Untersuchungen an einem Halbleiterdetektor für das H1 Experiment

von
Carsten Krauss

Diplomarbeit Physik
vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
im November 1998

angefertigt am I. Physikalischen Institut
Betreuer: Prof. Dr. Ch. Berger

30. November 1998

Kurzfassung

Das H1 Experiment wurde 1998 um das VLQ Spektrometer im Rückwärtsbereich erweitert. Dieses Spektrometer besteht aus einem Kalorimeter und einem Spursystem. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit Testmessungen an Komponenten des Spursystems und der Integration des Spursystems in das H1 Experiment. Es werden Ergebnisse für den Rauschabstand und die Ortsauflösung des Spursystems präsentiert. Eine Einführung in die Hardware und die Bedienung des Spursystems wird gegeben.
Der VLQ Detektor hat im November 1998 seine Meßtätigkeit aufgenommen.

Abstract

In 1998 the H1 experiment was extended by the VLQ spectrometer in the backward region. This spectrometer consists of a calorimeter and a tracking system. This thesis deals with testbeam measurements of tracker components and the integration of the tracking system into H1. Results for spatial resolution and signal to noise ratio are presented. An introduction to the hardware and on the operation is given.
The VLQ detector started data taking in November 1998.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Die heutige Hochenergiephysik ist die direkte Fortsetzung der experimentellen wissenschaftlichen Erforschung der Materie, an deren Anfang in der Moderne die Entdeckung des Atoms stand. Experimente der Grundlagenforschung haben im Laufe dieses Jahrhunderts zum Verständnis von Kristallen, Atomen und Atomkernen geführt. Durch diese Experimente konnte die Quantentheorie als bedeutendste physikalische Erkenntnis seit der Entdeckung der Wellen-Eigenschaften des Lichts innerhalb weniger Jahre nicht nur bestätigt sondern auch im allgemeinen Bewußtsein etabliert werden.

Um auf diesem Weg weiter zu kommen, bedarf es neuer experimenteller Ergebnisse über die Struktur der Materie bei immer besserer Auflösung. Streuexperimente haben bei dem Verständnis subatomarer Strukturen die experimentellen Möglichkeiten geschaffen, um Informationen im Bereich dieser Größenordnungen zu erschließen. Seit Rutherfords berühmten Streuversuchen mit α-Teilchen an einer Goldfolie hat sich für Physiker ein immer noch zunehmender Bereich aufgetan, in dem mittels Streuung von Teilchen aneinander neue Erkenntnisse über immer kleinere Strukturen gewonnen werden. Diese Experimente haben maßgeblichen Anteil an der Entstehung des Standardmodells der Teilchenphysik und sie haben es bis heute bestätigt.

Das Standardmodell enthält diese 12 elementaren Spin $\frac{1}{2}$-Teilchen und ihre Antiteilchen:

Leptonen			Quarks		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

Es beschreibt die starke- und elektroschwache Wechselwirkung dieser Teilchen miteinander. Diese Wechselwirkungen werden durch die Bosonen des Standardmodells vermittelt: γ, Z^0, W^+, W^- und Gluonen. Diese Erkenntnisse kommen hauptsächlich aus den bisher durchgeführten hochenergetischen Streuexperimenten der vergangenen Jahre. Bei diesen Versuchen wurde nach und nach der jeweils zugängliche Energie-bereich auf neue Erkenntnisse hin abgesucht. Dabei wurden unter anderen folgende Reaktionen studiert: e und p gegen feste Ziele (fixed target) sowie e^+-e^-, p-$\overline{p}$, p-p und e-p.

Die heutigen Experimente sind, da unser Wissen über die Struktur der Materie in diesem Jahrhundert gemeinsam mit den technischen Möglichkeiten enorm zugenommen hat, die komplexesten, die jemals gebaut wurden. In diesen ambitionierten Rahmen paßt die Hadron-Elektron Ring Anlage (HERA) des DESY in Hamburg. Mit diesem Gerät werden e-p Streuungen mit der höchsten im Moment erreichten Energie durchgeführt. Dabei wird die Struktur des Protons bis hinunter zu vorher unzugänglichen Größenordnungen untersucht. Diese Anlage ist seit 1992 in Betrieb und hat in den sechs Jahren Betrieb eine Vielzahl von neuartigen Messungen ermöglicht. Das hat Physikern mit Hilfe der Detektoren ermöglicht immer genauere Messungen z. B. der Protonstrukturfunktionen, der Gluondichte im Proton oder von Erzeugungs-Wirkungsquerschnitten schwerer Quarks vorzunehmen.

In dieser Tradition wurde zur Verbesserung und Erweiterung der Messungen des H1 Detektors im Frühjahr 1998 das H1 Experiment um ein neues Spektrometer erweitert. Diese Arbeit befaßt sich mit den Eigenschaften des Spursystems dieses Spektrometers.

In dieser Arbeit wird zunächst das H1 Experiment und der VLQ Detektor vorgestellt. Dann werden die physikalischen Ereignisse, für die der VLQ Detektor konzipiert wurde, vorgestellt. In einem weiteren Abschnitt wird auf die Eigenschaften und Möglichkeiten von Halbleiterdetektoren eingegangen. Dann wird das Slow-Control System des VLQ Spursystems vorgestellt bevor dann schließlich die Resultate der Testmessungen und des fertigen Detektors vorgestellt werden.

