *Common Mode*

5.3 *Average Noise und Zahl guter Streifen*

5.4 *Pulshöhe und Signal zu Rauschen*

Abbildung 5.1: Flußdiagramm zur VME Auslese

Das Flußdiagramm in Abbildung 5.1, zeigt in welcher Reihenfolge die relevanten Größen berechnet werden. Die Begriffe *Event* und *Run* sind der Terminologie des DELPHI-Experimentes entlehnt. Ein Event bezeichnet die einmalige Auslese des Detektors. Ein Run ist die Initialisierung, gefolgt von einer variablen Zahl von Events.

5.1 Rohdaten und Pedestalsubtraktion

Der AD-Wandler auf dem VFLAM¹ liefert für jeden Kanal eine Zahl zwischen 0 und 1023, oder > 1024 bei einem Überlauf. Diese Rohdaten sind in Abbildung 5.2 für den Detektor T27 dargestellt. Durch die große Streuung der Offsets der einzelnen Kanäle sind Treffer hier nicht zu erkennen. Bevor die Suche nach Treffern beginnen kann,

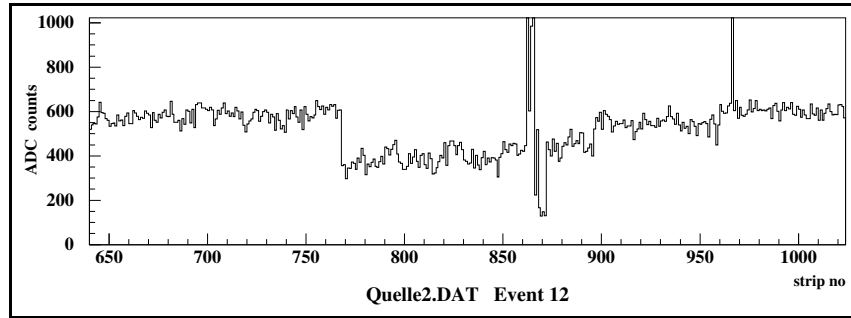


Abbildung 5.2: Rohdaten des Detektors T27. Es sind die digitalen Werte der Kanäle der Chips M6 – M8 dargestellt. Mit Auslesestreifen sind nur die Kanäle 640 bis 960 verbunden. Bei Kanal 865 ist ein Pin Hole, der auch die benachbarten Kanäle in Mitleidenschaft zieht. Durch eine geeignete Biasspannung verschwindet die Potentialdifferenz am Pin Hole, so daß die Nachbarstreifen wieder sensitiv werden.

müssen die beiden Offsets abgezogen werden. Der erste Offset, der im Folgenden *Pedestal* genannt wird, ist für jeden Kanal verschieden. Er ist das zeitliche Mittel des Signals eines Streifens, ohne Quelle, und unabhängig von den benachbarten Kanälen. Er kommt durch räumliche Variation des Generationsrauschens im Wafer und unterschiedliche Sperrströme der einzelnen Diodenstreifen. Das Pedestal ändert sich nur langsam mit der Zeit, so daß es einmal vor der Messung bestimmt werden muß. Danach reicht eine ständige kleine Anpassung für jeden Event aus. In Abbildung 5.3 ist das Pedestal für den Detektor T27 wiedergegeben.

Es gibt drei Möglichkeiten, das Pedestal zu bestimmen. Die erste ist, alle Streifen auf einen Wert zu setzen. Danach wartet man 500 bis 1000 Events, bis durch die Anpassung die richtigen Werte erreicht sind. Schneller geht es, eine kleine Anzahl von Events zu nehmen und aus diesen das Pedestal zu errechnen. Eventuelle Treffer einer Quelle oder des Lasers ([22]) müssen dabei berücksichtigt werden. Die dritte Möglichkeit ist, die Pedestals von einem vorigen Run zu übernehmen. Dieses geschieht bei den Abbildungen 5.2 bis 5.4, denn das Pedestal stammt aus Daten einer Messung ohne Quelle.

Bei jedem Event einer Messung wird, als erstes, das Pedestal von den Rohdaten subtrahiert und man erhält das *Rohsignal*. Treffer sind jetzt schon zu erkennen, jedoch ist eine Analyse noch schwierig, da die Grundlinie verschoben ist. Die Verschiebung ist nicht über den ganzen Detektor konstant, sondern nur innerhalb eines Chips (128 Streifen). Dieses ist der Common Mode (COM) den ich im Abschnitt 5.2 behandle.

¹VFLAM: VME FLash ADC Multipurpose Module

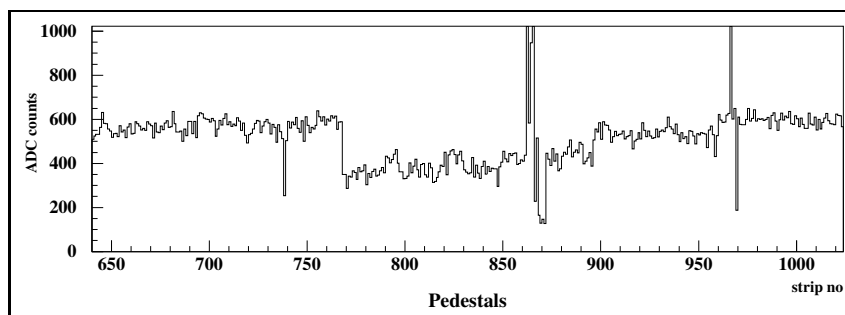


Abbildung 5.3: Pedestals für den Detektor T27. Das Pedestal eines Kanals ist der Mittelwert der Pulshöhe. Berechnet wird er als laufendes Mittel über die Events. Der Peak bei Streifen 860 bis 870 kommt durch einen Pin Hole. Durch eine geeignete Biasspannung verschwindet der Überlauf und die benachbarten Kanäle sind nutzbar.

Das Rauschen eines Kanals ist definiert, als die Breite der Schwankung der Pulshöhe um das Pedestal, wobei der Common Mode vorher abgezogen wird. Berechnet wird das Rauschen als „Running Average“ über alle Events nach folgender Formel:

$$\text{Noi}_i = \text{Noi}_i + \frac{\text{PH}^2 - \text{Noi}^2}{F_N} \quad (5.1)$$

F_N bestimmt die Geschwindigkeit, mit der das Rauschen angepaßt wird. Aufwendiger zu berechnen ist die zweite Definitionsmöglichkeit: Das Rauschen ist die Breite der Pulshöhenverteilung. Die Rechenleistung des Performa 600 reicht nicht aus, um diese Art zu verwirklichen.

5.2 Der Common Mode

Der zweite Offset, der Common Mode, schwankt stark von Event zu Event. Er ist auch zu beobachten, wenn nur ein Hybrid, ohne Detektor, ausgelesen wird. Der Ort

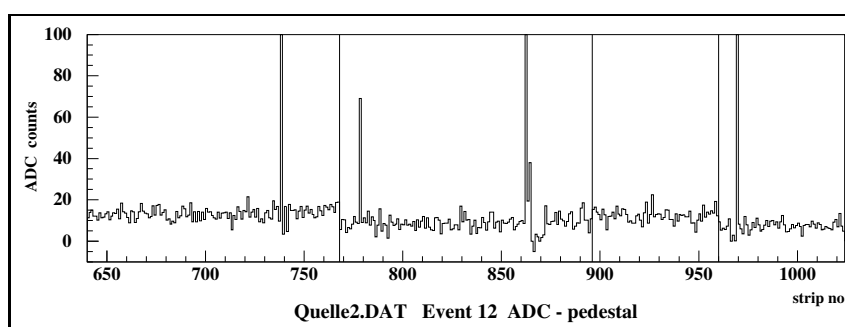


Abbildung 5.4: Rohsignal als Differenz der ADC counts und Pedestal. Neben den *Pin Holes* ist bei Kanal 780 ein Treffer zu erkennen. Vor der Treffersuche wird der 2. Offset abgezogen, so daß die Grundlinie bei 0 liegt.

des Pickups ist die Eingangsstufe des Auslesechips oder die Bondpads. Der Common Mode für verschiedene Chips kann unterschiedlich groß sein, so daß Stufen nach jeweils 128 Kanälen zu beobachten sind. Die Schwankungen von Chip zu Chip sind klein, im Vergleich zu den Schwankungen über mehrere Events.

Bei den Modulen des 96er Upgrades wird an das Hybrid der äußeren Lage zuerst ein RZ-320-Wafer geklebt und gebondet. Dieser hat nur 320 Diodenstreifen, mit einem Abstand von $200\mu\text{m}$. Die beiden inneren haben aber 640 bzw. 1280 Streifen. Um diese auszulesen, werden 640 Auslestreifen benötigt. Von den 640 Streifen des RZ-320, sind 320 mit den Diodenstreifen verbunden, die Anderen sind nur als Verbindung zur anderen Seite des Wafers (Routing-Streifen). Die Kapazität der Streifen beträgt für Letztere $\approx 6\text{pF}$, während die Ersten eine Kapazität von $\approx 20\text{pF}$ haben. Die Unterschiedliche kapazitive Last am Eingang, bewirkt eine zusätzlich Stufe bei den Triplexchips, nach Streifen 960.

Den Common Mode habe ich für das Event 12 in Abbildung 5.5 wiedergegeben. In Abbildung 5.6 sieht man ein Event, bei dem die Stufe zwischen den 320 Auslese- und Routingstreifen gut zu erkennen ist.

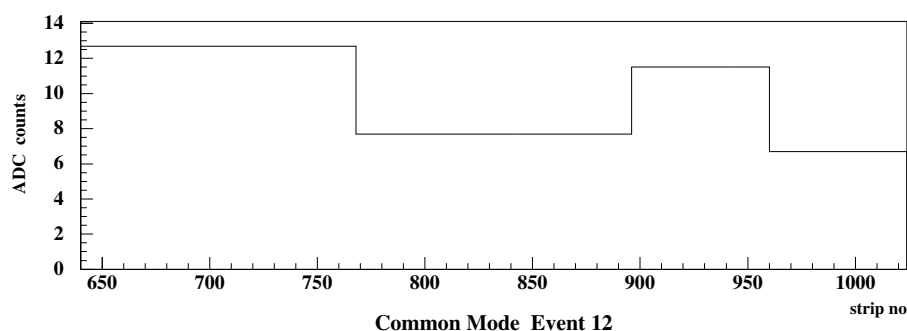


Abbildung 5.5: Common Mode des Hybrids T27 für Event 12. Der Common Mode ist der gemeinsame Offset aller Streifen (128) eines Chips. Hier ist er für die Chips 6 – 8 des Detektors T27 gezeigt. Die Stufe nach Streifen 960 entsteht durch den RZ-320-Wafer (siehe Text).

Damit ein Treffer bei der Berechnung von Common Mode und Average Noise nicht berücksichtigt wird, geschieht die Bestimmung iterativ. Es werden nur gute Streifen berücksichtigt, deren Pulshöhe unter einer Schwelle liegen. Die Schwelle ist gegeben durch das Average Noise der vorherigen Iteration, multipliziert mit einem Faktor. Im Experiment wird bei der 1. und 2. Nachiteration jeweils 3,0 als Faktor verwendet. Ohne diese Iteration verursacht vor allem der Laser, wenn er auf hohe Intensität eingestellt ist, eine Verschiebung der Grundlinie. In diesem Fall haben sich die Faktoren 1,0 und dann 3,0 als günstiger erwiesen.

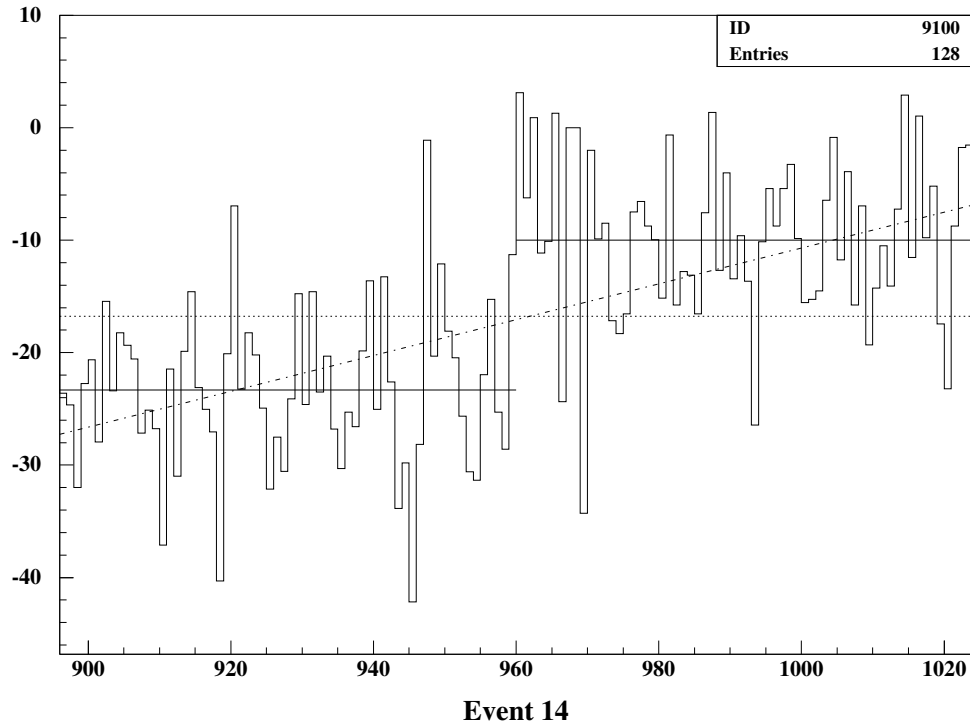


Abbildung 5.6: Ausschnitt des Common Modes für Chip 8. Die ersten 64 Kanäle von Chip 8 sind mit Auslestreifen, die anderen 64 mit Routingstreifen verbunden. Ein Fit an eine Konstante (gepunktete Linie) erweist sich als schlecht. Besser ist eine Gerade (strichpunktiert), aber noch wahrscheinlicher sind 2 Konstanten (durchgezogene Linie).

5.3 Statistische Daten

Durch die Reduktion der Daten bei dem Ameritium-Test (siehe 5.5), gehen viele Informationen verloren. Um trotzdem das Verhalten von einzelnen Chips oder eines Detektors überwachen zu können, werden einige signifikante Größen benötigt. Diese ergeben sich während der Prozessierung der Daten automatisch. Es sind:

1. Included Strips (INC_c): Anzahl der guten Streifen, die für die weiteren Berechnungen berücksichtigt werden.
2. Average Noise (AVN_c): Das mittlere Rauschen aller guten Streifen eines Auslesechips. Es ist definiert als:

$$AVN_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=n_{1,c}}^{n_{2,c}} PH_i^2}{INC_c}} \quad (5.2)$$

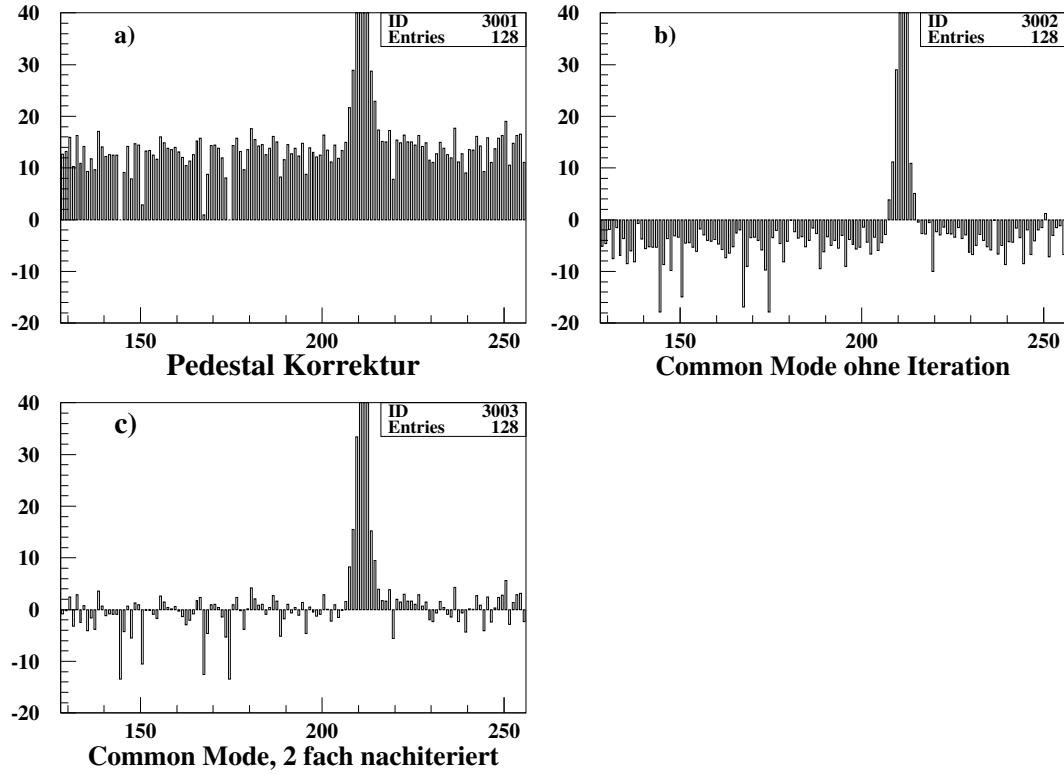


Abbildung 5.7: Entwicklung der ADC-Counts.

In a) ist die verschobene Grundlinie, der Common Mode, gut zu sehen. Bei einfacher Mittelung trägt der Laser weiter zu einer Verschiebung bei (b). Erst durch mehrfache Iteration verschwindet dessen Einfluß (c).

3. Common Mode (COM_c): Gemeinsamer Offset aller Pulshöhe eines Chips.

$$\text{COM}_c = \frac{\sum_{i=n_{1,c}}^{n_{2,c}} \text{PH}_i}{\text{INC}_c} \quad (5.3)$$

Die Größen geben Auskunft über den Status des Detektors. Im Experiment werden sie zur Überwachung der Funktionsfähigkeit benutzt. Sowohl eine Verbreiterung der Verteilung des Common Mode, als auch Erhöhung des Average Noise eines Chips sind ein Zeichen für die Alterung des Chips. (Vergleiche Abbildungen 7.2 und 7.3)

5.4 Die Pulshöhe und erste Treffersuche

Nachdem von den Rohdaten das Pedestal und der Common Mode abgezogen wurde, hat man die Pulshöhe von jedem Streifen. Bei der Abbildung 5.8 sind neben dem Treffer bei Kanal 778 noch viele defekte Streifen zu sehen. In der Umgebung von Streifen 865 ist

ein *Pin Hole*. Durch die fehlende Biasspannung, werden auch die umliegenden Streifen gestört.