Kapitel 2

Das H1–Experiment

Am HERA-Ringbeschleuniger gibt es zwei Wechselwirkungspunkte an denen Elektronen oder Positronen auf Protonen treffen. Um diese beiden Punkte herum wurden zwei Detektoren aufgebaut mit dem Ziel, möglichst viele bei den Kollisionen entstehende Teilchen nachzuweisen. Im Süden des Ringes wurde das ZEUS Experiment aufgebaut, im Norden der H1 Detektor. Die Anordnung der Experimente ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Da die Energie von Protonen mit 920 GeV (bis 1998: 820 GeV) und der Elektronen mit 27.5 GeV nicht gleich ist, sind auch die Detektoren um die Wechselwirkungspunkte herum nicht symmetrisch. Die Einfallsrichtung der Protonen wird als "Vorwärtsrichtung" bezeichnet, analog die Elektroneneinfallsrichtung als "Rückwärtsrichtung". Da in den Vorwärtsbereich mehr Teilchen einfallen, ist dieser in einer größeren Tiefe mit Detektoren bestückt als der Zentral- oder der Rückwärtsbereich. Zu erkennen ist das auf Bild 2.2. Auf dieser Schnittzeichnung treten die Elektronen von links in den Detektor ein, die Protonen von rechts. Die Reaktionen finden am "Wechselwirkungspunkt" in der Mitte der zentralen Spurkammern statt. Auf dem Bild ist er rechts neben dem Bezeichner $\boxed{2}$ zu finden. Das H1-Experiment ist um das Strahlrohr herum in die vier wichtigsten Teildetektoren unterteilt.

Verfolgt man ein geladenes Teilchen, das vom Wechselwirkungspunkt in den Zentralbereich des Detektors fliegt, so durchläuft es nach dem Durchqueren des Strahlrohres die einzelnen aktiven Detektorkomponenten. Diese Komponenten im Zentralbereich des H1 Detektors sind auf Abb. 2.3 aufgeschlüsselt.

- CST (<u>C</u>entral <u>S</u>ilicon <u>T</u>racker)
  Dieser Detektor ist ein Spursystem aus aus 192 Silizium-Halbleiterstreifendetektoren. Die Detektoren sind in zwei Lagen um das Strahlrohr herum angeordnet. Diese Detektoren werden auf beiden Seiten ausgelesen. Die Streifen auf der Rückseite sind senkrecht zu denen auf der Vorderseite angeordnet. Auf diese Weise liefert jeder Detektor sowohl eine z-, als auch eine Φ-Information über den Ort des Teilchendurchgangs. Der Abstand der Auslesestreifen beträgt auf der Φ-Seite $50\,\mu$m

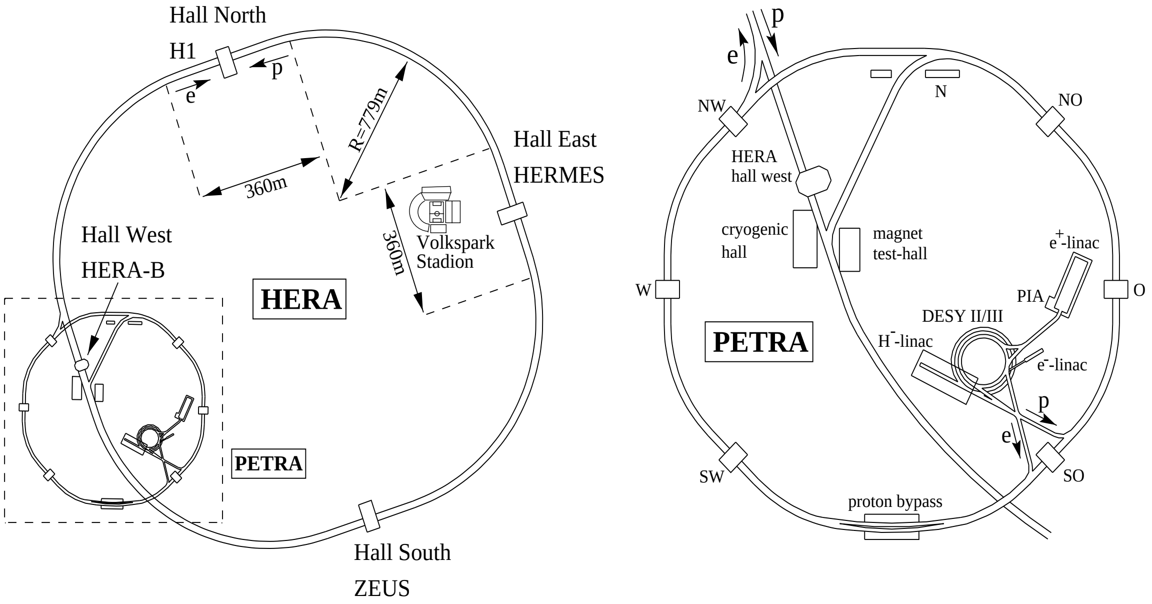

Abbildung 2.1: Übersicht der Beschleunigeranlagen am DESY. Das Bild dokumentiert den Zustand vom Herbst 1998: Die Nord- und Westtribüne des Volksparkstadions werden 1999 abgerissen und erneuert.

und auf der z-Seite 88 μm. Der CST wurde zur Verbesserung der Spurauflösung und Vertexbestimmung 1995 eingebaut. Für den CST wurde der Auslesechip APC128[1] entwickelt, der auch im VLQ Spursystem verwendet wird. Auf den CST wird in Kapitel 5 noch näher eingegangen.

- CJC 1 und CJC 2 (Central Jet Chamber)
  Die zentralen Spurkammern CJC 1+2 sind Vieldraht-Driftkammern. Die beiden Teile sind durch die COZ und COP getrennt. Die Drähte in den CJCs sind parallel zum Strahlrohr gespannt, sie haben daher eine gute Auflösung für die Spurbestimmung in der r-Φ Ebene. Zur Bestimmung der Spurparameter in z-Richtung dienen die CIZ und COZ (Central Inner Z-Drift Chamber und Central Outer Z-Drift Chamber). Zur Bildung von zentralen Spurtriggersignalen gibt es innerhalb der CJC 1 und zwischen CJC 1 + 2 jeweils eine Proportionalkammer (CIP und COP, Central Inner/Outer Proportional chamber). Die gesamten Spursysteme sind von einem Solenoidmagneten umgeben, daher ist es möglich durch die Bestimmung der Krümmung der Teilchenspuren auch die Impulse der Teilchen zu bestimmen.