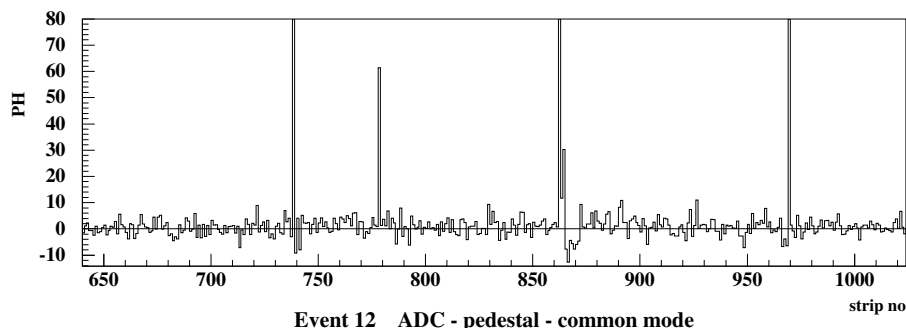


Abbildung 5.8: Die Pulshöhe für Event 12

Da die Verstärkung der einzelnen Kanäle unterschiedlich sein kann, braucht man eine weitere Größe, die hiervon unabhängig ist. Dieses ist der Signal-zu-Rauschabstand, der das Verhältnis von Pulshöhe zum Rauschen des einzelnen Streifens ist.

Treffer sollten bei beiden Definitionen nicht beitragen. Daher muß erst eine grobe Treffersuche erfolgen, die entsprechende Streifen markiert. Eine Anpassung der Pedestals und des Rauschens erfolgt dann am Ende der Routine für alle nicht markierten Streifen.

Die Anpassung des Pedestals geschieht auf zwei Weisen. Zum Einen wird das Pedestal, von allen Streifen eines Chips, über den Common Mode angepaßt:

$$Ped_i^{(n+1)} = Ped_i^{(n)} + \frac{COM}{256} \quad (5.4)$$

Dieses sorgt dafür, daß der Common Mode nicht zu groß wird, so daß bei dessen Berechnung kein Überlauf vorkommt. Wichtiger, für den relativen Offset der Streifen, ist die zweite Art der Anpassung:

$$Ped_i^{(n+1)} = Ped_i^{(n)} + \frac{PH}{1024} \quad (5.5)$$

Das Pedestal wird hier als „Running Average“ berechnet, genau wie das Rauschen nach Gleichung 5.1. Die Faktoren im Nenner müssen so klein gewählt werden, daß die Änderungen der Variablen mit den Variationen der physikalischen Größen einhergehen. Sie müssen aber groß genug sein, damit durch Rauschen keine Änderung erfolgt.

Im DELPHI-Experiment erfolgt die Prozessierung der Daten in Echtzeit. Die Anpassung von Pedestal und Noise erfolgt nur, wenn es der Bedarf an Rechenzeit zuläßt. Bei unseren Messungen gibt es keine Notwendigkeit, zu einem festen Zeitpunkt wieder sensitiv zu sein, so daß nach jedem Event eine Anpassung möglich ist.

Größe	Maske	Wertebereich
PH	0x000007FF	-256,0 ... 255,75
Noise	0x000FF800	0,0 ... 15,96875
Ped	0x7FF00000	0,0 ... 1023,50
Bad	0x80000000	0 ... 1

Tabelle 5.1: Parameter für das Packen der Streifendaten

Der dynamische Bereich der Daten, erlaubt eine Zusammenfassung aller 4 Größen in einem 32-Bit Wort.

5.5 Datenreduktion online

Im Programm habe ich nun für jeden Streifen je einen Wert für die Pulshöhe, das Rauschen, der Signal-zu-Rauschabstand, das Pedestal, und ein Flag, ob der Streifen schlecht ist. Um alle Information auf der Platte zu sichern, sind je Wert 4 Byte, also insgesamt $4 \cdot 5 \cdot N_{strip} = 20 \cdot 512 = 10\text{kB}$ notwendig. Dabei sind die Werte schon von $4 \cdot 4\text{Byte}$ auf 4Byte reduziert, indem man die einzelnen Größen maskiert. Die aktuellen Parameter hierzu sind wie folgt:

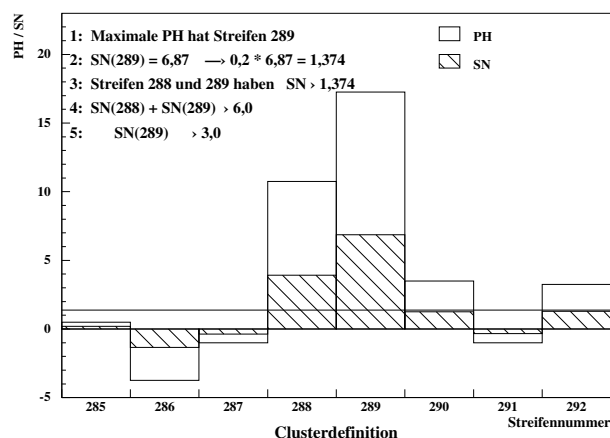
Die Messungen wurden mit einer γ -Quelle durchgeführt. Die Photonen können nicht getriggert werden. Deshalb muß der Detektor häufig ausgelesen werden und in jedem Event muß nach Treffern gesucht werden. Für eine Statistik der Analyse braucht man 50 - 100 Treffer pro Streifen: das sind 20.000 - 50.000 Events. Die genaue Zahl hängt von der Entfernung zwischen Quelle und Detektor ab. Um nicht für jedes Event 8 ... 20kB auf die Festplatte schreiben zu müssen, wird nur ein Teil der Daten gespeichert.

Ein guter Kompromiß zwischen Datenreduktion und Rechenzeitbedarf ist, nach benachbarten Streifen zu suchen, deren Signal-zu-Rauschabstand zusammen größer als eine Schwelle T_{sum} ist. Für den MX-3 gilt $T_{sum} = 5,5$, für den Triplex ist noch eine geeignete zu suchen, sowie ein Hybrid existiert, an das alle Wafer gebondet sind. Von dem Streifen mit der größten Pulshöhe markiere ich zusätzlich jeweils drei Streifen zu jeder Seite. Von allen markierten Streifen wird die Pulshöhe, das Rauschen, das Pedestal und das *Bad-Flag* gespeichert. Der dynamische Bereich dieser Größen erlaubt es, alle Werte in 4 Byte zusammenzufassen. Eine genauere Beschreibung der Reduktion befindet sich in [24]. Die Schwelle, auf den Signal-zu-Rauschabstand, unterdrückt den Rauschuntergrund, schneidet aber einen Teil des Spektrums ab.

Der hier benutzte dynamische Bereich für die Pulshöhe reicht nicht aus, um das Spektrum des Lasers aufzunehmen, wenn dessen Intensität zu hoch eingestellt ist. Vom Laser ist aber sowohl die Position, als auch das Event eines Treffers bekannt. Es reicht somit auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit unter LabVIEW aus, um das Pulshöhen-Spektrum zu erhalten.

5.6 Clusterdefinition

Nach der Messung werden, mit einem zweiten Programm, die komprimierten Daten entpackt und weiter untersucht. Hier ist die Definition für einen Cluster sehr viel strenger. In der Umgebung wird der Streifen mit der größten Pulshöhe gesucht. Dessen Signal-zu-Rauschabstand wird mit einem Faktor multipliziert und als Schwelle genommen. Alle direkt angrenzenden Streifen, deren Signal-zu-Rauschabstand größer ist als diese Schwelle, gehören zu dem Cluster. Von jedem gefundenen Cluster werden Pulshöhe, Signal-zu-Rauschabstand, gewichtetes Rauschen, sowie die Anzahl der Streifen, die Event-Nummer in dem Run und die Nummer des Streifens mit der maximalen Pulshöhe in einer Textdatei gespeichert. Diese Datei kann so von den meisten Statistikprogrammen gelesen werden.



Ein Cluster besteht aus benachbarten Streifen, welche folgende Bedingungen erfüllen: Die Summe des Signal-zu-Rauschabstand muß größer als T_{sum} sein, ein Streifen muß $SN \geq T_{st}$ haben. Vom Streifen mit der größten PH wird das $SN =: SN_{max}$ genommen und alle angrenzenden Streifen mit $SN \geq fSN_{max}$ gehören zum Cluster.

Abbildung 5.9: Definition eines Clusters

Dieser Algorithmus ist notwendig, da die Ladung eines Teilchens durch kapazitive Kopplung auf mehrere Streifen verteilt wird. Für die Analyse müssen die Streifen rekonstruiert werden, auf die sich das Signal verteilt hat. Diese Streifen werden als Cluster bezeichnet. Ein Cluster ist für die Analyse wie folgt definiert:

1. Es wird der Streifen mit der maximalen Pulshöhe gesucht. Diesen bezeichne ich mit m .
2. Alle benachbarten Streifen, deren Signal-zu-Rauschabstand größer als fSN_m ist, gehören zu dem Cluster.
3. Der Cluster wird als Treffer akzeptiert, wenn die Summe der Pulshöhe aller Streifen des Clusters größer ist als T_{sum} und $PH_m \geq T_{st}$. Die Schwellen T_{sum} und T_{st} können schon bei der Messung festgelegt und überprüft werden, so daß die nochmalige Überprüfung entfallen kann.

Ein Faktor von $f = 0,2$, der auch im DELPHI-Experiment verwendet wird, erwies sich, auch bei meinen Versuchen, als die beste Wahl. Der Faktor bestimmt, wieviele

Streifen an den Seiten noch zum Cluster gehören. Nimmt man zu wenig Streifen mit, so geht ein Teil der erzeugten Ladung verloren. Die Pulshöhe der Cluster wird dann systematisch zu klein. Wenn andererseits zu viele Streifen berücksichtigt werden, wird die Pulshöhe des Clusters zu groß, da nur positive Anteile des Rauschens berücksichtigt werden.

Die Schwellen sind abhängig von der Auslese-Elektronik, und unterscheiden sich für die alten Detektormodule mit dem MX-3 und die neuen Module mit dem rauscharmen Triplex-Chip. Während der Datennahme wird nur T_{sum} überprüft und betrug beim Detektor B114 5,0. Bei der anschließenden Analyse galt dann $T_{sum} = 5,5$ und $T_{st} = 3,0$.

Wenn die Streifen des Clusters bekannt sind, so gilt für diesen:

$$PH_{Cl} = \sum_i PH_i$$

$$SN_{Cl} = \sum_i SN_i$$

$$Noi_{Cl} = \frac{PH_{Cl}}{SN_{Cl}}$$

Es wird hier die Summe des SN der einzelnen Streifen als SN des Cluster genommen. So kann eine Normierung auf die Anzahl der Streifen entfallen. Das Rauschen ergibt sich als gewichtetes Mittel der Streifen, wobei die Pulshöhe der Wichtungsfaktor ist.

Kapitel 6

Die entwickelten Meßprogramme

Alle Programme wurden mit LabVIEW 3.0¹ auf dem Macintosh entwickelt. Grundlage für die von uns entwickelten Programme zur Detektor Auslese, war ein Listing in einer PASCAL ähnlichen Sprache, die den Code im Digitalen-Signal-Prozessor (DSP) auf dem FastBUS-SIROCCO wiedergibt. Dieser Code wurde in C übersetzt, da die Einbindung von C-Programmen in LabVIEW am besten dokumentiert ist. In Hinblick auf das Eingabefenster, das einem Meßinstrument nachempfunden ist, heißen die Teilprogramme hier *Virtuelles Instrument*, die ich im folgenden kurz als VI bezeichne.

Die Art der Programmierung in LabVIEW weicht deutlich von der in den Hochsprachen ab. Durch die graphische Oberfläche entstehen schnell umfangreiche Programme, und es ist einfach, Programme anderer zu überschauen. Ein- und Ausgaben sind sehr einfach zu programmieren, und trotzdem sehr komfortabel. Durch die Anordnung der Symbole, ist die Ausführung festgelegt, so daß eine Optimierung teilweise unmöglich ist. Daher ist die Ausführungsgeschwindigkeit langsamer, als bei einem Hochsprachen-Programm. Durch die Möglichkeit, Hochsprachen-Funktionen einzubinden, lassen sich die Vorteile beider Varianten verbinden.

Für die Benutzung des VME-Crates standen einige VIs zur Verfügung, die am CERN oder bei CES² entwickelt wurden. Eine Beschreibung findet sich in [3].

Die entwickelten Programme lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Zu der ersten Gruppe gehören die Programme, die zum Test der Hardware (Detektor, Repeaterkarte, Treiberkarte und VFLAM) benutzt werden. Als Ausgabe sind hier nur die ADC-Counts vorgesehen, die graphisch angezeigt werden. Zusätzlich können die ADC-Counts in einer Textdatei abgelegt werden. Die zweite Gruppe umfaßt die Detektor-Meßprogramme. Mit dem richtig eingestellten Timing, wird hier der fertige Detektor analysiert. Neben einem Modus mit graphischer Ausgabe von allen Chip- und Streifen-daten, kann hier der Test mit der γ -Quelle durchgeführt werden. Als letztes ist eine Sammlung von einzelnen Programmen entstanden, die spezielle Untersuchungen, an dem uns zur Verfügung stehenden Detektor, ermöglichten. Diese Messungen werden ab

¹LabVIEW ist eine graphische Programmieroberfläche. Statt das Programm durch schreiben eines Codes zu entwickeln, werden hier Symbole plaziert und mit „Leitungen“ verbunden.

²CES: Creative Electronic Systems

Seite 68 beschrieben. Da diese Messungen nicht zu dem Standardtest jedes Detektors gehören, sind sie nicht in eine der beiden Oberflächen der anderen Gruppen integriert.

6.1 VME Initialisierung

Um die Karten im VME-Rahmen benutzen zu können, muß zuerst der Controller im Performa 600 initialisiert werden. Dieses geschieht bei allen Haupt-VIs, die das VME nutzen, automatisch durch den Aufruf des VIs **VME.Load.PD** [3]. Hiermit wird der Steuerkarte mitgeteilt, wie aus der 32-Bit-Adresse des Rechners, die Adressen und Steuersignale des VME-Busses erzeugt werden sollen. Der Aufruf dieses VIs muß nur verändert werden, wenn Änderungen an der Adresskodierung der Karten vorgenommen werden.

ChangeGlobals.vi

Abbildung 6.1: Frontplatte des VIs ChangeGlobals.vi

Die Adressen der einzelnen Register auf den beiden Karten werden in globalen Variablen abgelegt, so daß sie in allen VIs zur Verfügung stehen. Die Frontplatte ist in Abbildung 6.1 wiedergegeben. Oben erfolgt die Eingabe der Adressen der Register, als hexadezimale Zahl. Die obere Reihe sind Register auf der Treiberkarte, und werden die Adressen für den SIROCCO³ festgelegt. In **VME Crate Address** steht die benutze

³Hier steht SIROCCO synonym für VFLAM

Seite des Pagedescriptors (C) und die Cratenummer (0).

Mit den Eingaben **logic of RAM x** wird festgelegt, ob ein Signal High-aktiv oder LOW-aktiv ist. Bei einer 1 ist es High-aktiv: Das Signal ist anfänglich 0 und geht für die eingestellte Zeit auf 1. Die Zeitpunkte der Flanken werden auf der Frontplatte des nächsten VIs festgelegt. **SI Position** bestimmt, mit dem wievielten Φ -Takt, das SI generiert wird. Dementsprechend werden auf dem SIROCCO einige **CVRT**-Signale nicht beachtet, deren Anzahl durch **Skip Clocks** festgelegt wird. Unterschiede in den Signallaufzeiten erfordern unterschiedliche Werte von **SI Position** und **Skip Clocks**.

Nach drücken des Return-Tasters werden die Werte des Frontpanels übernommen und die Kontrolle an das aufrufende VI übergeben.

Write-VME.vi

The front panel of the Write-VME.vi VI is divided into several sections:

- Signal edges RAM 1:** A table with 8 columns (Reset, S1, S2, Test, Window, S2_p, Power, free) and 2 rows of numerical values.
- Signal edges RAM 2:** A table with 6 columns (φ1, φ2, cvrt, S1, free, free) and 2 rows of numerical values.
- Control Parameters:** Four groups of controls at the bottom: Lemo Mode (Disabled), Internal Clock (Disabled), Number of φ-clocks (1280), and DAC value (×900).
- Store Button:** A blue button in the top right corner.

Reset	S1	S2	Test	Window	S2_p	Power	free
2.000	1.000	1.000	3.500	4.100	1.000	0.000	0.500
8.000	4.000	6.000	9.000	4.300	3.500	0.000	1.000

φ1	φ2	cvrt	S1	free	free
200	100	800	0	0	0
300	110	900	350	0	0

Lemo Mode	Internal Clock	Number of φ-clocks	DAC value
Disabled	Disabled	1280	×900

Abbildung 6.2: Frontplatte des VIs Write-VME.vi

Nachdem in den globalen Variablen gültige Werte stehen, können die beiden Karten programmiert werden. Durch die Programmierung wird festgelegt, welche, wieviele und zu welchen Zeiten Signale erzeugt werden.

In den oberen Zeilen können die Zeitpunkte der Flanken, für die Signale von RAM 1 und 2, gewählt werden. So kann das Timing auf den Auslesechips individuell eingestellt werden. Unten sind noch 4 weitere Eingaben. **LEMO-Mode** bestimmt, zu welchem Zweck der LEMO-Eingang des VFLAM verwendet wird. Standardmäßig wird der Eingang nicht verwendet. Mögliche Optionen sind: Takt, Start- oder Stoppsignal für die Wandlung. **Internal Clock** bestimmt, ob der Takt des VME-Busses für die AD-Wandlung benutzt wird (16 MHz). Wahlweise kann auch ein externer Takt benutzt werden, der von der Treiberkarte (das CVRT-Signal) oder dem LEMO-Eingang kommen kann. Mit **Number of φ-clocks** wird die Anzahl der auszulesenden Streifen eingestellt. Als Auswahl stehen nur Vielfache von 128 zur Verfügung, da alle Auslesechips 128 Kanäle haben. **DAC value** legt fest, welche Spannung zum Analogeingang addiert wird, bevor die AD-Wandlung erfolgt. So kann die Grundlinie verschoben werden, damit möglichst viele Streifen im dynamischen Bereich des ADCs liegen. Ein höherer Wert addiert eine kleinere Spannung. (Die FastBUS-Version⁴ des SIROCCO erlaubt einen individuellen Offset für jeden Streifen.) Durch das Drücken der Store-Taste wer-

⁴FastBUS ist eine schnellere Alternative zum VME-Bus

den die Register der Treiberkarte und des VFLAMs, sowie die beidem RAMs auf der Treiberkarte programmiert und die Kontrolle kehrt an das aufrufende Vi zurück.

6.2 Hardware-Test

Mit dem Aufruf von **0c_start_test_readout.vi**, siehe Abbildung 6.3, stehen die einzelnen Unterprogramme zur Verfügung. Durch Drücken der Taster werden **Change-Globals.vi** und **Write-VME.vi** aufgerufen. Danach kann eine Testroutinen in der Auswahlbox gewählt werden. Durch den unteren Taster wird das entsprechende VI für diesen Test aufgerufen.

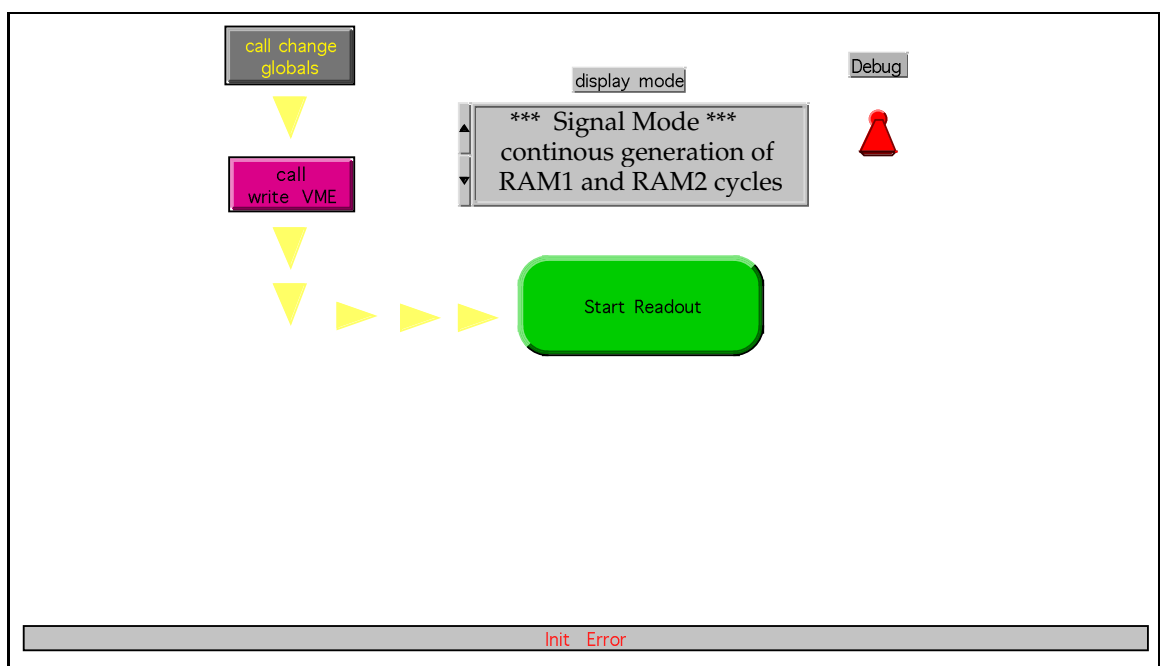


Abbildung 6.3: Frontplatte des VIs 0c_start_test_readout.vi

Die Test-VIs sind:

1. *Signalerzeugung*: Es werden nur die Signale der Datennahme und der Auslese erzeugt. Über zwei Taster lassen sich die Signale *Starten* und *Stoppen*. Da keine graphische Ausgabe erfolgt, erscheinen die Signale mit hoher Frequenz, die eine Beobachtung der Hardware mit einem Oszilloskop ermöglichen. Der Speicher auf der ADC-Karte wird nicht ausgelesen.
2. *Auslese*: Hier wird der Detektor ständig ausgelesen, und die ADC-Counts werden graphisch dargestellt. Der Bereich, der in x- und y-Richtung dargestellt werden soll, kann über zusätzliche Eingaben bestimmt werden. Eine Taste erlaubt es, die Auslese zu unterbrechen. Die Anzahl der Events wird mitgezählt und laufend angezeigt.

3. *Testpuls–Auslese*: Auf dem Bildschirm erfolgt die graphische Ausgabe der ADC–Counts. Über Schalter lassen sich die 4 Testpulse einzeln aktivieren. Bei jedem Event ist höchstens eine *Cal*–Leitung aktiv. *Cal*₀ kann für alle Events aktiviert werden, welche ohne Rest durch 4 teilbar sind. Entsprechend werden die anderen *Cal*_{*x*}–Leitungen nur aktiviert, wenn der Rest der Division gleich *x* ist. Die weitere Bedeutung der Testpulse ist im Abschnitt 6.4 beschrieben. Dort wird ein VI vorgestellt, daß die Daten der Testpulse mittelt und in eine Datei schreibt.
4. *Auslese in eine Datei*: Der Ablauf ist wie bei 2, jedoch wird am Anfang nach einer Datei gefragt. In dieser Datei werden die ADC–Counts, der angezeigten Streifen, als Text abgelegt. In jeder Zeile dieser Datei steht die Streifennummer und dessen ADC–Wert:

```

0 780
1 598
2 582
3 468
4 465
5 492
6 516

```

Die Auswahl der angezeigten Streifen erfolgt, wie in 2 über zwei Eingaben.

Diese VIs sind eine Art spezielles Oszilloskop für die Untersuchung der Hardware. Es werden die notwendigen Signale zur Verfügung gestellt, so daß ein Probetrieb des Detektors (oder der Auslesechips) möglich ist. Um die, für die Verwendbarkeit im Experiment, notwendigen Parameter zu bestimmen, sind die VIs im nächsten Kapitel notwendig.

6.3 Die Programme zur Detektoruntersuchung

Das Programm, das geladen werden muß, um alle weiteren Unterprogramme nutzen zu können, heißt **0aTestMain.vi**. Die Frontplatte ist in Abbildung 6.4 wiedergegeben. Nachdem das VI gestartet wurde, muß der Name des Detektors angegeben werden. So können einige signifikante Daten, für jeden Detektor separat gespeichert und wieder geladen werden. Danach müssen Treiberkarte und VFLAM initialisiert werden, bevor der Detektor untersucht werden kann. Hier gibt es zum einen die Möglichkeit, Standardwerte zur Initialisierung zu benutzen. Bei Bedarf können die Werte auf den Frontplatten der beiden Initialisierung–VIs angepaßt werden, bevor mit Tests begonnen wird.

Bei vielen der Tests sind nicht die ADC–Counts wichtig, sondern nur die Pulshöhe. Daher werden Pedestal und Rauschen so gespeichert, daß sie allen TestVIs zur Verfügung stehen. Die Berechnung von Startwerten für Pedestal und Rauschen wird deshalb auf der Hauptebene gesteuert. Die Initialisierung der Schrittmotorsteuerung

ist vorgesehen, aber nicht vorhanden, da keiner der Test die Motoren benutzt. Durch den Knopf **Start Tests** gelangt man zu einem Menü, indem man die Testart wählen kann.

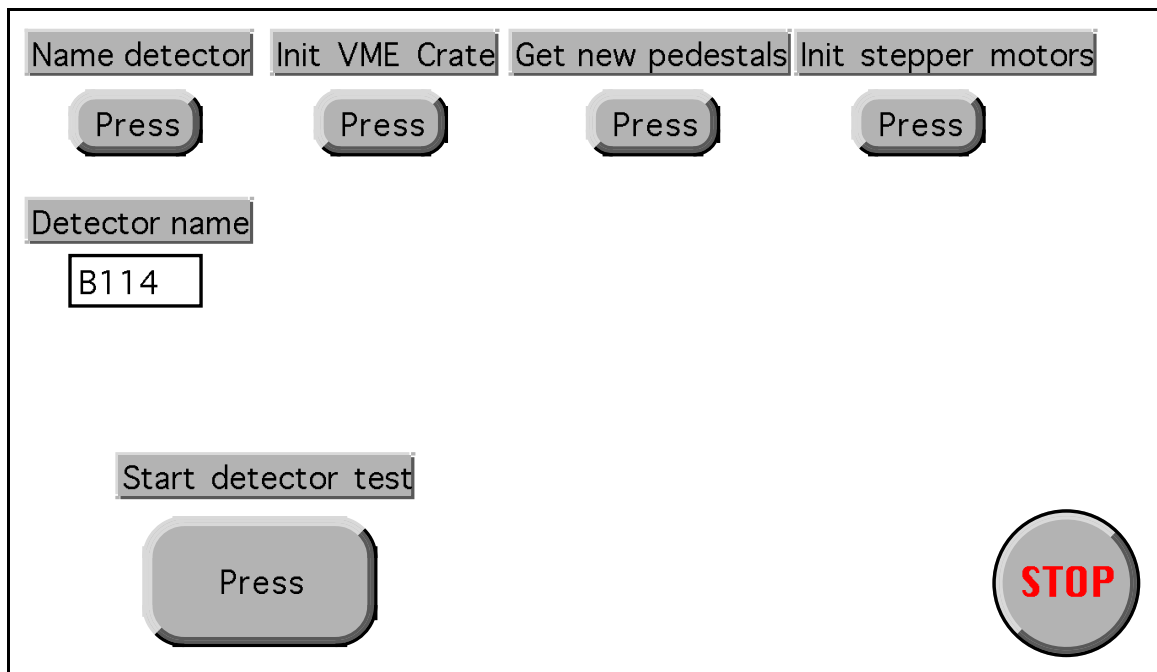


Abbildung 6.4: Frontplatte des VIs *0aTestMain.vi*. Um die Daten leicht dem Detektor zuordnen zu können, muß der Detektor benannt werden. Die Initialisierung des VME-Crate kann mit Standardwerten erfolgen, oder durch Aufruf der beiden VIs. Die Initialisierung der Pedestals ist separat, da nach einer Veränderung an dem Setup die Einstellung des VMEs trotzdem gültig bleibt. Die Schrittmotoren finden noch keine Verwendung, so daß dessen Controller nicht initialisiert werden muß. Durch Drücken des Start-Tasters erhält man ein Menü mit den einzelnen Testarten.

1. **Convert Scan:** Dieser Test gehört zur Timing-Einstellung. Da das Programm aber sehr ähnlich zu den Messungen ist, habe ich es hier plazierte. Es werden alle möglichen Zeiten eingestellt, zu denen das Signal am Analogeingang des VFLAM umgewandelt wird. Bei jedem Wert werden eine einstellbare Anzahl von Events genommen und jeweils das Average Noise der Chips bestimmt. Der Mittelwert aller Events wird über dem Abtastzeitpunkt aufgetragen. Das Ergebnis einer Messung an dem Detektor B114 ist in Abbildung 6.5 wiedergegeben. Beim MX-3-Chip (B114) sieht man gut, zu welcher Zeit die Analogleitungen offen sind. Außer dieser Zeit von $-\mu s$ kann überall abgetastet werden. Beim Triplex ist das Timing sehr kritisch. Die Benutzung der Verzögerungsleitungen auf der Treiberkarte, um das Signal CVRT genauer zu positionieren, bewirkt eine starke Erhöhung des Rauschens. [24]

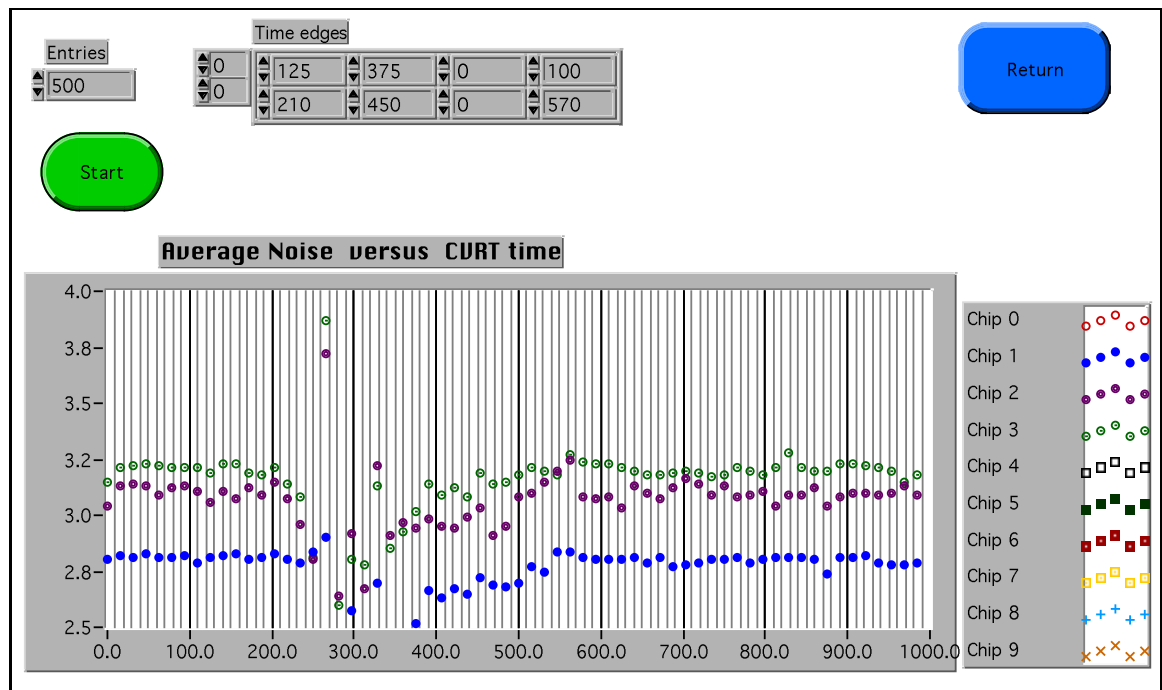


Abbildung 6.5: Beispiel einer Convert-Scan-Messung für den Detektoren B114. Der Bereich von $200\mu\text{s}$ bis $550\mu\text{s}$ sollte nicht für das CVRT-Signal verwendet werden. Zu dieser Zeit ist der Eingang des ADC offen, da der eine Kanal nicht mehr, und der folgende noch nicht, mit den Ausgängen verbunden ist. In der restlichen Zeit gibt es keinen bevorzugten Bereich und der Zeitpunkt kann frei gewählt werden.

2. **Free Running:** Es erscheint zunächst ein Dialog in dem man wählen kann, welche Größen während der Messung angezeigt werden sollen. Dabei ist zwischen Streifen- und Chipgrößen unterschieden. Die ausgewählten Werte werden dann auf je einem Display für Chip- und Streifendaten angezeigt. Die Daten werden intern als Festkommazahlen, mit 5 Nachkommastellen, gespeichert und in diesem Format angezeigt.
3. **Testpulse Mode:** Der Test dient der Verstärkungsbestimmung der einzelnen Streifen. Es wird eine Spannung an die Kalibriereingänge gelegt, aus der die relative Verstärkung der einzelnen Kanäle bestimmt werden kann. Über Schalter können die 4 Testpulse einzeln zugeschaltet werden, wobei jeder nur einmal in 4 Events aktiv ist.
4. **^{241}Am Mode:** Hier wird der Detektor mit der ^{241}Am -Quelle getestet. Auf der Frontplatte kann die Anzahl der gewünschten Events, der Bereich von Streifen – bis Streifen eingestellt werden. Nach dem Starten wird man nach der Datei gefragt, in die die komprimierten Daten geschrieben werden. Während der Messung wird nur die Nummer des letzten Events und die Anzahl der gefundenen Clusters angezeigt, um die Ausführungsgeschwindigkeit zu erhöhen.

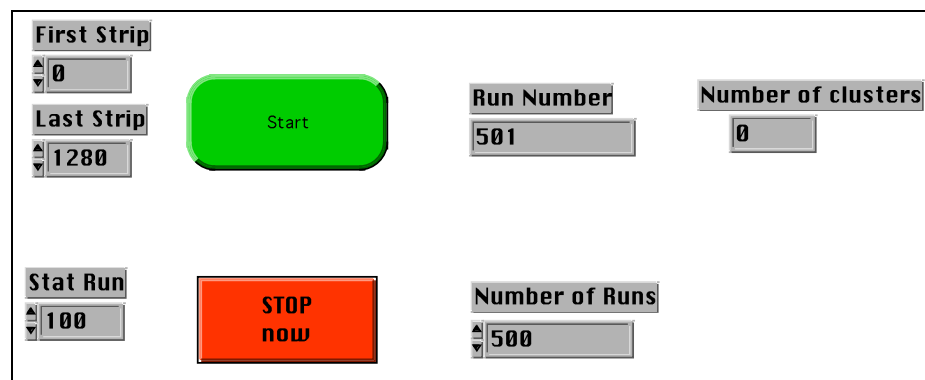


Abbildung 6.6: Frontplatte des VIs Am241Test.vi. Die Suche nach Treffern erfolgt nur im Intervall der Streifen von First Strip $\leq St_{No} < \text{Last Strip}$. Zur schnelleren Ausführung kann gewählt werden, jedes wievielte Event die statistischen Daten gespeichert werden. Die Zahl der Event kann mit der Eingabe **Number of Runs** gewählt werden. Nach dem Starten wird nach der Sicherungsdatei gefragt. Durch **Stop Now** kann die Messung jederzeit abgebrochen werden.

Die Daten werden komprimiert in einer Datei gespeichert. Bevor sie analysiert werden können, müssen sie ausgepackt werden. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten. Auf diese gehe ich in 6.5 ein. Die Clustersuche fällt hier noch rudimentär aus. Das einzige Kriterium, das überprüft wird, ist, der Signal-zu-Rauschabstand zweier benachbarter Streifen. Wird eine Schwelle überschritten, werden vom Streifen mit der maximalen Pulshöhe zu beiden Seiten je 3 Streifen mit gespeichert.

5. **Laserscan (1d)**: Dieses ist ein Dummy-VI, welches zu Integration des Lasertestes dient. Die Integration ist noch nicht geschehen.
6. **Laserscan (2d)**: Hier gilt das gleiche wie bei Laserscan (1d).

Ich habe diesem Paket noch ein Extractprogramm hinzugefügt, daß die gleichen Aufgaben hat, wie das Programm **Extract** 6.5. Der einzige Unterschied ist, daß es in LabVIEW integriert ist. Das Auspacken ist rechenintensiv, so daß die Verarbeitungszeit auf dem Performa 600 groß wird. Das Programm *LabExtract.vi* ist gedacht, um kleine Datenmengen zu entpacken und bestimmte Ergebnisse online sehen zu können. Der Aufruf sollte nur selten erfolgen. (Ein Zeitvergleich findet sich bei 6.5)

6.4 VI TestPulse2.vi

Im TestpulseMode des vorherigen Programmes, werden diese nur erzeugt und die ADC-Counts graphisch dargestellt. Für die alten Detektoren war dieses auch ausreichend. Für den Triplexchip erfolgt aber eine Eichung der ADC-Counts, so daß eine weitere

Auswertung der ADC-Counts notwendig ist. Wie beim Test mit der γ -Quelle muß ich die Pulshöhe berechnen und für jeden Treffer speichern. Die Berechnung der Pedestals ist hier aber sehr viel einfacher, da ich genau weiß, wann ich einen *Treffer* habe. Alle anderen Signale sind Rauschen. Den Common Mode habe ich allerdings nicht berücksichtigt. Die Pulshöhe mit Testpuls wird für jeden Kanal gemittelt auf dem Monitor angezeigt, und am Ende in einer Textdatei abgespeichert.

Um die Verstärkung der Kanäle der Auslesechips bestimmen zu können, sind 4 Leitungen für Testpulse vorgesehen. Diese sind mit jeweils jedem vierten Eingang über einen Kondensator verbunden. Bei der Herstellung von Detektormodulen ist dieses der erste Test, um defekte Auslesechips zu erkennen. Außerdem kann so die Verstärkung der einzelnen Kanäle in Elektronen pro ADC-Count geeicht werden. Wichtig hierfür ist die Ladung, die auf den Kalibrier-Kondensator gebracht wird. Die Spannung an einem Kondensator hat folgenden Verlauf beim Laden:

$$U_{Cal} = U_0 \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right) \quad (6.1)$$

Hierbei ist $\tau = RC$ die Ladekonstante und U_0 die Spannung des Rechteckimpulses, der an die Kalibrierleitung gelegt wird. Die Zahl der Ladungen auf dem Kondensator ist gegeben durch:

$$N_{e-} = \frac{Q_{Cal}}{e} = \frac{C_{Cal}U}{e} \quad (6.2)$$

Der Widerstand R ist die Impedanz der Kabel, Zuleitungen, Steckverbindungen und kann Werte bis zu 100 k Ω annehmen. Wenn die Dauer des Testpulses lang ist, im Vergleich zur Ladekonstanten, dann gilt $U_{Cal} \approx U_0$. Dieses ist beim Triplexchip gegeben, bei dem der Kalibrierkondensator die Kapazität $C_{Cal} = 15$ fF hat. Beim MX-3-Chip hingegen ist $C_{Cal} = 192$ fF und man kann die Ladekurve beobachten. Durch mehrere Messungen muß deshalb $\tau = RC$ bestimmt werden, damit aus U_0 die Zahl der Ladungen berechnet werden kann.