- Flüssigargonkalorimeter (LAr, Liquid Argon Calorimeter)

[1] Analog Pipeline Chip für 128 Kanäle[22]

Das Flüssigargonkalorimeter hat die Aufgabe Elektronen, Photonen und Hadronen zu stoppen und die von ihnen deponierte Energie zu messen. Bei diesem Kalorimeter handelt es sich um ein “Sampling Kalorimeter”. Das bedeutet, daß sich Absorber- und aktives Material im Kalorimeter abwechseln. Als Absorber dient im elektromagnetischen Teil Blei und im hadronischen Teil Stahl. Zwischen den Absorberplatten befinden sich die LAr Zellen, die dort deponierte Ladung wird an der Oberfläche von kupferbeschichteten Leiterplatten gesammelt und ausgelesen. Das aktive Medium Flüssigargon verlangt einen besonderen Aufwand zur Kühlung und Abschirmung des Kalorimeters gegen die anderen Detektorkomponenten. Dazu sind die beiden Teile des Kalorimeters, der elektromagnetische und der hadronische zusammen in einen Kryostaten eingebaut. Zur Triggerung verfügt das Liquid Argon Kalorimeter über ein zweites, schnelles Auslesesystem zur Bildung von Triggersignalen.

Geladene Teilchen, die im Kalorimeter nicht gestoppt worden sind, durchqueren nach dem Kalorimeter die supraleitende Spule, die in ihrem Inneren ein Magnetfeld von 1,2 T erzeugt.

- Myonkammern und Eisenjoch
  Außerhalb der Spule befindet sich ein Eisenjoch, das den magnetischen Fluß führt. In Schlitzen zwischen den Eisenplatten sind Driftkammern und Triggerelemente eingebaut. Da bis auf Myonen alle Teilchen im Kalorimeter gestoppt werden, dienen diese Kammern dem Myonennachweis.

Neben diesen zentralen Detektorkomponenten gibt es noch einige weitere wichtige Komponenten:

Der Rückwärtsbereich ist auf Abbildung 2.3 zu sehen. Teilchen, die in diesen Bereich fliegen, werden von diesen Detektoren gemessen. Spuren werden vom BST (Backward Silicon Detector) und der BDC (Backward Drift Chamber, Driftkammer) bestimmt, die Energie der Teilchen wird im SpaCal (Spaghetti Calorimeter, elektromagnetisches und hadronisches Kalorimeter) gemessen.

Hinter dem SpaCal ist das VLQ Spektrometer (Very-Low Q^2, eine Kalorimeter- Spursystem Kombination zur Messung sehr kleiner Impulsüberträge Q^2) eingebaut, auf dessen Aufbau und Komponenten in Kapitel 3 näher eingegangen wird.

Schon im Bereich des Tunnels von HERA ist das Lumi-System zu finden. Es dient zur Bestimmung der Luminosität mit dem Bethe-Heitler Prozeß. Diese Messung wird als Referenz für alle Messungen von Wirkungsquerschnitten in der e-p Streuung benötigt.

Im Vorwärtsbereich ist ein weiteres Spursystem (FTD) eingebaut. Die kleine Lücke zwischen LAr-Kalorimeter und der Strahlröhre ist durch das Plug- Kalorimeter abgedeckt. Als Zusatz zum instrumentierten Eisen des Myonsystems ist in Vorwärtsrichtung ein weiteres Myonsystem mit einem eigenen Magneten installiert (FwdMyon). Aufgeschlüsselt sind die Detektorkomponenten auf Bild 2.2 zu sehen.

Die Datennahme (DAQ, Data Acquisition) des H1 Experimentes wurde eigens für H1 und die einzelnen Detektorkomponenten entwickelt. Sie ist auf die Bunchcrossing-Frequenz von 10.4 MHz, was einem Zeitabstand von 96 ns entspricht, abgestimmt. Die Bunchcrossing-Frequenz gibt an, wie häufig sich zwei Teilchenpakete am Wechselwirkungspunkt kreuzen. Auf die DAQ für den Silizium-Zweig, der alle Daten der Halbleiterstreifendetektoren verarbeitet, wird in Kapitel 5.5 noch etwas detaillierter eingegangen.