6.5 Das Dekomprimierprogramm EXTRACT

Die von Ameritiumtest gespeicherten Daten sind gepackt abgelegt. Die Binärdaten müssen zur Verarbeitung mit einem Analyseprogramm in eine Textdatei geschrieben werden. Die Daten der Gruppen von Streifen werden dekomprimiert. Hier erfolgt die Überprüfung der Cluster, nach den Maßgaben aus 5.6. Von jedem Cluster werden PH, SN, Noise, Size, Event und Streifen in einer Zeile der Textdatei abgelegt. Über eine Initialisierungsdatei können die Schwellen festgelegt werden.

Da das Suchen der Cluster und das Extrahieren viel Zeit benötigt, ist geschieht es nach der eigentlichen Messung. Durch die kürzere Meßdauer wird die Effektivität der Auslesesoftware erhöht. Um eine aussagekräftige Analyse zu ermöglichen sind etwa 30-70 Tausend Cluster notwendig. Bei der Effektivität der Software von $\approx 1 \cdot 10^{-4}$ ergibt sich hiermit eine Dosis von 0,2 bis 0,5 $\frac{\text{krad}}{\text{h}}$.

Das Extrahierprogramm steht sowohl auf dem Macintosh, als auch auf dem PC zur Verfügung. Die Auswertung erfolgt auf einem PC, mit einer DOS-Version von PAW⁵. Für den Macintosh war kein geeignetes Statistikprogramm vorhanden, mit dem die großen Datenmengen erfaßt werden konnten. In der Tabelle 6.1 habe ich die Dauer des Extrahierens auf verschiedenen Plattformen aufgetragen. Die Dateien, mit denen ich den Vergleich gemacht habe, enthielten 10k oder 15k Events. Die Anzahl der Cluster ist unterschiedlich, da ich den Abstand der Quelle vergrößert habe. Der Sourcecode ist für

	486 DX 33 OS/2 V2.11	Quadra 700 MacOS V 7.	Performa 600 MacOS V 7.0.1
B114R120	0:13,23	0:29,18	1:35,70
B114R122	0:18,70	0:41,30	2:14,93
B114R124	0:16,82	0:37,35	2:01,82
B114R126	0:14,25	0:31,40	1:43,63
B114R128	0:11,40	0:25,93	1:25,13

Tabelle 6.1: Vergleich der Extrahierdauer

EX4.EXE und Ex4.app gleich. Auf dem PC wurde die C-Datei mit GNU-C++ (2.5.8) compiliert, auf dem Mac mit Symantek's Think C++ 6.0, jeweils ohne Optimierung⁶

Eine Version des Extrahierens über ein VI in LabView 3.0 erwies sich als unpraktikabel, da die Rechengeschwindigkeit unter LabView 3.0 zulänglich ist. Bei der Einbindung von C-Programmen wird ein Interface für Dateizugriffe und mathematische Funktionen genutzt, weshalb diese Variante auch zu langsam ist: Die Daten eines Runs mit 10.000 Events waren nach 1,5 Stunden noch nicht entpackt!

⁵PAW: Physic Analysis Workstation

⁶Optimierungen habe ich abgeschaltet, um eine gleiche Prozessierung der Daten sicherzustellen.

Kapitel 7

Ergebnisse und Ausblick

7.1 Test der Detektoren auf ihre Verwendbarkeit

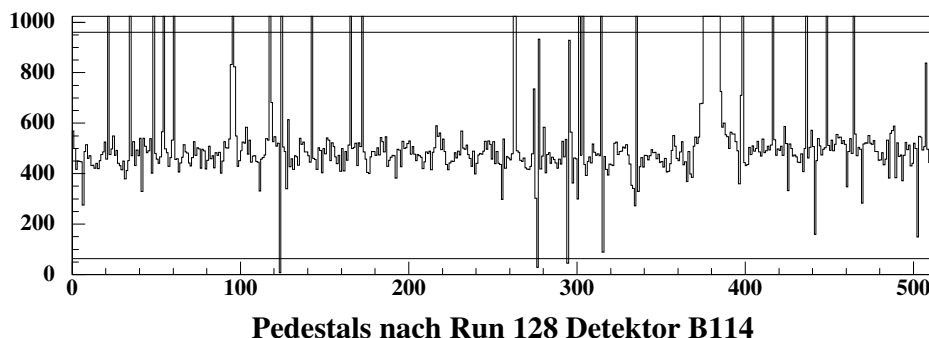
Die Bedingungen, die ein Detektor erfüllen muß, um im Experiment eingesetzt zu werden sind:

1. Das Pedestal darf nicht zu dicht am Rand des dynamischen Bereichs liegen. Andernfalls kommt der ADC durch den Common Mode und/oder einen Treffer in den Überlauf.
2. Das Rauschen darf nicht größer als eine vorgegebene Schwelle sein, die von der Art der Wafer und dem Auslesechip abhängt. Für den MX-3 sind dieses 1,0 nach unten und 10,0 nach oben. Für den Triplexchip liegen beide Schwellen tiefer.
3. Der Signal-zu-Rauschabstand muß größer als eine Schwelle sein, um eine verbesserte Ortsauflösung, über die Bestimmung des Ladungsschwerpunktes, zu erhalten.

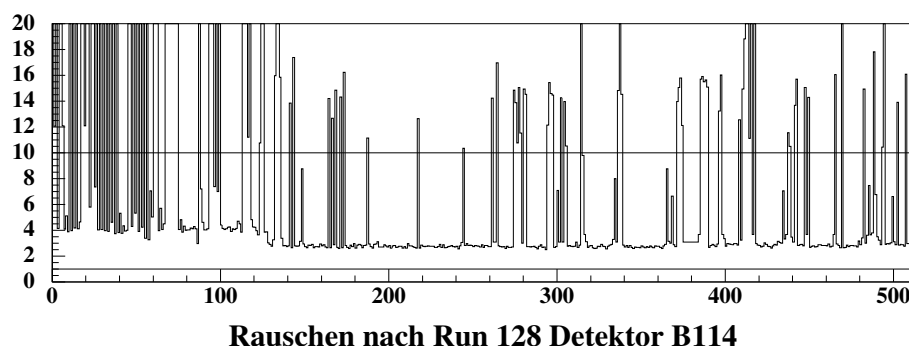
Die Anzahl der defekten Streifen, wobei hier auch fehlerhafte Bondings mitgezählt werden, darf eine vorgegebene Schwelle nicht überschreiten, wenn der Detektor im Experiment eingesetzt werden soll. Bei guten Wafern liegt diese Schwelle bei $\approx 1\%$.

Der erste Test eines Detektors, ist die Datennahme ohne eine Signalquelle (Laser oder radioaktives Präparat). Ein Run von einigen Hundert Events zeigt gut das Pedestal und das Rauschen der einzelnen Streifen. Für den Detektor B114 habe ich beides in der Abbildung 7.1 graphisch dargestellt. Die Streifen, deren Pedestal außerhalb der beiden horizontalen Linien liegt, haben sehr wahrscheinlich einen Pin Hole. Ein Vergleich, mit dem Datenblatt des Detektors vom CERN, bestätigt dieses. Da zu viele Pin Holes vorhanden sind, brachte eine Variation der Biasspannung keine nennenswerte Verbesserung. Ein Vergleich mit Abbildung 5.3 auf Seite 37 zeigt, warum dieses Halbmodul nicht zum Einsatz kam: Es hat zu viele defekte Streifen.

Ein Blick auf die Verteilungen des Common Mode und des Average Noise der 4 Chips von Detektor B114 zeigt noch einmal den Defekt des ersten Chips. Hiervon



Kanäle mit einem Pedestal außerhalb der beiden horizontalen Linien haben einen Pin Hole.



Der erste Chip (Streifen 0 - 127) hat einen Defekt, der sich in sehr starkem Rauschen äußert. Auch die ersten Kanäle des zweiten Chips sind hiervon betroffen.

Abbildung 7.1: Pedestal und Rauschen des Detektors B114 nach 15.000 Events

sind auch die ersten Kanäle des zweiten Chips betroffen. Der Detektor kann nicht im Experiment verwendet werden, so daß weitere Tests überflüssig sind.

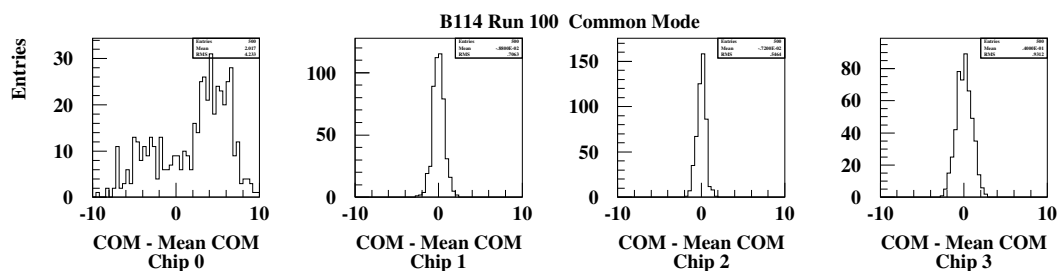


Abbildung 7.2: Common Mode der 4 Chips des Detektors B114. In den Histogrammen ist der Abstand des Common Modes eines Chips vom Mittelwert aller Chips aufgetragen. Eine große Breite der Verteilung deutet auf einen schlechten Auslesechip hin.

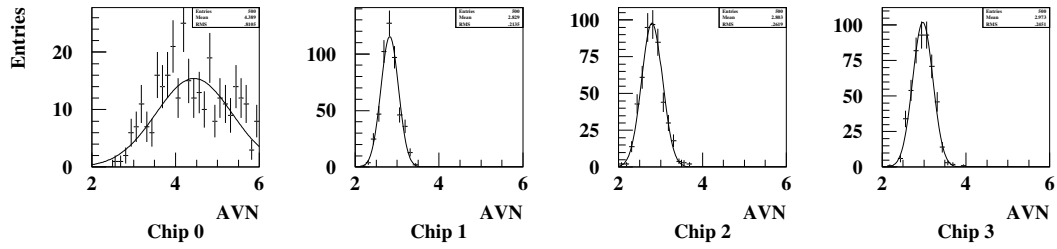


Abbildung 7.3: Average Noise der 4 Chips des Detektors B114. Neben der Breite der Verteilung, zeigen hier die hohen Werte für das *Average Noise*, daß Chip 0 defekt ist.

Hat der Detektor diesen ersten Test überstanden, so folgt als nächstes eine Überprüfung der Bondings. Hierfür wird ein Laser eingesetzt, da dieser über geeignete Optik, sehr genau positioniert werden kann. Da der Ort des Treffers vorher bekannt ist, sind Aussagen über fehlerhafte Bondings oder den Ort von Fehlern möglich. Hat man Fehler beim Bonding gefunden, so können einige repariert werden[22].

Nur wenn der Detektor auch diesen Test erfolgreich passiert hat, ist eine Energieeichung sinnvoll. Da uns, bis kurz vor Ende dieser Arbeit, nur dieses eine Halbmodul zur Verfügung stand, haben wir die weiteren Test trotzdem an dem Detektor B114 durchgeführt. Das (Halb-)Modul T27 war noch nicht vollständig, so daß nur ein Teil der Test aussagekräftig war. Um die Energieeichung eines Detektors auszuführen, müssen die Verteilungen von PH und SN bekannt sein.

7.2 Der Silizium–Streifen–Detektor als Kalorimeter

Durch die kleine Energie, die notwendig ist, um ein Elektron–Loch–Paar zu erzeugen, eignen sich Si-Detektor auch zur Verwendung als Kalorimeter. Dieses war der Anfang der Si-Detektoren–Entwicklung. Hierfür sind größere sensitive Dicken notwendig, als sie der Vertexdetektor hat, damit die Teilchen gestoppt werden und ihre gesamte Energie im Detektor deponieren. In unseren Modulen werden nicht alle Teilchensorten gestoppt, so daß nur ein Teil der Energie deponiert wird. Für schnelle Teilchen, die bei Hochenergie–Physik–Experimenten erzeugt werden, kann dann die spezifische Energie-deposition $\frac{dE}{dx}$ festgestellt werden. Mit der ^{241}Am –Quelle erhalte ich nur Photonen. Bei deren Energie ist die Comptonkante nicht zu sehen, so daß nur der Photoeffekt bleibt. In diesem Spezialfall wird die gesamte Energie nachgewiesen.

Energiespektrum der Photonen aus dem Zerfall von ^{241}Am

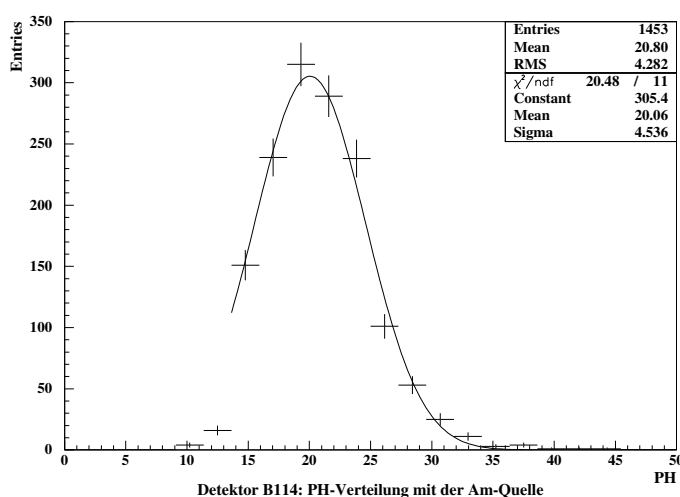


Abbildung 7.4: Spektrum der ^{241}Am –Quelle mit dem Detektor B114. Das hohe Rauschen des MX–3 überdeckt einen großen Teil des Spektrums, der mit dem Triplexchip erfaßt werden kann. Eine Anpassung bestätigt die Gauß’sche Form der Verteilung. Aus der Breite ergibt sich eine Energieauflösung von $\sigma_E = 14 \text{ keV}$

Im sichtbaren Bereich des Spektrums des ^{241}Am liegt nur die Linie mit $E = 60 \text{ keV}$. Da der Comptoneffekt im Rauschen untergeht, sehe ich nur Ladungen, die durch den Photoeffekt erzeugt wurden. Auf diese Art wird die gesamte Energie des Photons deponiert. Die PH und SN sollten somit Gaußverteilungen folgen.

Für den Detektor B114 bestätigt ein Fit die Gaußfunktion, wie es Abbildung 7.4 zeigt. Aus den Parametern der Anpassung, der Breite und der Lage des Peaks, ergibt

sich die Energieauflösung des Detektors zu:

$$\sigma_E = \text{Sigma} \frac{60 \text{ keV}}{\text{Mean}} = \frac{4,55 \cdot 60}{20} \text{ keV} = 14 \text{ keV} \quad (7.1)$$

Das entsprechende Spektrum mit dem Detektor T27 zeigt Abbildung 7.5. Der Peak liegt bei 90 counts und hat eine Breite von 3,87 counts. Neben dem scharfen Peak sind aber noch viele Einträge bei kleineren Pulshöhen. In Abbildung 7.5 sind Cluster

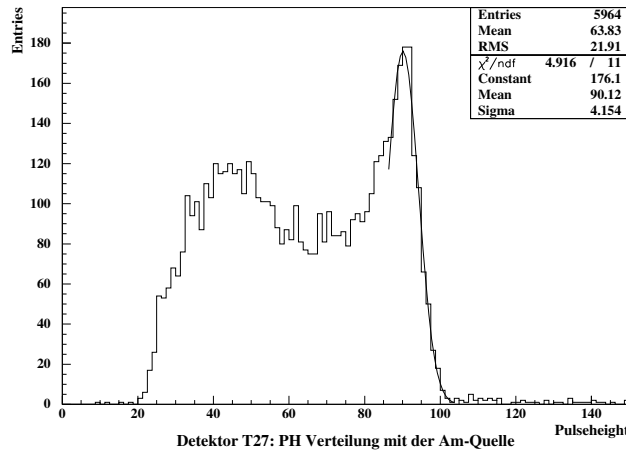


Abbildung 7.5: Spektrum der ^{241}Am -Quelle mit dem Detektor T27. Der Peak der 60 keV-Linie, liegt jetzt bei 90 counts. Der Fit liefert $\sigma_E = 2,6 \text{ keV}$. Der *Schwanz* zu niedrigeren Pulshöhen kommt durch die andere Anordnung der Streifen. Siehe Text und Abbildung 7.7

mit 1 oder 2 Streifen berücksichtigt. Cluster, die aus 2 Streifen bestehen, tragen zum Peak bei ≈ 45 counts bei, 1-streifige Cluster zum zweiten Peak bei 90 counts. Eine Erklärung hierfür ist die Anordnung der Streifen auf dem RZ-320-Wafer. Jeweils in einem Abstand von $50 \mu\text{m}$ folgen 2 Dioden- und 2 Auslestreifen. Alle Ladungen, die in der Nähe der Auslestreifen entstehen, werden in der Elektronik registriert. Im Bereich der Diodenstreifen geht ein Teil der Ladungen verloren, so daß sich der Peak zu geringeren Werten verschiebt, wenn der Treffer zwischen den Auslestreifen erfolgte. Die Abhängigkeit der Anzahl der gemessenen Ladungen sollte sich in der Pulshöhen-summe zeigen. Letztere kann, über einen *Laserscan* wie er in [22] vorgestellt ist, gemessen werden. Es sollte sich der in Abbildung 7.6 skizzierte Verlauf zeigen.

Die erwartete Verteilung mit einer γ -Quelle ist nur dann eine Gaußverteilung, wenn die gemessene Ladung unabhängig vom Ort ist, an dem der Photoeffekt auftritt. Andernfalls ergibt sich die Verteilung der Pulshöhe, indem man Von der Mitte eines Streifens bis zur Mitte zwischen 2 Streifen die Pulshöhen-summe betrachtet. Die Pulshöhen-summe wird auf die y-Achse projiziert. Die entstandene Verteilung ergibt, mit einer

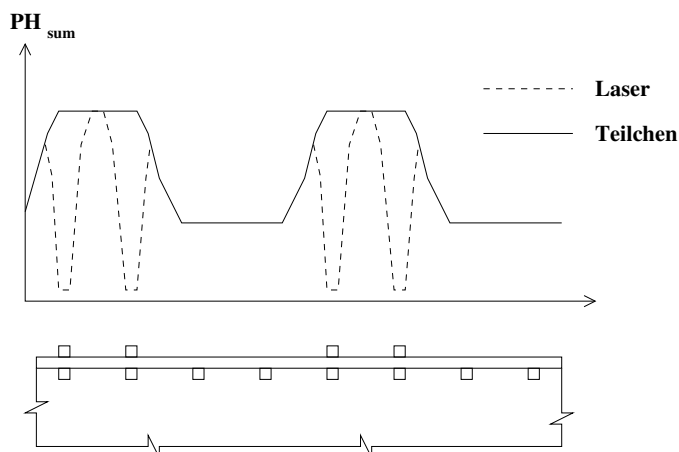


Abbildung 7.6: Erwartete Pulshöhensumme für RZ-320-Wafer. Es ist die Summe der Pulshöhen des Streifens mit maximaler PH und des Nachbarn mit der höheren PH, als Funktion des Ortes senkrecht zu den Streifen aufgetragen. Unter dem Graph ist ein Ausschnitt des Detektors skizziert. Das Licht des Lasers wird von den Aluminiumstreifen reflektiert, so daß die Zahl an Ladungen stark abnimmt (gestrichelt). Mit Teilchen, sollte sich der durchgezogene Verlauf ergeben.

Gaußfunktion gefaltet, die erwartete Verteilung der Pulshöhe. Die Breite der Gaußfunktion ergibt sich durch die Energieauflösung des Detektors und die Verbreiterung der Ladungswolke durch Diffusion während der Drift. Exemplarisch habe ich dieses für 3 Verteilungen der Pulshöhensumme ausgeführt und in Abbildung 7.7 wiedergegeben.

Im Experiment wird der Einfallswinkel der Teilchen nicht unter $\alpha = 45^\circ$ liegen. Die erzeugte Ladung verteilt sich somit auf eine Länge von $300 \mu\text{m} \cdot \tan(\alpha) = 300 \mu\text{m}$ und wird durch die Drift verbreitert. Der Einfluß des Ortes auf die Signalhöhe wird daher kleiner, oder verschwindet bei größeren Einfallswinkeln.

Energiespektrum der Elektronen aus dem Zerfall von ^{90}Sr

Die Elektronen haben im Mittel 1,1 MeV und verhalten sich daher wie MIPs. Es werden im Mittel $25 \cdot 10^3$ Elektron-Loch-Paare erzeugt. Die Verteilung der Pulshöhe ist in der Abbildung 7.8 dargestellt und hat die Form einer Landauverteilung. Der Mittelwert liegt mit 30,4 um einen Faktor $F = 1,47$ höher, als bei der γ -Quelle. Die Messung stimmt gut mit der Erwartung $F = 1,5$ überein (Gleichung 3.21).

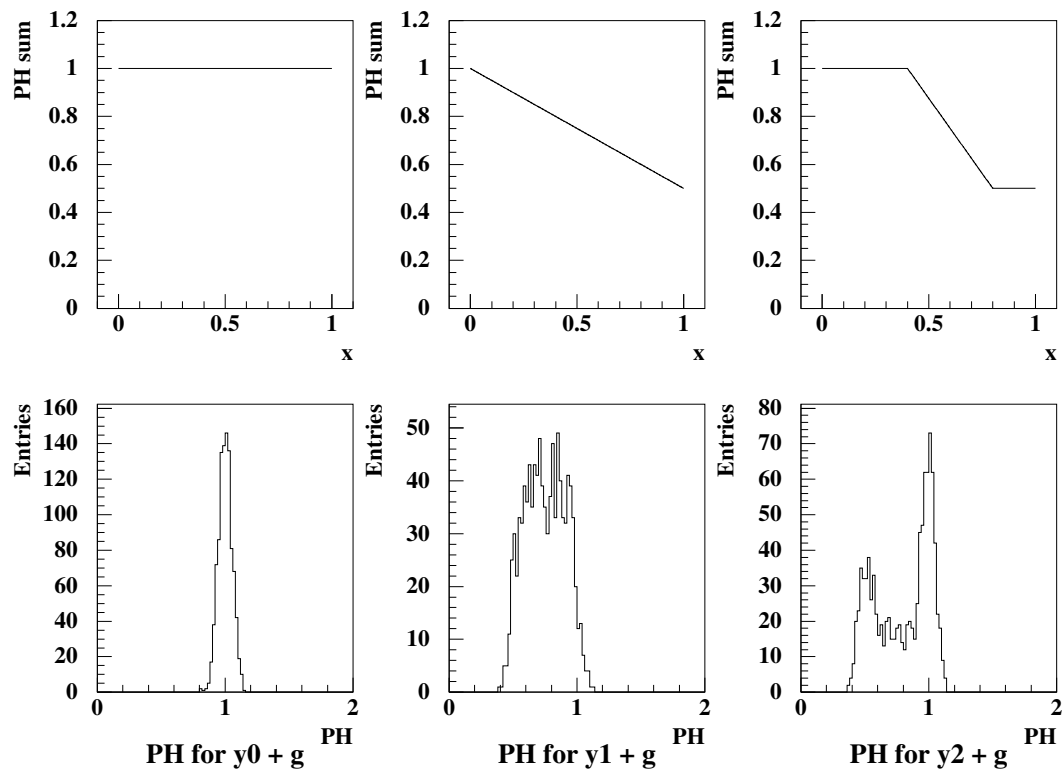


Abbildung 7.7: Erwartete Pulshöhenverteilungen für verschiedene Funktionen der Pulshöhensumme

An 3 Beispielen habe ich die Pulshöhensumme als Funktion des Ortes aufgetragen. x ist die Ortskoordinate, wobei $x = 0$ der Mitte eines Streifens entspricht. Mit $x = 1$ ist die Mitte zwischen 2 Auslesestreifen gekennzeichnet. Die Funktion setzt sich zu beiden Seiten spiegelsymmetrisch fort. Unter jeder Funktion für die Pulshöhensumme ist die zugehörige Verteilung der Pulshöhe gezeigt. Ein Vergleich mit Abbildung 7.5 deutet auf die rechte Version der Ortsabhängigkeit.

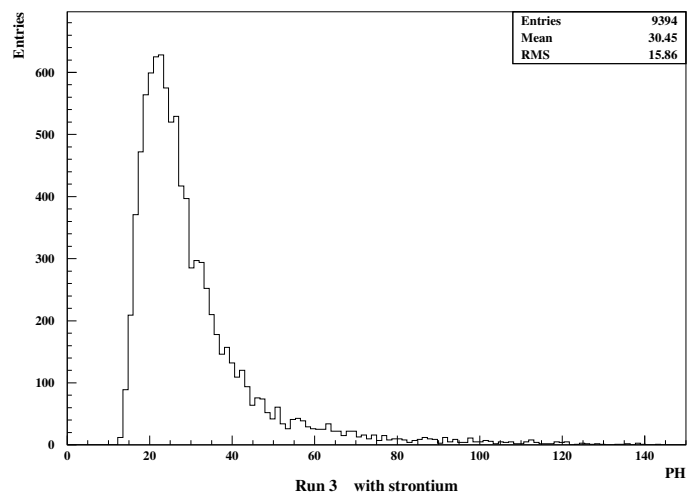


Abbildung 7.8: Spektrum der Strontium-Quelle mit dem Detektor B114. Die Verteilung der Pulshöhe hat, bei Bestrahlung mit Strontium, den Mittelwert 30,4 counts. Dieser ist um den Faktor 1,5 höher, als mit Ameritium. Das Maximum liegt, wie bei einer Landauverteilung üblich, tiefer bei etwa 20 counts.

7.3 Energieeichung von Detektoren

Die Anpassung der Verteilung des Signal-zu-Rauschabstand an eine Gaußfunktion ist nur sinnvoll, wenn eine entsprechende Statistik von jedem Streifen vorhanden ist. Unsere Messungen haben gezeigt, daß für die Energieeichung mindestens 100 Cluster pro Streifen vorhanden sein sollten. Der Mittelwert der angepaßten Gaußfunktion ist die Reaktion des Streifens auf die deponierte Energie von 60 keV.

Für den Detektor B114 habe ich 4 Runs pro Wafer gemacht. Jeder Run umfaßt 50k Events, wobei die Quelle jeweils ein Stück senkrecht zu den Streifen versetzt wurde. Die entstandenen Histogramme zeigen die Anzahl der gefundenen Cluster für jeden Streifen (ID = 8000), den Mittelwert des Signal-zu-Rauschabstands (ID = 5999) und den Mittelwert des Rauschens (ID = 3999) für die gefundenen Cluster. Es wurden hierbei nur die 4 Runs berücksichtigt, bei denen die Quelle über dem hinteren Wafer war.

Schon Histogramm 8000 zeigt, daß der Detektor B114 zu viele schlechte Streifen hat, die entweder keine Reaktion zeigen, oder aber nur eine digitale Spurrekonstruktion zulassen. Der erste Chip zeigt eine starke Variation des Common Modes, der sich in einer Erhöhung des Rauschens auswirkt. Die ersten Kanäle des zweiten Chips werden hiervon auch noch beeinflusst. Durch viele Pin Holes, werden weitere Streifen unbrauchbar, so daß für die Ortsmessung nur etwa 300 von 512 Streifen zur Verfügung stehen.

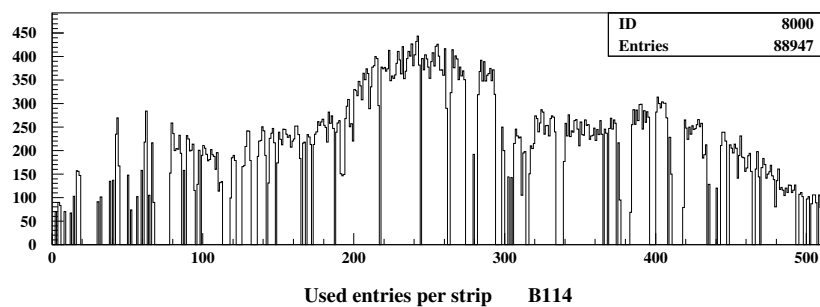


Abbildung 7.9: Position der gefundenen Cluster

Dieses Bild ist die Addition von 4 Runs, die die Form einer Glockenkurve zeigen, wie sie in Abbildung 7.14 a) zu sehen ist

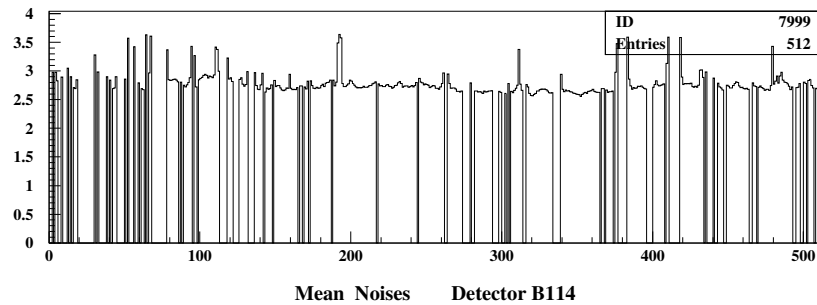


Abbildung 7.10: Höhe des Rauschens der Cluster in ADC-Counts. Cluster wurden nur akzeptiert, wenn das Rauschen innerhalb eines Intervalls lag, welches durch die horizontalen Striche markiert ist. Das Rauschen ist hier der Mittelwert des Rauschens aller Cluster, die diesem Streifen zugeordnet wurden. Dabei kann sich das Rauschen der Streifen für Cluster durchaus vom dem Rauschen des einzelnen Kanals unterscheiden.

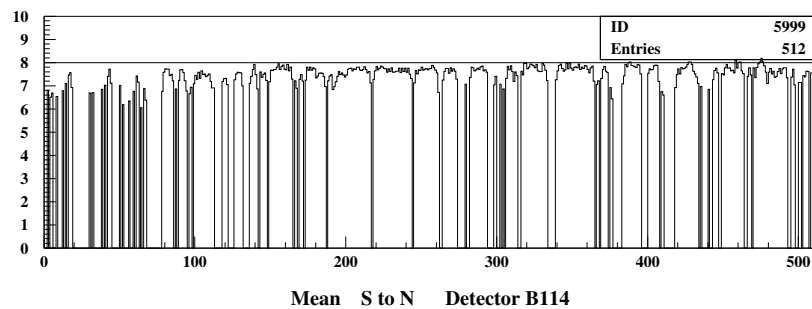


Abbildung 7.11: Signal- zu Rauschabstand für eine Energiedeposition von 60 keV. Zur Bestimmung des SN eines Streifens wird das SN eines Clusters für jeden Streifen getrennt histogrammiert. Der Peak wird an eine Gauß-Funktion angepaßt und der Mittelwert des Gauß ist das SN des Streifens.

Alle Lücken in Abbildung 7.11 sind defekte Streifen.

7.4 Absorptionswahrscheinlichkeit von Photonen

Im Silizium-Wafer werden nicht alle Photonen nachgewiesen, sondern nur ein kleiner Teil, die über den Photoeffekt ein Elektron erzeugen. Ein weiterer Teil wird, durch den Comptoneffekt, in eine andere Richtung gestreut. Eine Abschätzung nach oben liefert der folgende Versuch. Die Quelle wird über einem Szintillator positioniert. Dann legt man, nach und nach, Siliziumwafer auf den Szintillator und mißt jeweils die Zählrate in einem festen Zeitintervall.

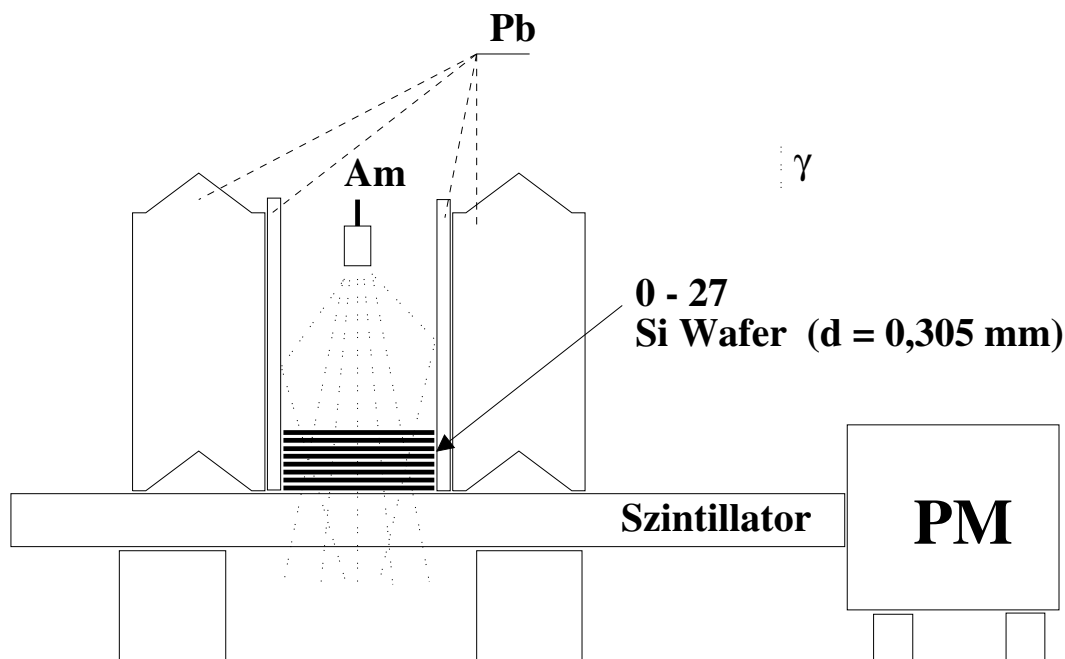


Abbildung 7.12: Versuchsaufbau zur Abschätzung des Absorptionskoeffizientens. Das Blei dient der Abschirmung, so daß nur Photonen, welche die volle Dicke des Siliziums durchdrungen haben, gezählt werden. Die gesamte Anordnung befand sich in einer Kiste. Um den Einfluß von Streulicht zu verringern war alles noch mit schwarzen Stoff abgedeckt.

Die Meßanordnung habe ich in Abbildung 7.12 wiedergegeben. Der Aufbau befand sich in der Aluminiumkiste. Da der Lichtuntergrund, auch bei geschlossener Tür, für den Photomultiplier zu hoch ist, habe ich die Anordnung mit einem schwarzen Tuch abgedeckt. Die Silizium-Wafer waren nicht mehr rund, sondern auf die Maße eines Detektors zurechtgeschnitten. Diese habe ich nacheinander zwischen zwei Bleiplatten auf dem Szintillator gestapelt. Die Zählrate habe ich jeweils nach hinzufügen von einem oder zwei Wafer(n) gezählt (Siehe Tabelle 7.1). Der Abstand der Quelle vom Szintillator betrug 78mm und die Dicke des Szintillators 10mm.

Die Meßwerte aus Tabelle 7.1 habe ich an eine Exponentialfunktion angepaßt:

$$Y_i = \exp(P_1 + P_2 X_i) \quad (7.2)$$

mm(Si)	$\frac{N}{\text{kHz}}$	$\frac{\Delta t}{s}$	mm(Si)	$\frac{N}{\text{kHz}}$	$\frac{\Delta t}{s}$
0,000	747	100	4,270	610	100
0,305	724	100	4,880	592	100
0,610	712	100	5,490	576	100
0,915	702	100	6,100	559	100
1,220	696	100	6,710	542	100
1,830	679	100	7,015	534	100
2,440	662	100	7,320	526	100
3,050	645	100	7,625	517	100
3,660	627	100	∞	0,24	100

Tabelle 7.1: Messung zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten in Silizium. Die Dicke der Wafer beträgt laut Hersteller: $d = (305 \pm 15)\mu\text{m}$

Der Fit lieferte als Parameter:

$$\begin{aligned} P_1 &= 13,6 \\ P_2 &= -0,04533 \frac{1}{\text{mm}} \end{aligned} \quad (7.3)$$

Der Meßwert ohne Wafer ist hierbei nicht berücksichtigt, da an der Oberfläche Reflexion stattfindet. Zwischen den Wafern kann Reflexion vernachlässigt werden.

Mit P_2 aus Gleichung 7.3 erhalte ich mit:

$$A_W = 1 - \exp(P_2 \cdot 0,305\text{mm}) \quad (7.4)$$

die Absorbtiionswahrscheinlichkeit für die Dicke eines Wafers zu:

$$A_W = 1,4\% \quad (7.5)$$

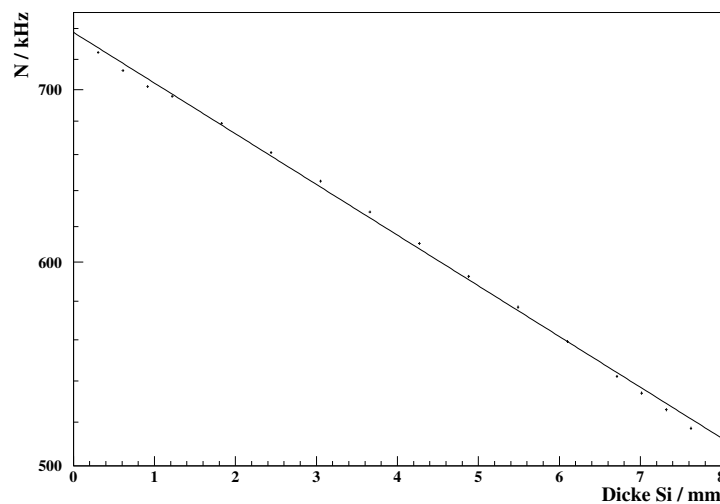


Abbildung 7.13: Zählrate über der Dicke des Siliziums

Der Absorptionskoeffizient A_W hängt nicht nur von der Dicke des Silizium, sondern auch von dessen Orientierung ab. Dieses Resultat ist nur eine Abschätzung, da die Abhängigkeit von der Orientierung nicht bekannt ist, die Quelle aber eine große Apertur hat. Eine mögliche Verbesserung ergibt sich, wenn man die Apertur der Quelle verkleinert, indem man diese auf eine Bleiplatte, über eine dünne Bohrung, stellt. Aus der Abbildung 3.3 ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für den Photoeffekt zu $A_W = 0,94$. Meine Messung stimmt also mit dem Literaturwert, innerhalb der sehr großen Fehler, überein, denn bei meiner Messung trägt auch der Comptoneffekt zur Absorption bei.