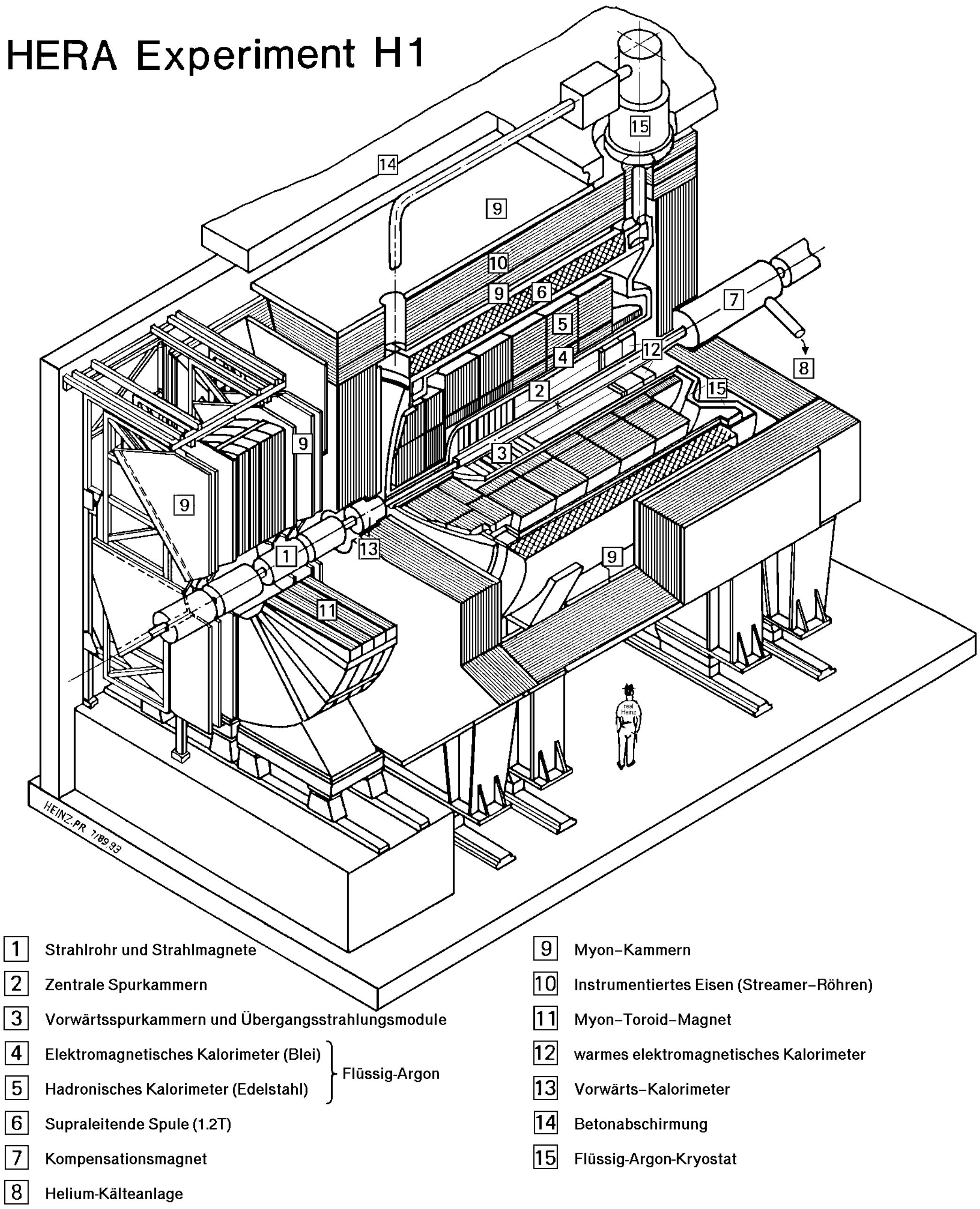

Abbildung 2.2: Das übliche Detektorbild. Es gibt in der Kollaboration kein Bild mit den momentan eingebauten Detektorkomponenten. Daher sind SpaCal, BDC, CST, BST und VLQ hier nicht zu sehen.

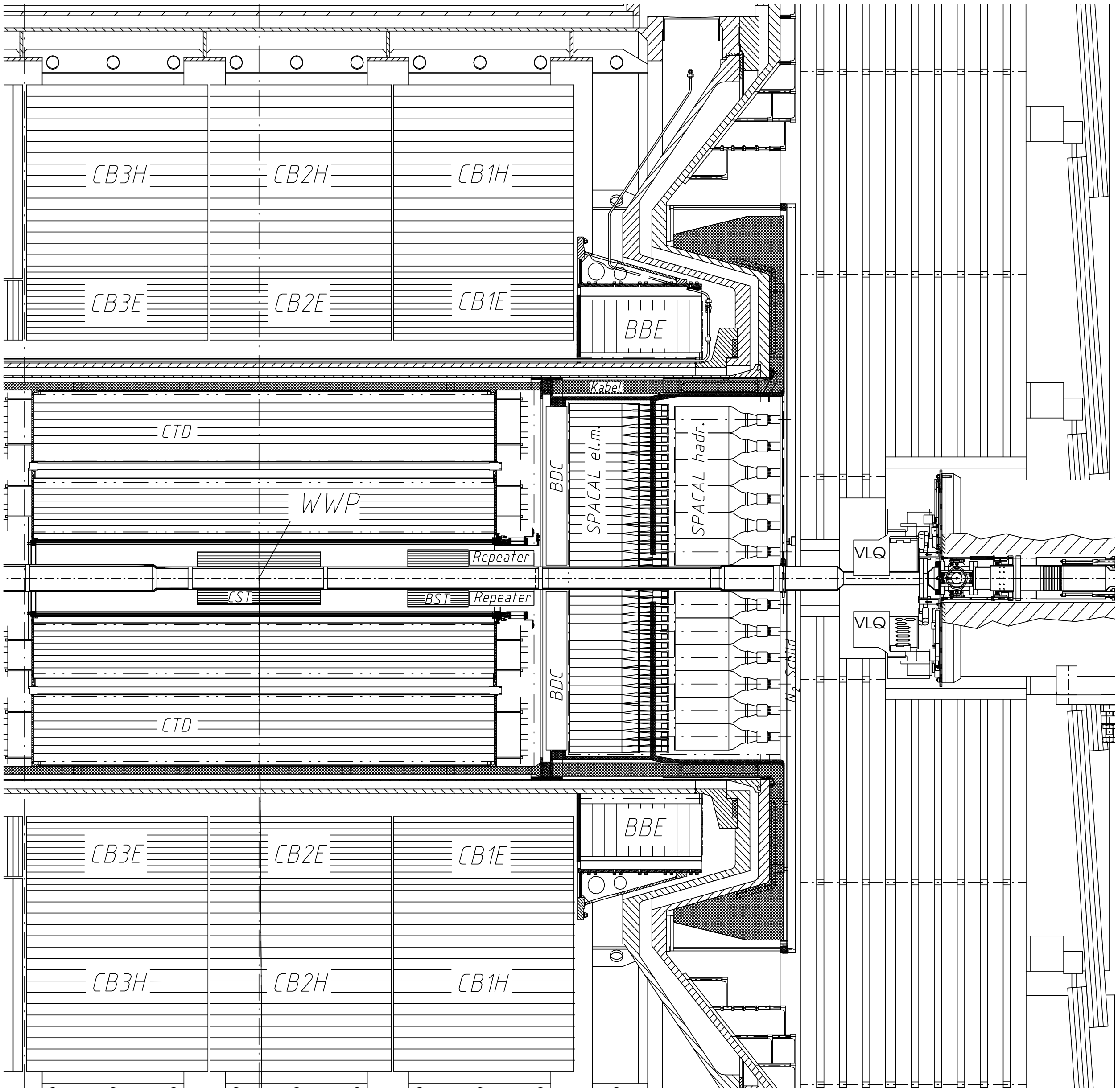

Abbildung 2.3: Aktuelle Schnittzeichnung des Rückwärtsbereiches des H1-Experimentes. Das VLQ Spektrometer ist rechts am Kompensatormagneten zu sehen. Vergrößert ist dieser Bereich auf Bild 3.1 dargestellt.