7.5 Verteilung der Cluster auf die Streifen

Die ^{241}Am -Quelle kann als punktförmiger Strahler angenommen werden, die in einen Raumwinkel von 2π abstrahlt. Die Absorption hängt, wie im Abschnitt 7.4 angedeutet, auch von der Richtung an, mit der die Strahlung auf den Kristall fällt. Die Dichte der Atome einer Lage sind in den verschiedenen Richtungen des Einkristalls verschieden. Bestimmte Richtungen zeigen Resonanzen im Wirkungsquerschnitt, so daß in diesen Richtungen die Absorption wahrscheinlicher wird.

Der Detektor ist auf einem x-y-z-Tisch montiert. Für eine Reihe von Messungen habe ich die Quelle fest über dem Detektor positioniert, und nur den z-Tisch verfahren. Die erste Motivation für diese Messung war festzustellen, ob ich wirklich die Quelle sehe, oder nur das Rauschen des Detektors oder der Elektronik messe. Letzteres sollte sich nicht ändern, wenn ich den Abstand variiere. Die Meßreihe zeigt eindeutig, daß die Cluster von den Photonen der Quelle stammen. Eine weitere Analyse der Messung ist nicht möglich, da weder die Funktion $A_w(\theta)$ noch die genaue Fertigung der Quelle (Radius und Abstand von der Oberfläche) bekannt ist.

In Abbildung 7.14 ist für jede z-Position die Anzahl der Cluster über dem Streifen aufgetragen. Gut zu erkennen ist, wie sich die Verteilungen verbreitern, wenn der Abstand der Quelle größer ist.

7.6 Variation der Backplanespannung

Die Dicke der Raumladungszone ist, nach Gleichung 3.22, proportional zur Wurzel der Verarmungsspannung (U_{BP}). Wenn ich U_{BP} langsam von 0V auf 70V erhöhe, sollte sich, nach Gleichung 3.22, auch die Zahl der Cluster mit $\sqrt{U_{BP}}$ ändern. Die Kathode, der Eingang der Verstärker, liegt nicht auf Masse, sondern bei etwa 5V, so daß diese Abhängigkeit erst ab einer Spannung $V_0 \approx 5\text{V}$ gilt. Ist die Spannung kleiner als dieses V_0 , so betreibe ich die Dioden in Durchlaßrichtung. Ich messe dann die Schwankungen des Durchlaßstromes.

In Abbildung 7.6 ist der Punkt, an dem der Detektor verarmt ist, gut zu erkennen: Die Meßpunkte bleiben unter der angepaßten Wurzel. Der Punkt, an dem sich die Raumladungszone über die ganze Kristalldicke erstreckt, kann aus dem Graph abgele-

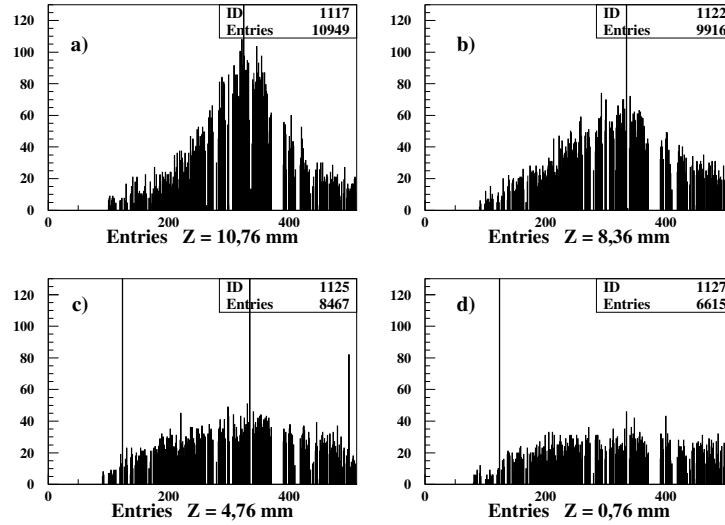


Abbildung 7.14: Clusterzahl in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Quelle und Detektor

Die Z-Position wurde durch einen Verstelltisch verändert. Die Achse hat unten den Nullpunkt, so daß die Messung mit $z = 10,76\text{mm}$ den geringsten Abstand zur Quelle hatte. Der Abstand Quelle–Detektor ist $d = z_0 - z$, mit $z_0 \approx 12\text{mm}$. Bei geringem Abstand ist ein schmaler Peak zu sehen (a), der sich mit zunehmendem Abstand verbreitert (b,c) und schließlich in einer Gleichverteilung endet (d).

sen werden. Der Schnittpunkt von x-Achse und Kurve entspricht nicht der minimalen Dicke der Raumladungszone, da hier die Anzahl der Cluster nicht proportional zu der Dicke ist. Durch die geringe Zahl an Clustern, können Cluster durch Rauschen, gerade bei diesem Detektor, nicht vernachlässigt werden.

Bei 2 benachbarten Streifen wurde die Verarmungsspannung über eine C–V–Messung bestimmt. Es ergaben sich Werte von $U_{Dep} = 34\text{ V}$ und $U_{Dep} = 36\text{ V}$. Bei einem guten Detektor ist die Spannung für alle Streifen gleich und deutlich geringer. Bei den neuen Wafern wurden Spannungen von etwa 20 V gemessen. Am Knickpunkt bleibt die Zahl der Cluster für eine Zeit konstant sein, denn es ist die gesamte Dicke verarmt. Mit zunehmender Feldstärke können die lokale Durchbrüche entstehen („Shot Noise“), die die Zahl der Cluster steigen lassen. Im C–V–Diagramm äußern sich die Durchbrüche in einem Sinken der Kapazität. Der Detektor B114 verarmt erst bei so hohen Feldstärken, daß es sofort zu Durchbrüchen kommt. Die Zahl der Cluster und die Kapazität sind daher nicht konstant.

Die Wafer des alten Moduls B114 sind deutlich schlechter, als die neuen Wafer. Bei letzteren beträgt die Verarmungsspannung nur 20V , im Gegensatz zu den $\approx 40\text{V}$ der alten.

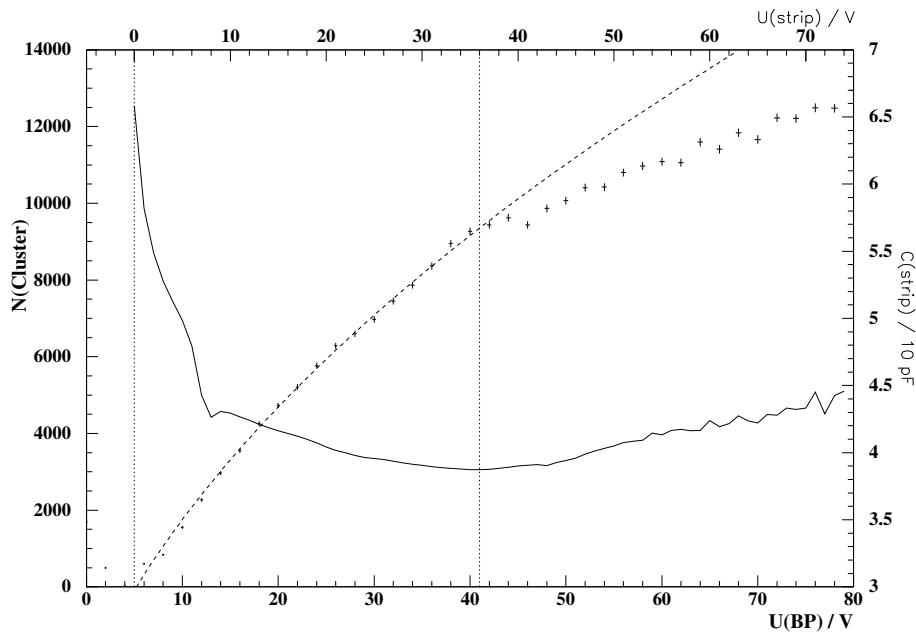


Abbildung 7.15: Zahl der Cluster als Funktion der Backplanespannung. Es ist die Anzahl der Cluster aufgetragen, die bei der angelegten Backplane-Spannung gefunden wurde. Die Verarmungsspannung ist die Differenz der Spannungen, bei der Punkte und Kurve auseinander gehen (41V) und der bei der die Kurve die x-Achse schneidet (5V). Der Anstieg nach dem Knick, kommt durch Rauschen des Detektors. Die durchgezogene Linie ist die Kapazität eines Streifens. Die senkrechten Linie kennzeichnen deren Nullpunkt und die Verarmungsspannung.

7.7 Zusammenfassung

Es wurde eine neue Arbeitsgruppe in Karlsruhe gebildet, die im Rahmen des DELPHI-Experimentes, Silizium-Streifen-Detektoren baut und testet. Die Hardware, die in dem Karlsruher Labor benutzt wird, weicht von der, anderer Labors ab. Daher wurde die Software angepaßt oder neu entwickelt. Das Programmpaket umfaßt Routinen zur Überprüfung des Aufbaus, das Hauptmeßprogramm und Abwandlungen für spezielle Messungen.

Mit den Programmen konnten Spektren von einer Ameritium- ($60\text{ keV } \gamma$) und einer Strontium-Quelle ($2,0\text{ MeV } \beta$) aufgenommen werden. Die Pulshöhe der γ -Quelle folgt einer Gaußverteilung, die des Strontium einer Landauverteilung. Der Mittelwert der Pulshöhe ist, bei Ameritium, für das Halbmodul B114 ≥ 20 counts, woraus ein Signal-zu-Rauschabstand von $\geq 7,5$ folgt. Deutlich besser sind die neuen Detektoren, bei denen ein Signal-zu-Rauschabstand ≥ 30 gemessen wurde. Die Elektronen des Strontiums wurden getriggert. Damit tragen nur noch höherenergetische bei, die nicht im Detektor gestoppt werden. Sie haben im Mittel Energien von $\approx 1\text{ MeV}$ und verhalten sich daher wie MIPs: ihre Energiedeposition ist $E = 90\text{ keV}$ und damit um einen Faktor 1,5 höher als bei Photonen des Ameritiums. Der Mittelwert der Pulshöhe ergab für das Halbmodul B114 30,4 counts, in guter Übereinstimmung mit der Erwartung.

Mit einer großen Statistik ist eine Energie-Eichung der einzelnen Streifen möglich. Der Signal-zu-Rauschabstand der guten Streifen des Halbmoduls B114 variierte in einem Bereich von $7,5 - 8,0$. Eine Anpassung der Ortsbestimmung ist hier nicht nötig. Das empfindliche Timing des Triplex-Chips kann unterschiedliche Verstärkungen der Streifen hervorrufen, so daß die Energie-Eichung eine verbesserte Ortsauflösung bringt.

Neben den Programmen für die Tests, entstanden noch einige weitere Abwandlungen, mit denen andere Parameter überprüft werden konnten. So läßt sich aus der Zahl der Treffer, welche mit Ameritium registriert werden, die Verarmungsspannung bestimmen.

Danksagung

Als erstes bedanke ich mich bei Herrn Professor Wim de Boer, für die interessante Aufgabenstellung und die Möglichkeit zur selbständigen Arbeit.

Dr. Gunnar Mæhlum danke ich für die fachliche Betreuung, in allen Fragen zu Halbleiterdetektoren. Dipl. phys. Michael Kaiser half mir durch viele anregende Diskussionen. Die Arbeit wurde durch das angenehme Arbeitsklima erleichtert, zu dem alle, auch die Mitdiplomanden der Vertex-Gruppe beitrugen.

Bei speziellen Fragen zu der Benutzung der Apple-PCs fand ich in der Elektronik-Gruppe immer ein offenes Ohr. Nach einfachsten Skizzen wurden in der mechanischen Werkstatt benötigte Teile gefertigt, und das in kürzester Zeit. Frau Haas einen Dank für ihre Anstrengungen, uns die Hürden der Bürokratie aus dem Weg zu räumen.

Ferner einen Dank an alle, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen oder mich dabei unterstützt haben, ohne daß sie erwähnt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Lage des LEP-Speicherringes	4
2.2	Die Vorbeschleuniger des LEP	5
2.3	Ansicht des neuen DELPHI-Detektors	6
3.1	Bandstruktur für verschiedene Dopingkonzentrationen	10
3.2	Physikalische Größen des p-n-Überganges	12
3.3	Linearer Schwächungskoeffizient in Silizium	15
3.4	Ionisationsvermögen von Elektronen in Silizium	16
3.5	Schnitt durch einen einseitigen Detektor	17
3.6	Auskopplung des Signals der Streifen	18
3.7	Schaltbild für die kapazitive Kopplung der Streifen	19
3.8	Schaltbild des MX-3 Chips (Auszug)	20
3.9	Das Timing der Datennahme	22
3.10	Schaltbild des Schieberegisters des MX-3 (Auszug)	23
3.11	Das Timing der Auslese	23
3.12	Blick auf ein Hybrid des 93er Outer Layer.	24
3.13	Seitenansicht eines Moduls des neuen Outer Layer	25
3.14	Ein Modul des Outer-Layer des alten Vertex-Detektors	25
3.15	Skizze des „alten“ Vertex-Detektors	26
3.16	Ereignis $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ mit 6 Treffern pro Spur	26
3.17	Skizze des neuen Vertex-Detektors	27
4.1	Labora Aufbau für Messungen	28
4.2	Blockschaltbild der VME-Treiberkarte	30
4.3	Blockschaltbild der VFLAM-Karte	31
4.4	Termschema für den Zerfall von Ameritium 241	32
4.5	Wahrscheinlichkeit für Gammalinien des Ameritiums	33
5.1	Flußdiagramm zur VME Auslese	35
5.2	Rohdaten des Detektors T27	36
5.3	Pedestals für den Detektor T27	37
5.4	Rohsignal als Differenz der ADC counts und Pedestal	37
5.5	Common Mode des Hybrids T27 für Event 12	38
5.6	Ausschnitt des Common Modes für Chip 8	39

5.7	Entwicklung der ADC-Counts.	40
5.8	Die Pulshöhe für Event 12	41
5.9	Definition eines Clusters	43
6.1	Frontplatte des VIs ChangeGlobals.vi	46
6.2	Frontplatte des VIs Write-VME.vi	48
6.3	Frontplatte des VIs 0c_start_test_readout.vi	49
6.4	Frontplatte des VIs 0aTestMain.vi	51
6.5	Beispiel einer Convert-Scan-Messung für den Detektoren B114.	52
6.6	Frontplatte des VIs Am241Test.vi	53
7.1	Pedestal und Rauschen des Detektors B114 nach 15.000 Events	57
7.2	Common Mode der 4 Chips des Detektors B114	57
7.3	Average Noise der 4 Chips des Detektors B114	58
7.4	Spektrum der ^{241}Am -Quelle mit dem Detektor B114	59
7.5	Spektrum der ^{241}Am -Quelle mit dem Detektor T27	60
7.6	Erwartete Pulshöhensumme für RZ-320-Wafer	61
7.7	Erwartete Pulshöhenverteilung	62
7.8	Spektrum der Strontium-Quelle mit dem Detektor B114	63
7.9	Position der gefundenen Cluster	64
7.10	Höhe des Rauschens der Cluster in ADC-Counts	65
7.11	Signal- zu Rauschabstand für eine Energiedeposition von 60 keV	65
7.12	Versuchsaufbau zur Abschätzung des Absorptionskoeffizientens	66
7.13	Zählrate über der Dicke des Siliziums	67
7.14	Clusterzahl in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Quelle und Detektor	69
7.15	Zahl der Cluster als Funktion der Backplanespannung	70

Tabellenverzeichnis

2.1	Wechselwirkungen und ihre Eichbosonen	2
2.2	Fermionenfamilien der Materie	3
5.1	Parameter für das Packen der Streifendaten	42
6.1	Vergleich der Extrahierdauer	55
7.1	Messung zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten in Silizium . . .	67

Literaturverzeichnis

- [1] Marcelo Alonso / Edward J. Finn. *Fundamental university Physics. Volume II. Fields and Waves*. Addison–Wesley 1983
- [2] G. Bertolini / A.Coche. *Semiconductor Detectors* North–Holland Publishing Company 1968
- [3] S Cittolin / R. Labner *LabVEE. CAMAC–VME VIs* RD 12 technical note 14 December 1993
- [4] DELPHI Collaboration *The DELPHI detector at LEP* Nuclear Instruments and Methods A303 (1991) 233-276
- [5] W. Dulinski / Colledani DRAFT VFLAM-CRN Lepsi, Straßbourg 1992
- [6] K. Kleinknecht *Detektoren für Teilchenstrahlung* Teubner Studienbücher 1987
- [7] A. Kuhn *Halbleiter– und Kristallzähler*. Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig 1969
- [8] W. Kunz / J. Schintlmeister *Tabellen der Atomkerne Band 2 Teil I* Akademie Verlag Berlin
- [9] L. D. Landau *On the energy loss of fast particles by ionisation* J. Phys U.S.S.R. 8, 201 (1944)
- [10] G. Mæhlum *A Measurement of Lifetime of b-hadrons using a silcon microstrip detector at LEP* Thesis 1993
- [11] Donald H. Perkins. *Hochenergiephysik*. Addison–Wesley 1991
- [12] Nuclear Data Group. *Nuclear Level Schemes* Nuclear Data Sheets Volume 44 (1985) 442-447
- [13] Anna Peisert. *Silicon microstrip detectors*. DELPHI 92–143 MVX 2, 1992
- [14] Particle Data Group. *Particle Properties Data Booklet*.
- [15] Tuure Tuuva. *Silicon Strip Detectors with VLSI Readout*. Theses, Helsinki 1990

- [16] National Instruments *LabVIEW 3.0: User Manual*
- [17] National Instruments *LabVIEW 3.0: Code Interface Nodes*
- [18] Nils Bingeors / Mike Burns *SIROCCO IV* DELPHI Microvertex Group
- [19] W. Dulinski *Drawing MPX_DRIVER: electrical circuit diagram* LEPSI Straßbourg 1991
- [20] W. Dulinski *Drawing SIROCCO_FLASH: electrical circuit diagram* LEPSI Straßbourg 1992
- [21] Pawel Jalocho *On-line data suppression program for the DELPHI μ Vertex detector* Internal Note
- [22] Christian Becker *Silizium Streifendetektoren, Entwicklung und Aufbau eines Teststandes* Diplomarbeit, Karlsruhe 1994
- [23] Stephan Meyer *Kurzanleitung für Treiberbox und VFLAM*
- [24] Stephan Meyer. *Beschreibung der Programme und ausgesuchter Schaltungen.*

Anhang A

Kurzanleitungen zu Treiberkarte und VFLAM

Zusammenfassung

Die Treiberbox stellt die notwendigen Signale zur Verfügung, die zum Betrieb und zur Auslese der doppelseitigen Silizium – Streifendetektoren notwendig sind. Da kein Handbuch existiert, wurden die notwendigen Daten aus dem Schaltplan ermittelt und hier vermerkt. Die Beschreibung ist auf dem Stand, der in unserem Labor benötigt wurde. Eine bessere Beschreibung sollte bei LEPSI, dem Kartenhersteller angefordert werden können.