Kapitel 3

Das VLQ Spektrometer

Der VLQ Detektor ist eine Ergänzung zum H1 Experiment. Anders als viele andere Detektoren im H1 Experiment ist der VLQ Detektor nicht nach der Bauform oder dem Ort benannt, sondern nach dem abgedeckten Bereich in der kinematischen Ebene. Dieser Bereich ist der sehr kleiner Impulsüberträge Q^2 (Very Low Q^2). In Kapitel 4 ist die kinematische Ebene genauer beschrieben.

Der Detektor besteht aus zwei Teildetektoren, dem Kalorimeter und dem Spursystem. Detailliert sind beide Teile in dem Proposal zum Bau des VLQ beschrieben [1]. Das VLQ Spektrometer ist in zwei identische Module aufgeteilt, die beweglich ober- beziehungsweise unterhalb des Strahlrohres angebracht sind (siehe Abbildung 3.1). Solange die Strahlbedingungen nicht stabil sind, tritt an der Position an der das VLQ Spektrometer messen kann, eine hohe Rate ionisierender Teilchen und Strahlung auf. Diese Teilchen könnten hauptsächlich während der Beschleunigungsphase die beiden Komponenten des VLQ beschädigen. Daher ist die bewegliche Mechanik notwendig, um den Detektor in dieser Phase aus der Gefahrenzone zu entfernen. Dieser Schutz wird durch eine größere Entfernung vom Strahlrohr und das instrumentierte Eisen des Rückflußjochs geboten.

Durch das "Parken" des Spektrometers gehen keine Luminositätsdaten verloren, da Messungen mit dem VLQ nur bei stabilen Strahl- und Untergrundbedingungen möglich sind, also wenn der Detektor in Meßposition sein kann.

Eine weitere Quelle für unerwünschte Untergrundereignisse ist Synchrotronstrahlung. Sie entsteht wenn der Elektronenstrahl abgelenkt wird. Um den Elektronenstrahl und den Protonenstrahl an den Wechselwirkungszonen zusammenzuführen und bei der letzten Fokussierung werden beide Strahlen abgelenkt, was zu Synchrotronstrahlung im Experiment führt. Um den Zentralbereich des Experimentes vor der Strahlung zu schützen sind im Strahlrohr Kollimatoren angebracht. Die Kollimatoren können die Strahlung nicht vollständig absorbieren, ein Teil wird reflektiert und kann so auch in das VLQ Spektrometer gelangen.

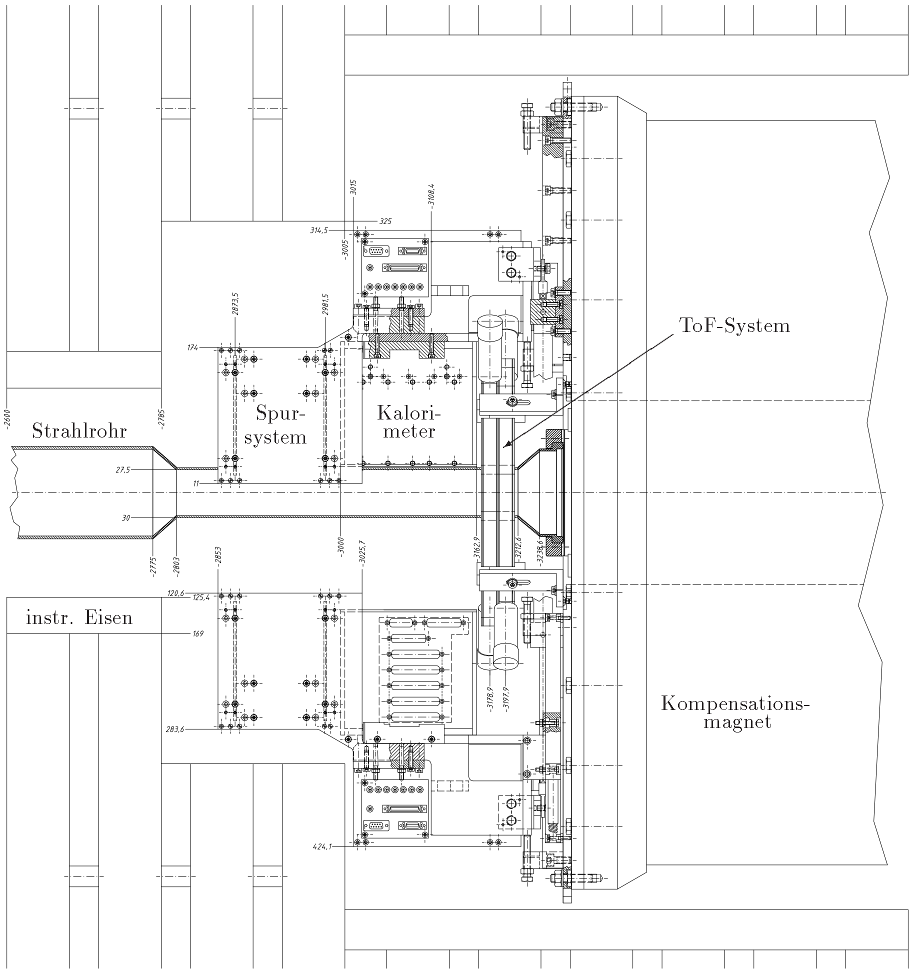

Abbildung 3.1: Schnitt durch den Rückwärtsbereich des H1-Experiments in Seitenansicht.

Über das genaue Ausmaß dieser Strahlenbelastung ist nichts bekannt, daher wird erst eine Studie der Hintergrundereignisse genauen Aufschluß über die Strahlenbelastung ergeben.

3.1 Das Kalorimeter

Das Kalorimeter ist ein "Sandwich"-Kalorimeter, dessen Absorbermaterial Wolfram ist, das aktive Volumen wird von Plastikszintillatoren gebildet. Auf eine Lage Absorber folgt je eine Lage aktives Material. Zwei aufeinanderfolgende Szintillatorlagen sind abwechselnd in horizontaler und vertikaler Richtung angeordnet und ermöglichen eine

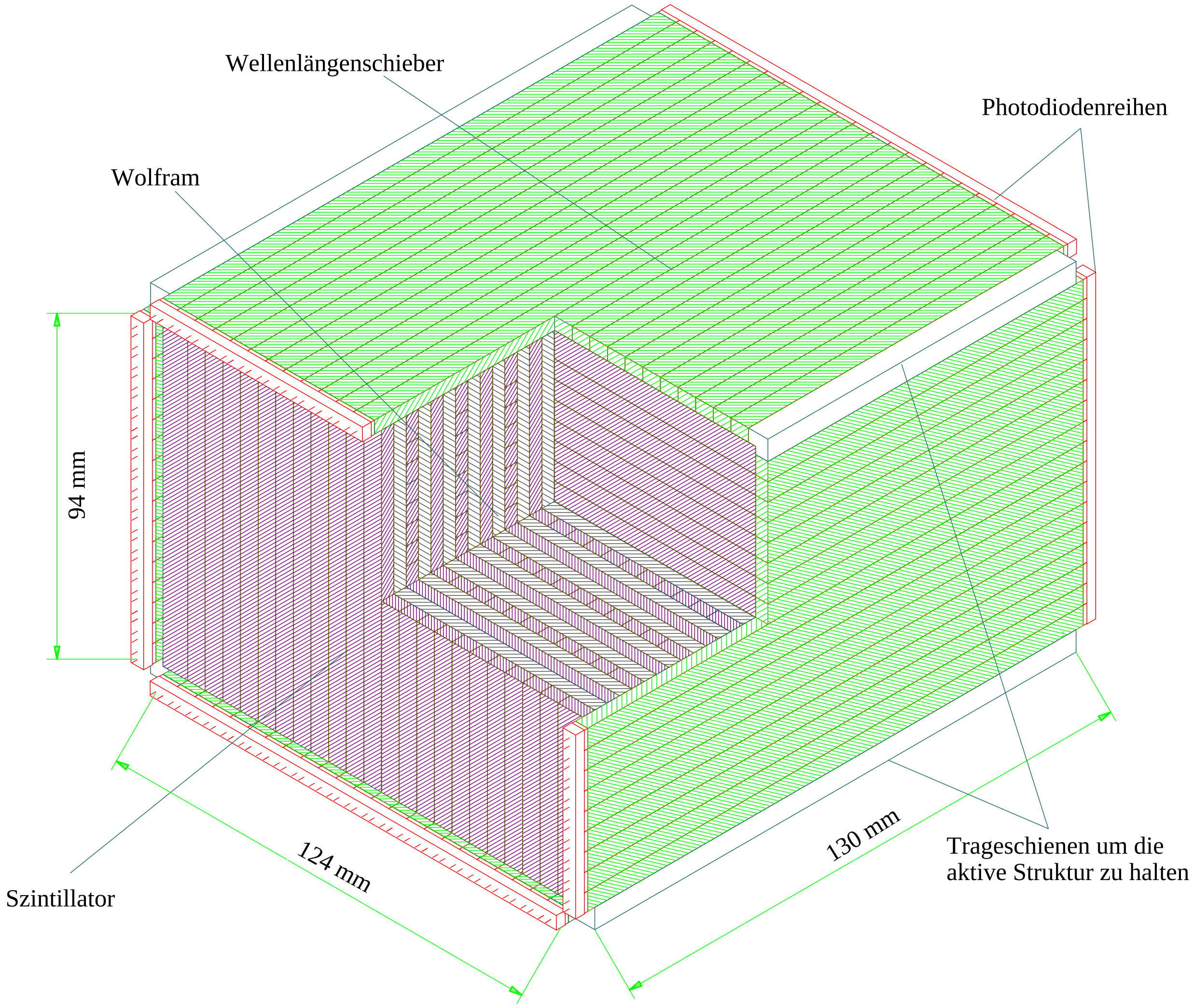

Abbildung 3.2: Schematische Ansicht eines Kalorimetermoduls. Die Elektronen treffen von links auf das Modul auf. Die Elektronik ist oberhalb und auf der rechten Seite hinter dem Kalorimeter angebracht. Die Absorberplatten aus Wolfram sind als helle Streifen in der herausgeschnittenen Ecke zu erkennen. Dazwischen sind abwechselnd horizontale und vertikale Szintillatorstreifen zu erkennen (Aus [6]).

Auslese in x- bzw. y-Richtung. Die Auslese erfolgt dabei über Wellenlängenschieber, die das Licht aller Szintillatorstäbe einer horizontalen- und vertikalen Position und Ausleserichtung sammeln und an zwei Photodioden weitergeben. Die Wellenlängenschieber ändern dabei die Farbe der gesammelten Lichtquanten von blau zu grün. Durch die Lichtsammlung eines Szintillators an zwei Seiten kann man den direkten Treffer eines Teilchens in eine Photodiode wirksam unterdrücken indem man von beiden Photodioden ähnliche Signale fordert. Der Aufbau eines Kalorimetermoduls ist auf Abb. 3.2 skizziert.

In Teststrahlversuchen am DESY 1997 wurden beide Kalorimetermodule mit Elektronen mit Energien zwischen 2 GeV und 6 GeV getestet. Mit diesen Versuchen konnte die Energie- und Ortsauflösung der Kalorimeter bestimmt werden. Folgende Formel parametrisiert die Energieauflösung der Module:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{19 \pm 6\%}{\sqrt{E/\mathrm{GeV}}}\right)^2 + (6.4 \pm 3\%)^2 + \left(\frac{0.234 \pm 0.009\ \mathrm{GeV}}{E}\right)^2}$$

Die Ortsauflösung wurde zu ≤ 1 mm für $E \geq 4$ GeV bestimmt.

Die Güte der Energieauflösung konnte trotz der Verunreinigung des Elektronenstrahls im Teststand in der Größenordnung der simulierten Auflösung bestimmt werden. Die Verunreinigung des Strahls ist auf Abbildung 3.3 zu sehen. Durch ein Vakuumleck in den letzten Metern der Strahlführung des Teststandes waren die austretenden Elektronen nicht monoenergetisch. Dies konnte auch in den Testdaten des Spursystems beobachtet werden, siehe dazu Kapitel 7.