A.1 Die VME Treiberkarte

A.1.1 Beschreibung der Elektronik

Die Treiberkarte dient der Signalerzeugung für Siliziumstreifendetektoren unterschiedlicher Herstellung und Aufbaus. Diese benötigen zwei verschiedenen Signalgruppen, die eine zur parallelen Datennahme aller Streifen in einen Multiplexer – Chip während des BCO, der direkt mit dem Detektor – Chip verbunden ist. Die andere Gruppe dient zur seriellen Ausgabe der zwischengespeicherten Daten des Multiplexers an einen ADC, wobei die Datenweiterleitung nur geschieht, wenn eine definierte Zeit nach dem BCO ein Trigger erfolgt.

Zwei LED's zeigen den Status der Karte an. Die obere leuchtet, wenn die Karte für Signalerzeugung bereit ist, bis zum Ende der seriellen Ausgabe. Die untere leuchtet nur wenn Signale für ein Sampling des Detektors anstehen.

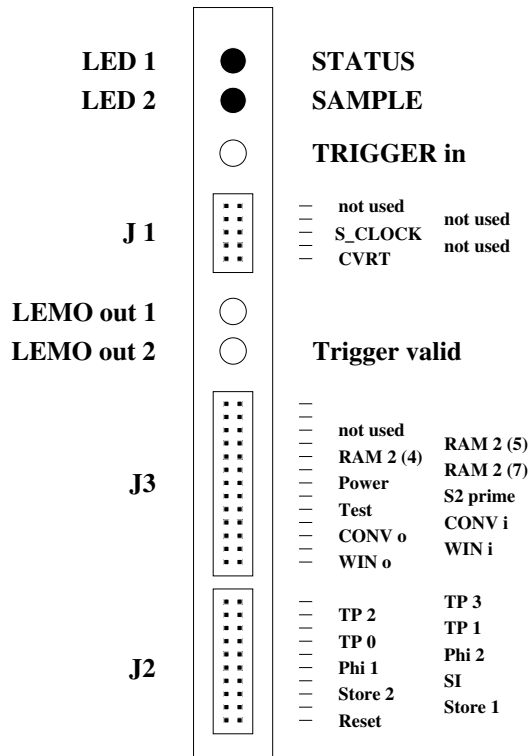
Die Treiberkarte enthält 7 8-Bit-Register, 2 256x8-Bit-RAM's und eine Adresse für Start und Reset der Karte.

Bis auf ein Register (DB Reg 6) können alle geschrieben und gelesen werden. DB Reg 6 kann nur gelesen werden. Sie dienen zur Steuerung der Funktionen der Karte. Näheres zur Bedeutung der einzelnen Register später.

Die Ausgangssignale für Detektor bzw. Multiplexer werden in den RAM's gespeichert, so daß innerhalb einer Zeit maximal 256 verschieden Zustände für jedes Signal möglich sind. Die Samplingsignale ergeben sich aus einem Durchlauf des RAM's (Mem 1); die Multiplexersignale können bei einer Zeitauflösung von 16 Bins bis zu 4096-mal hintereinander erzeugt werden, wobei das Signal **RBI** (bzw. später $\overline{\text{ST}}$) nach einem kompletten RAM – Durchlauf gesperrt wird.

Alle Ausgänge für Detektor und Multiplexer stehen als Differenzspannungen gemäß **EIA-STD PN1488**, über Flachbandkabelverbinder zur Verfügung, um auch längere Kabelverbindungen zu ermöglichen. Auf der Repeaterkarte müssen diese auf ein geeignetes Potential zurückgewandelt werden.

A.1.2 Die Frontplatte



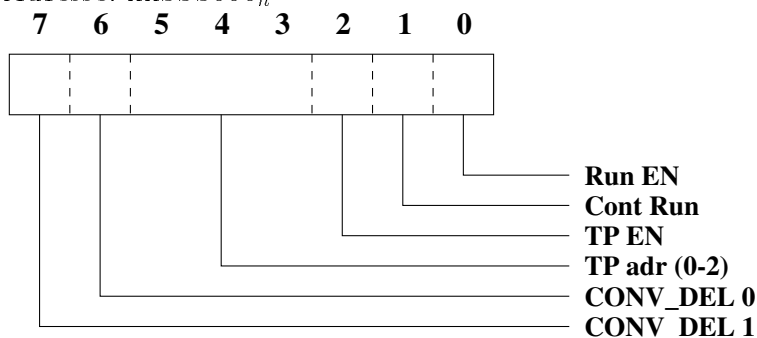
Die Bedeutung der beiden LEDs hatte für unsere Arbeit keine Bedeutung. Die obere LEMO-Buchse ist der Trigger-Eingang. Der folgende 10-polige Pfostenfeldstecker wird über ein kurzes Kabel mit dem entsprechenden des VFLAM verbunden. Die zweite LEMO-Buchse zeigt einen gültigen Trigger an, die untere kann über Jumper, für 4 verschiedene Signalausgänge, konfiguriert werden. Auf dem 26-poligen Pfostenfeldstecker sind nur Ein- und Ausgänge von WIN und CONV mit Drahtbrücken verbunden. Am untersten Pfostenfeldstecker stehen die Signale für Detektor und Auslesechip als Differenzsignal zur Verfügung.

A.1.3 Erläuterungen der einzelnen Register

Die Adressen der Register sind in der Form xxSSS... als hexadezimale Zahl angegeben. Das xx steht für die Crate Nummer und die Seite des Pagedescriptors auf der VME-CAMAC-Steuereinheit. Die Ziffern SSS sind durch die Werte der 3 Hexschalter SW5, SW4 und SW3 zu ersetzen. In unseren Labor sind die Einstellungen: Page C, Crate 0 und die Schalter stehen auf C, 1 und 0.

DB Reg 0

Adresse: xxSSS000_h



Run EN gesetzt: Die Karte kann gestartet werden. Außerdem ist das Schreiben der anderen Register nicht möglich.

gelöscht: Schreiben aller Register erlaubt. Die Karte kann getestet werden, indem statt der beiden RAM's die Register 3 und 4 benutzt werden, um die Signale für Detektor und Multiplexer zu erzeugen.

Cont RUN gesetzt: Der Datennahme-Zyklus wird so lange wiederholt, bis ein Trigger registriert wird. Danach wird der Auslese-Zyklus einmal durchlaufen. Der Datennahme-Zyklus ist ein Durchlauf von RAM 1 und der Auslese-Zyklus sind N_PULSE Durchläufe von $\frac{1}{16}$ RAM 2.

gelöscht: Es wird nur ein Datennahme-Zyklus erzeugt. Falls ein gültiger Trigger eingetroffen ist, wird der Auslese-Zyklus durchlaufen. Anschließend wird gestoppt.

TP EN gesetzt: es wird in der Zeit, in der das Signal *Test* von RAM 1 aktiv ist, ein Testpuls erzeugt. Dieser sollte in der Zeit des aktiven Fensters des Detektors sein, also während des

gelöscht: Testpulse werden nicht generiert.

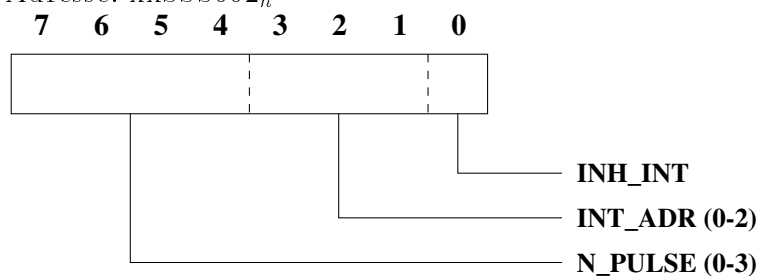
TP adr(0-2) Wenn Testpulse aktiviert sind, bestimmen die unteren beiden Bits welche der 4 Kalibrationsleitungen des MX3 Chips den Testpuls bekommt. (Mit einer anderen Repeaterkarte, die auch die anderen „Twisted Pair“ Signale nutzt,

können bis zu acht verschiedenen Testpulse erzeugt werden, wobei die Decodierung von der Repeaterkarte übernommen werden muß!)

CONV_DEL(0-1) Das Signal CONVOUT kann über die zwei Bits verzögert werden, gegenüber dem Erscheinen am RAM 2 Ausgang 2.

DB Reg 1

Adresse: $xxSSS002_h$



INH_INT gesetzt: Es wird die Erzeugung eines Interrupts durch die Karte unterdrückt. (Wenn keine Interrupt-gesteuerte Software verwendet werden soll, muß diese Bit gesetzt sein!) Die Bits 1-3 haben dann keine Bedeutung

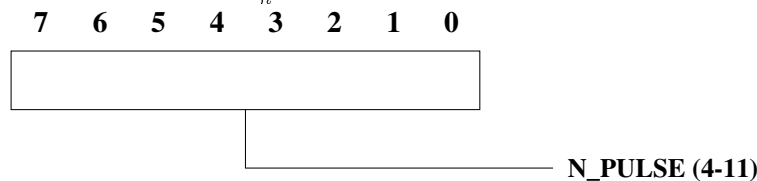
gelöscht: Nach jedem Konversionsende wird ein Interrupt erzeugt, wobei je nach gesetzter Brücke ST6 ... ST12 die entsprechende IRQ – Nummer gewählt wird.

INT_ADR(0-2) Die 3 Bits dienen zur Interruptbestätigung. Damit die Bestätigung gültig ist müssen die Adressen A(1-3) mit diesen Werten übereinstimmen.

N_PULSE(0-3) Es sind die untersten 4 Bit der 12-Bit Zahl N_PULSE.

DB Reg 2

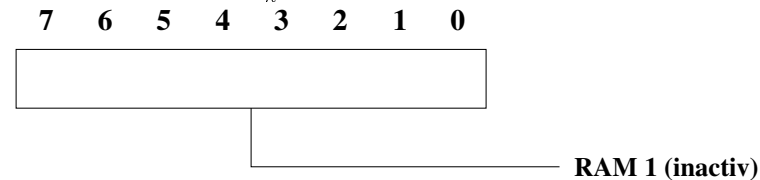
Adresse: $xxSSS004_h$



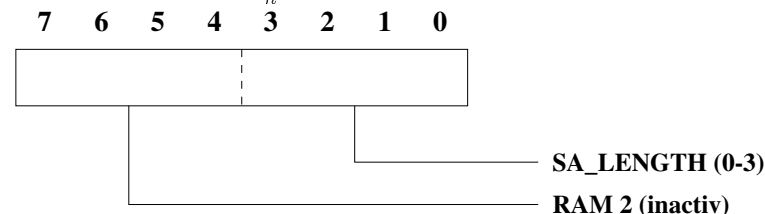
N_PULSE(0-11) bestimmt die Anzahl der Φ -Clock's, wobei es der Startwert eines Counters ist, der bis $1000_h = 4096_d$ hochzählt. Für die Zahl der generierten Φ -Clock's gilt dann:

$$\text{Anzahl} = 4096 - N_PULSE(0 - 11)$$

Da der SIROCCO nur Vielfache von 256 als Streifenzahl ermöglicht, ist es sinnvoll, N_PULSE(0-7) = 00_h zu wählen, um in N_PULSE(8-11) die gleiche Zahl stehen zu haben, die auch in das SIROCCO Register 1 (Bits 0-3) geschrieben wird.

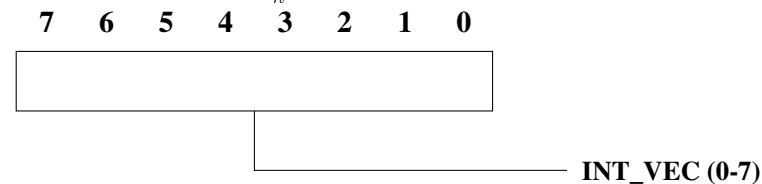
DB Reg 3Adresse: xxSSS006_h

Erzeugt die Signale des RAM 1 während keine Datennahme erfolgt. Näheres zu den Signalen in Abschnitt A.1.4

DB Reg 4Adresse: xxSSS008_h

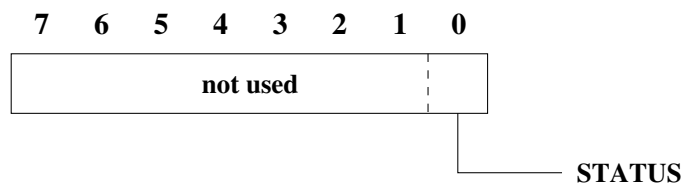
Die Bits 0-3 bestimmen die Länge, die ein Durchlauf des RAM 1 dauert. Der Zähler für die Adressen beginnt mit dieser Zahl *16 und zählt bis 255. *Es werden daher auch nur die Adressen von Bit(0-3) *16 bis 255 genutzt!!*

Die Bits 4-7 ersetzen in der inaktiven Phase die unteren 4 Bit des RAM 2.

DB Reg 5Adresse: xxSSS00A_h

Dieses Register enthält den Interruptvektor, der gelesen wird, nachdem der erzeugte Interrupt der Karte bestätigt und abgearbeitet wird. Für nähere Informationen bitte in ein VME – Handbuch schauen.

DB Reg 6Adresse: xxSSS00C_h



Dieses Register kann nur gelesen werden!! In Bit 0 steht dann der Status der Karte (=1 untere LED ist an).

A.1.4 Signale für Detektor- und Multiplexerchip

Die Treiberbox generiert die Steuersignale für den Detektor. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine erzeugt Signale zur Datennahme während des BCO, die andere zur seriellen Auslese dieser Daten, wenn ein Trigger erschien.

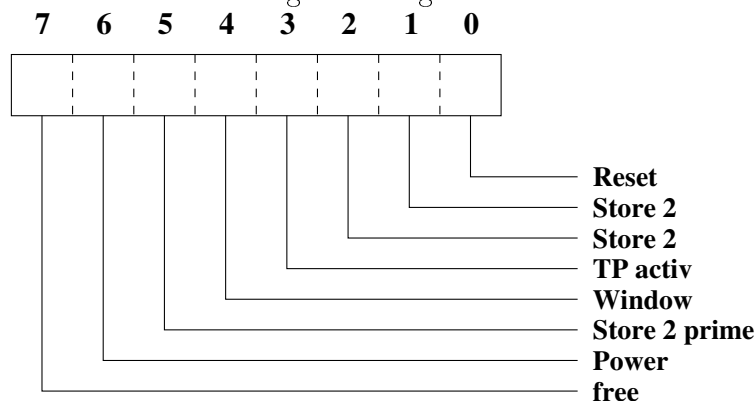
Die Signale werden in beiden Fällen erzeugt, indem alle Zellen des jeweilige RAMs über einen Zähler ausgelesen werden. Die Datenleitungen der RAMs ergeben so acht digitale Signale.

Gruppe 1

Adresse: $\text{xxSSS200}_h - \text{xxSSS3FE}_h$

(Nur gerade Adressen werden genutzt!!)

Es werden die folgenden Signale für die Datennahme generiert:



Zur Datennahme werden alle Signale nur einmal benötigt, so daß ein Durchlauf des RAMs, von der Startadresse gemäß der Bit (0-3) des Registers 4 bis zum Wechsel von 255 zu 0 des Zählers genügt.

Die Bedeutung der einzelnen Signale:

Reset Ein Low-Pegel entlädt die beiden Auslesekapazitäten aller Streifen. Um die Ladung der Streifen zu messen, muß dieses Signal auf High-Pegel sein.

Store 1 Ein High-Pegel lädt den Speicherkondensator 1 aller Streifen, verbindet ihn also mit dem zugehörigen Streifen. Solange die Leitung auf Low liegt, wird die Ladung der Kondensatoren nicht verändert.

Store 2 Wie *Store 1*, nur für den Kondensator 2.

Für eine gewisse Zeit wird auf beiden Kondensatoren Ladungen, die durch Rauschen des Chips entstehen, gesammelt. Während des BCOs darf dann nur noch einer mit dem Streifen verbunden sein. Die Ladungsdifferenz enthält dann die Information.

Window Während der Zeit, die dieses Signal Low-Pegel führt, wird ein Triggersignal akzeptiert.

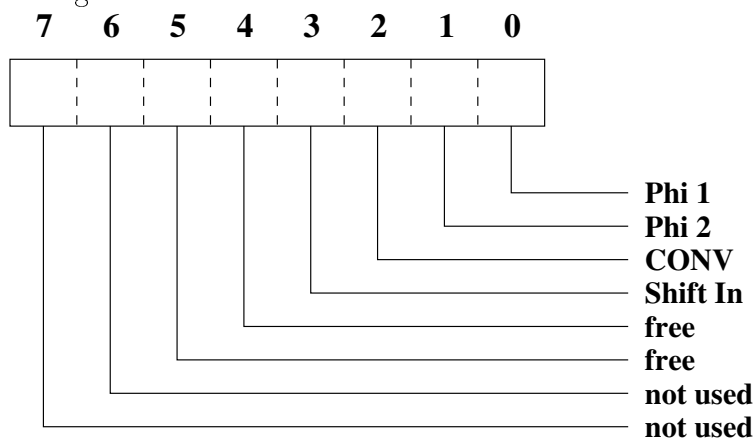
Power über dieses Bit kann die Stromversorgung des Detektors geschaltet werden. So kann bei den NMOS – Versionen die Wärmeentwicklung durch Verlustleistung stark reduziert werden. Für die CMOS – Version die bei uns zum Einsatz kommt, wird es nicht benötigt.

Gruppe 2

Adresse: $xxSSS400_h - xxSSS5FE_h$

(Nur gerade Adressen werden genutzt!!)

Für die Auslese der Streifen werden, nach einem Trigger, die folgenden Signale erzeugt:



Φ 1/2 Taktsignale für den Multiplexer, die an das Schieberegister gelegt werden. Dieses steuert, welches Analogsignal auf den Bus zum ADC gelegt wird.

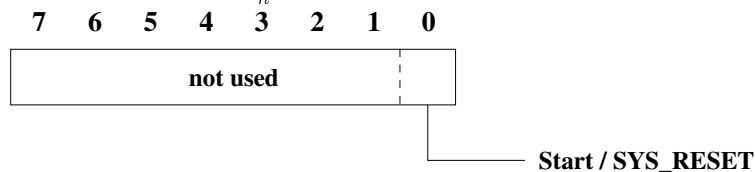
CONV Taktsignal, das an CONVOUT zur Verfügung steht. Dieses Signal läßt sich über CONV_DEL (0-1) verzögert ausgeben (gegenüber des Erscheinens am RAM-Ausgang). über CONVIN gelangt der Takt als CVRT – Signal an den oberen Flachbandstecker. Dieser wird mit dem SIROCCO – Board verbunden.