3.2 Das Spursystem

3.2.1 Der Spurdetektor

Das Spursystem des VLQ Detektors besteht in jedem Modul aus zwei Doppellagen mit Halbleiterstreifendetektoren. Jede dieser Doppellagen ist mit einer Lage zur Bestimmung des Ortes eines Teilchendurchganges in horizontaler und vertikaler Richtung bestückt. Die Bestückung der einzelnen Lagen ist auf Abbildung 3.4 zu sehen.

Anders als in der ursprünglichen Planung vorgesehen, wird im jetzt eingebauten VLQ Spursystem nur ein Detektortyp mit einer Geometrie eingesetzt. In der Planung des Spursystems waren zwei unterschiedliche Detektorgeometrien für die horizontale bzw. die vertikale Ortsbestimmung vorgesehen. Die Notwendigkeit für zwei unterschiedliche Formen war durch die Geometrie der aktiven Fläche bestimmt. Zur Herstellung dieser unterschiedlichen Detektoren sind zwei Masken notwendig, das macht den Produktionsprozeß komplizierter. Dies war jedoch nicht der entscheidende Hinderungsgrund

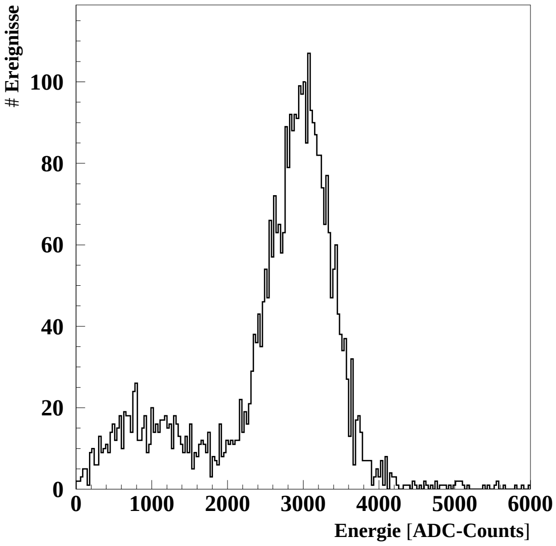

Abbildung 3.3: Verteilung der Elektronenenergie im Elektronenstrahl bei den Testmessungen im Dezember '97. Es war eine nominelle Strahlenergie von 4 GeV eingestellt. Die Daten wurden mit dem VLQ Kalorimeter gemessen und sind nicht kalibriert. Die Untergrundereignisse wurden durch ein Vakuumleck im Konversionstarget verursacht (Aus [6]).

für den Einsatz von GaAs-Detektoren. Die Verarbeitung von GaAs ist um einiges schwieriger als die von Silizium. Das liegt zum einen an der Brüchigkeit dieses Materials, zum anderen daran, daß es schwierig ist Firmen zu finden, die dieses Material in kleinen Serien bearbeiten. Letzteres hat bei der vorgesehenen Produktion von GaAs-Detektoren zu Verzögerungen geführt, ersteres leider dazu, das nicht ausreichend viele Detektoren für einen Einsatz im Rahmen des VLQ Projektes zur Verfügung standen.

Da keine GaAs-Detektoren einsetzbar waren, wurde kurzfristig auf einen bewährten Silizium-Detektor zurückgegriffen. Dieser Detektortyp[2] wurde für den CST Vertexdetektor entwickelt und ist dort seit 1995 im Einsatz. Dieser Detektor hat eine aktive Fläche von 3.195 cm $\times$5.623 cm.

Da jetzt nur noch eine Detektorgeometrie zur Verfügung stand, konnte nicht die gesamte Fläche des Kalorimeters von 94 mm $\times$ 124 mm mit aktivem Material versehen werden. Es ist nur möglich die gesamte Breite des Kalorimeters abzudecken. In der Höhe fehlen bei den Lagen mit horizontalen Streifen 4.8 cm, bei den mit vertikalen Streifen 1 cm über die gesamte Breite (Siehe Abbildung 3.4). Ein Teil der entstandenen Akzeptanzlücke bei den horizontalen Streifen kann später noch von zwei weiteren Detektoren, oberhalb der beiden in Abbildung 3.4a zu sehenden, abgedeckt werden.

Der Verlust eines Teils der aktiven Fläche ist hinzunehmen, da der obere Teil des vorgesehenen Akzeptanzbereiches des VLQ Spektrometers ohnehin nicht zugänglich ist. Dieser Bereich wird vom "SpaCal-Insert", einem Teil des SpaCal Kalorimeters