Der Takt dient zur Synchronisation mit der ADC – Karte. Sie wandelt das Eingangssignal immer dann, wenn ein Taktimpuls kommt. Damit diese Wandlung in der Mitte des Analogsignals des Detektors kommt, kann eine zusätzliche Verzögerung möglich sein.

\overline{SI} Wenn dieses Signal auf Low-Pegel ist, während der positiven Flanke des $\Phi 1$ – Taktes, beginnt das Schieberegister, diesen Impuls von Streifen zu Streifen weiterzuschieben. Der jeweilige Streifen, bei dem dieser Impuls sich befindet, wird ausgelesen und das Analogsignal dem ADC weitergeleitet.

A.1.5 Startadresse

Adresse: $xxSSS600_h$

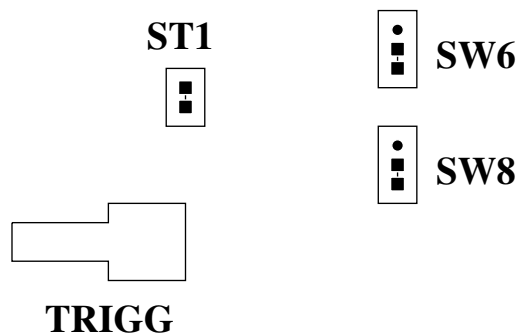


Diese Adresse ist kein Register, sondern wird nur selektiert. Ist beim Schreiben das Datenbit 0 gesetzt, so wird die Auslese gestartet.

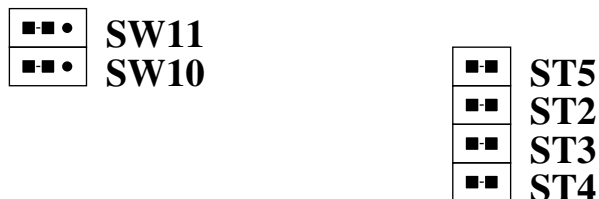
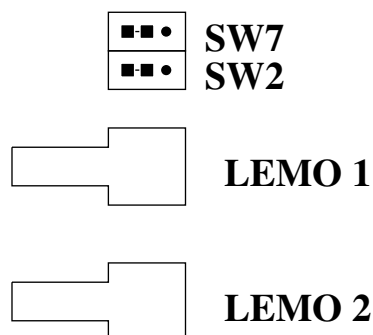
Ist das Datenbit 0 gelöscht, wird die Karte zurückgesetzt. (Hat die gleiche Wirkung wie ein SYS_RESET über den VME – Bus.)

A.1.6 LEMO–Buchsen und Jumperkonfiguration

Die Treiberbox hat drei LEMO–Buchsen, die obere ist der Triggereingang, die beiden unteren sind Ausgänge. Alle drei können per Jumper auf negative und positive Logik und TTL– und NIM–Pegel eingestellt werden. Die Skizzen zeigen die Position der Jumper auf der Platine.



Für den Eingang geschieht dieses mit den Jumpern SW6 (Pegelart) und SW8 (pos. / neg. Logik). Mit einem Jumper auf ST1 ist der Eingang für 50 Ω Leitungen terminiert.



Bei den Ausgängen sind es SW2 und SW7 (oben) bzw. SW11 und SW10 (unten). (Jeweils der erstgenannte für die Pegelart und der letztere für die Logik.) Der LEMO–Eingang kann zusätzlich über ST1 abgeschlossen werden.

Die untere LEMO–Buchse gibt einen akzeptierten Tirgger weiter, während der obere Ausgang über Jumper mit verschiedenen Signalen verbunden werden kann:

1. STATUS ST5 gesetzt
2. CONV ST2 gesetzt
3. SAMPLE ST3 gesetzt

4. $\overline{\text{ENDCONV}}$ ST4 gesetzt

Von diesen 4 Jumpern darf höchstens einer gesetzt sein!

Interrupt-Konfiguration

Die Treiberboxkarte kann nach einer erfolgten Konversion einen Interrupt erzeugen, wobei der Interrupt mittels Jumper ST6 – ST12 auf die $\overline{\text{IRQ}}$ – Signale 1 bis 7 weitergeleitet wird:

Jumper	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10	ST11	ST12
$\overline{\text{IRQ}}$ No.	1	3	2	7	6	5	4

■ ■	ST9
■ ■	ST10
■ ■	ST11
■ ■	ST12
■ ■	ST7
■ ■	ST8
■ ■	ST6



Steuerung

Die Signale können sowohl kontinuierlich über das Taktsignal des VME-Crates erzeugt werden (Taktfrequenz bei uns 16 MHz), als auch in einer Art Singlestep. Dann wird bei jedem Start (Adresse xxSSS600) ein Taktimpuls erzeugt. Diese Betriebsart ist aber nur für Testzwecke geeignet!

SW9 auf der Standardposition nutzt den Systemtakt, während in der anderen Stellung die Karte im Einzelschrittbetrieb läuft.

A.2 Das VFLAM

A.2.1 Beschreibung der Elektronik

Das VFLAM¹ ist ein AD-Wandler, der mit einer Rate von bis zu 20 MHz das analoge Signal abtasten kann. Die Genauigkeit ist 10 Bit, wobei ein zusätzliches Bit im Falle eines Überlaufs gesetzt wird. Die Werte von bis zu 4096 Kanälen, die zeitlich nacheinander auf dem Analog-Eingang folgen, werden auf der Karte gespeichert.

Die Umsetzung kann über 3 verschiedene Takte erfolgen, wobei Jumper die genutzte Quelle bestimmen:

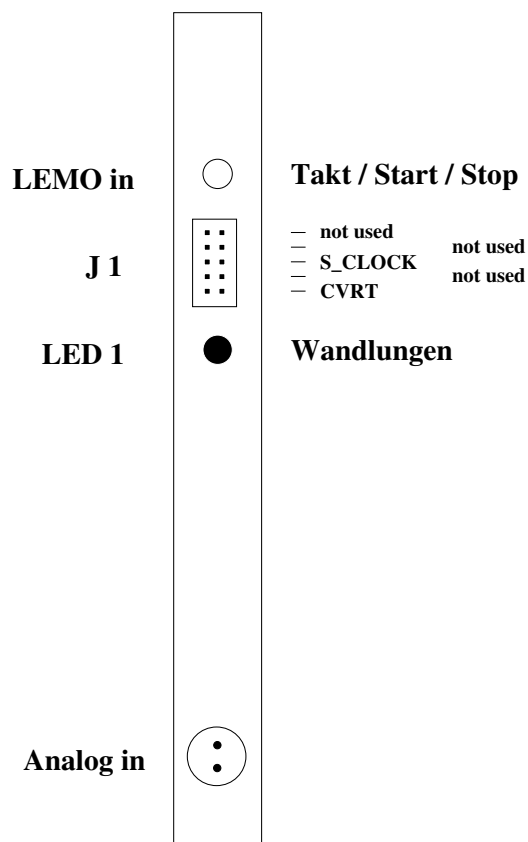
1. Synchron zur Treiberkarte, durch Verwendung des CVRT-Signals vom Pfostenfeldstecker (1 MHz). (standard)
2. Mit dem VME-Takt (16 MHz).
3. Frei definiert über den LEMO-Eingang.

Die Umsetzung der Spannung erfolgt im Bereich von -300 mV (digital 0) bis 300 mV (digital 1023). Ein 12-Bit DAC erlaubt die Addition einer programmierbaren Spannung zwischen $+300$ mV und -300 mV.

Die Auslese des Speichers erfolgt über das VME mit 16-Bit Zugriffen und die Daten können dann auf einem separaten Rechner verarbeitet werden.

¹VFLAM: Vme FLash Adc Multipurpose module

A.2.2 Die Frontplatte



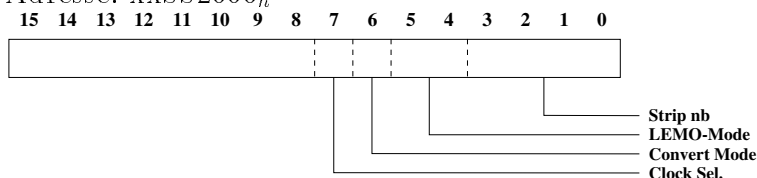
Ganz unten ist der Eingang für das Analogsignal. Die Buchse ist eine Sonderform der Fa. LEMO, der eine Verpolung verhindert. Die obere LEMO-Buchse ist ein Eingang mit programmierbarer Funktion. Über Jumper wird eingestellt, ob hier der Takt zugeführt wird, oder ob die Auslese hier gestartet oder gestoppt wird. Der Pfostenfeldstecker wird über ein kurzes Flachbandkabel mit der Treiberkarte (siehe A.1) verbunden. So wird eine Synchronisation von Auslese und Wandlung gewährleistet. Die LED zeigt eine Umsetzung an: Sie leuchtet von dem Zeitpunkt, zu dem das VFLAM gestartet wurde, bis zum Ende der Wandlung.

A.2.3 Die Register des VFLAM

Die Adressen der Register sind, ähnlich der Treiberkarte, in der Form xxSS... als hexadezimale Zahl angegeben. Das xx steht für die Crate Nummer und die Seite des Pagedescriptors auf der VME-CAMAC-Steuereinheit. Die Ziffern SS sind durch die Werte der 2 Hexschalter SW1 und SW2 zu ersetzen. In unseren Labor sind die Einstellungen: Page C, Crate 0 und die Schalter stehen auf C und 2.

SirReg 1

Adresse: xxSS2000_h



Strip nb Zahl der Umsetzungen, die erfolgen soll. Der Wert der in die Bits 0 – 3 geschrieben wird erhält man wie folgt: Die Anzahl der Wandlungen ist durch

256 zu Teilen und von dem nächstgrößeren ganzen Zahl zum Quotienten ist das Zweierkomplement (!) zu bilden:

256 Streifen: $256/256 = 1 \Rightarrow -1_h = F_h$ 512 Streifen: $512/256 = 2 \Rightarrow -2_h = E_h$
 1280 Streifen: $1280/256 = 5 \Rightarrow -5_h = B_h$ 4096 Streifen: $4096/256 = 16_h \Rightarrow -16_h = 0_h$

	Bit 5	Bit 4	LEMO Mode
Lemo Mode	0	0	Disabled
	0	1	External Start
	1	0	External Stop

External Start: Die Umsetzung wird durch ein Signal an dem LEMO-Eingang gestartet. Der Speicher wird in den Schreibzustand gesetzt und gegebenenfalls der interne Takt gestartet.

External Stop: Durch ein Signal am LEMO-Eingang wird die AD-Wandlung beendet. Der Speicher wird gesperrt und gegebenenfalls der interne Takt gestoppt.

Convert Mode Bit gesetzt: Der Analog-Eingang wird kontinuierlich abgetastet, unabhängig von der eingestellten Streifenzahl.

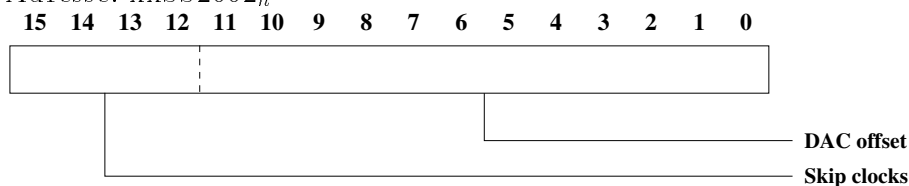
Bit gelöscht: Es erfolgt genau die Anzahl von Wandlungen, die durch die Streifenzahl vorgegeben ist.

Clock Sel Bit gesetzt: Es wird eine der externen Taktquellen benutzt. Über die Jumper S11, S12, S5 und S6 wird der Eingang gewählt (A.2.5).

Bit gelöscht: Die Umsetzung erfolgt mit dem Takt des VME-Busses (16 MHz).

SirReg 2

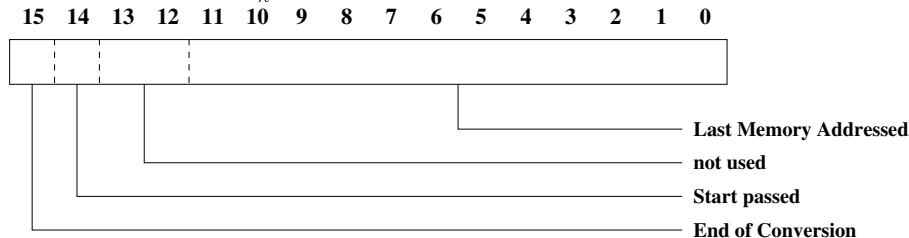
Adresse: $xxSS2002_h$



DAC offset Über die 12 Bits wird die Spannung eingestellt, die zu dem Analogsignal addiert wird. Sie liegt zwischen -300 mV und $+300$ mV.

Skip clocks ist die Zahl der verworfenen Takte vor dem Beginn der Wandlungen. Im Register steht das Einer-Komplement der Zahl der zu verwerfenden Taktpulse.

4 Takte: $\neg 4 = B_h$ 12 Takte: $\neg 12 = \neg C_h = 3_h$ 15 Takte: $\neg 15 = \neg F_h = 0_h$

SirReg 3Adresse: xxSS2004_h 

Das Register kann nur gelesen werden!

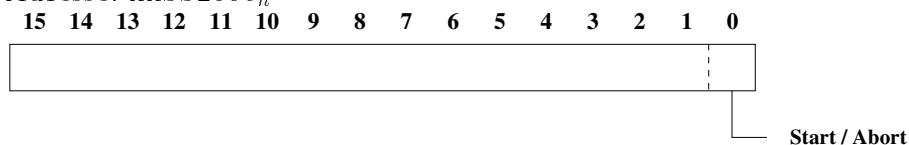
Last Memory Addressed Während der Wandlung steht hier die Adresse, der zuletzt angesprochenen Speicherzelle.

Start passed Das Bit ist gesetzt, wenn die Umsetzung begonnen wurde.

End of Conversion Bit gelöscht: Die Umsetzung ist beendet.

Bit gesetzt: Es finden weitere Umsetzungen statt.

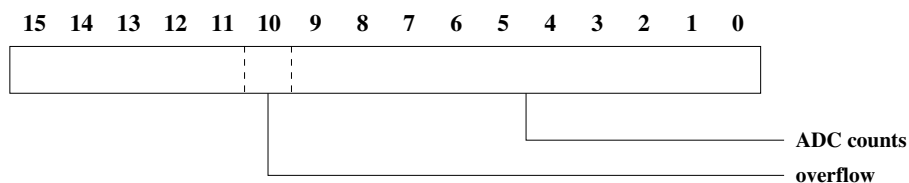
Durch die Abfrage der oberen Bits kann die Software mit der Wandlung synchronisiert werden. Der Speicher auf der Karte ist mit Daten gefüllt, wenn die Bitkombination 01 ist.

SirReg 4Adresse: xxSS2006_h 

Das Register kann nur geschrieben werden !

Start / Abort – Disable Bit gesetzt: Die Umsetzung wird per Software gestartet.

Bit gelöscht: Eine begonnene Umsetzung wird abgebrochen. Ist die Wandlung bereits beendet, so wird die Karte gesperrt. Eine abgebrochen Wandlung kann nicht genutzt werden. Der Speicher wird gesperrt und gegebenenfalls der interne Takt gestoppt.

A.2.4 SirMEM

ADC counts Digitaler Wert für die Spannungsdifferenz der Leitungen A1 und A2.

overflow Das Bit ist gesetzt, wenn die Spannung am ADC-Eingang über 300 mV liegt.

Die Zuordnung zwischen der Adresse und der Streifennummer hängt von der Zahl der Wandlungen ab. Die Zahl der Umsetzungen ist immer ein Vielfaches von 256. Die erste benutzte Adresse ist um die Anzahl von Wandlungen kleiner als 4096:

384 Streifen: $4096 - 512 = 3584 \Rightarrow$ Die Adressen von 3584 bis 3968 enthalten nach der Konversion die ADC counts der Streifen.

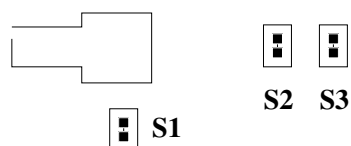
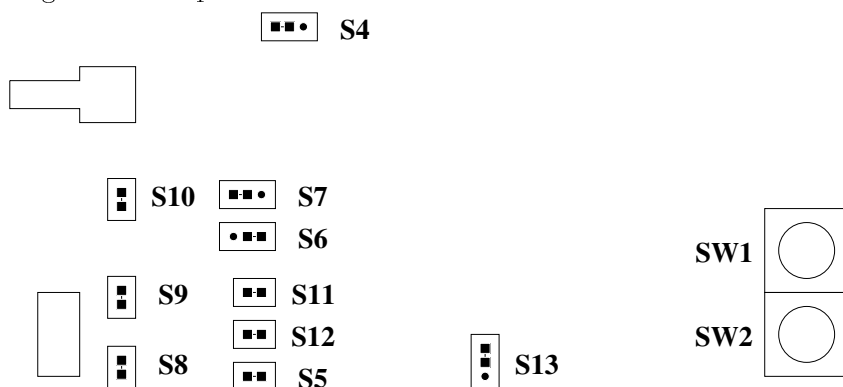
512 Streifen: $4096 - 512 = 3584 \Rightarrow$ Die Adressen von 3584 bis 4096 enthalten nach der Konversion die ADC counts der Streifen.

640 Streifen: $4096 - 768 = 3328 \Rightarrow$ Die Adressen von 3328 bis 3968 enthalten nach der Konversion die ADC counts der Streifen.

1280 Streifen: $4096 - 1280 = 2816 \Rightarrow$ Die Adressen von 2816 bis 4096 enthalten nach der Konversion die ADC counts der Streifen.

A.2.5 Jumperkonfiguration

Die Lage der Jumper auf der ADC Platine.





Die Jumper S4, S7 und S10 konfigurieren die elektrischen Eigenschaften des LEMO-Eingangs. Ist S10 gesetzt, so ist der Eingang mit 50Ω abgeschlossen. Über S4 wird der Pegel (TTL / NIM) und mit S7 die Polarität gewählt.

Die Jumper S1, S8 und S9 terminieren die Analogleitung, sowie die Differenzsignale CVRT und SYN_CLOCK.

Der Takteingang

Die Jumper S5, S6, S11, S12 und S13 bestimmen die Nutzung des LEMO-Einganges und die Quelle für den Takt der AD-Wandlung. Als Quellen des Taktes stehen die LEMO-Buchse, sowie die Signale CVRT und SYN_CLOCK. Die Stellung der einzelnen Jumper zeigt die folgende Abbildung:

CVRT als Takt




-  S11
-  S12
-  S5

LEMO als Start / Stop





-  S6

-  S13

SYN_CLOCK als Takt

-  S11
-  S12
-  S5

LEMO als Takt

-  S6
-  S11
-  S12
-  S5

Von den Jumpern S5, S11 und S12 darf nur einer gesteckt sein. S6 wählt aus, ob das Signal der LEMO-Buchse Takt, oder aber Start- bzw. Stopsignal ist. Mit S13 kann ein zweiter externer Start bis zum Rücksetzen der Karte verhindert werden. Die nicht gezeigte Stellung sollte nur bei einem Start per Software genutzt werden, wird aber auch dann nicht benötigt.