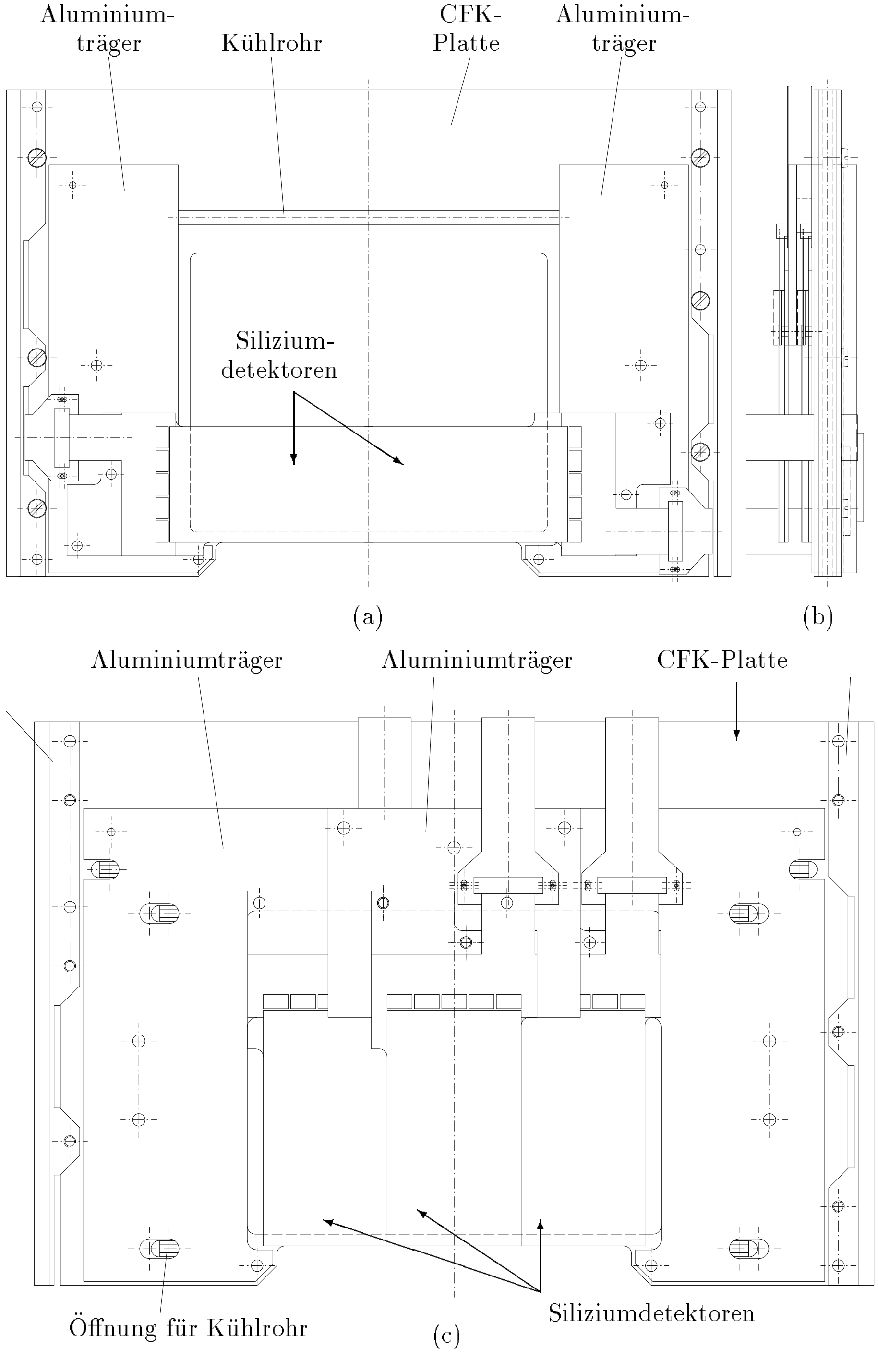

Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau einer vollständig montierten Doppellage des Spursystems. (a) Vorderansicht, (b) Seitenansicht und (c) Rückseite. In einem Modul stehen sich die beiden Rückseiten (c) gegenüber, die Vorderseiten (a) zeigen nach außen.

nahe des Strahlrohres, verdeckt.

Um den vollen, vorgesehenen Akzeptanzbereich des VLQ Spektrometers zu erreichen, müßte das SpaCal-Insert ausgebaut werden. Da das Spursystem nicht die volle Akzeptanz erreicht und der VLQ Detektor bisher noch keine überzeugenden Daten geliefert hat, ist die Modifikation des SpaCal unwahrscheinlich geworden.

Anders als beim CST wird im VLQ Spursystem die niedriger auflösende Seite nicht ausgelesen. Diese als "n-Seite" bezeichnete Seite hat einen Streifenabstand von 88 μm, während die "p-Seite" 1280 Streifenimplantate in einem Abstand von 25 μm hat, von denen jeder zweite ausgelesen wird.

Mit 20 Detektoren von diesem Typ wurden 20 VLQ Detektormodule gebaut. Diese Module bestehen aus einer CFK Trägerplatte (Carbon Fibre Komposit), dem "Hybriden" mit der Ausleseelektronik und Anschlußkabeln um die Verarmungsspannung für die Detektoren anlegen zu können. Der Si-Detektor wird auf den CFK-Träger aufgeklebt. Um die Detektoren beim Bonden der Anschlussdrähte für die Auslesekanäle nicht zu sehr zu belasten und um Spannungen zwischen CFK Träger und Detektormaterial zu verhindern, ist zwischen Detektor und Träger eine Schicht aus Airex, einem geeigneten Schaumstoffmaterial eingebracht. Der Hybrid enthält die gesamte Frontendelektronik. Auf diesem Baustein werden die Daten analog in einer Pipeline mit einer Tiefe von 32 Ereignissen zwischengespeichert und im Falle einer positiven Triggerentscheidung streifenweise nacheinander analog ausgelesen, verstärkt und zur Digitalisierung an die folgende Elektronik abgeschickt. Jedes dieser 20 Detektormodule hat eine aktive Fläche von 3.195 cm $\times$5.623 cm.

Die Details der Komponenten des Spursystems des VLQs sind in Kapitel 6 ausgeführt. Dort wird auch genauer auf die Aufgaben eines Slow-Control Systems eingegangen und die Datenflüsse des Systems erklärt.

3.2.2 Die Auslese

Auf Abbildung 3.5 ist die Auslesekette des VLQ Spursystems skizziert. Ein Modul des VLQ Spursystems besteht aus 10 Detektoren, die zwei Doppellagen bilden. Jede dieser Doppellagen wird über ein Subrepeatermotherboard ausgelesen. Ein Subrepeatermotherboard ist jeweils einem OnSiRoC zugeordnet, die Detektoren werden daher in vier Kanäle eingeteilt und aus vier getrennten Kanälen mit Spannungen versorgt.

Auf dem Subrepeatermotherboard ist für jeden Kanal Platz für einen Subrepeater. Die Subrepeater haben die Aufgabe die Spannungen, die vom OnSiRoC über die Konverterkarte kommen zu stabilisieren und aus den +5 V der Digitalspannung eine weitere Versorgungsspannung von -5 V für die Hybriden zu erzeugen. Jeder Subrepeater enthält darüberhinaus einen Leitungstreiber, der die Ausgangssignale der Hybriden verstärkt. Diese weitere Verstärkung dient dazu die Signalverluste auf dem

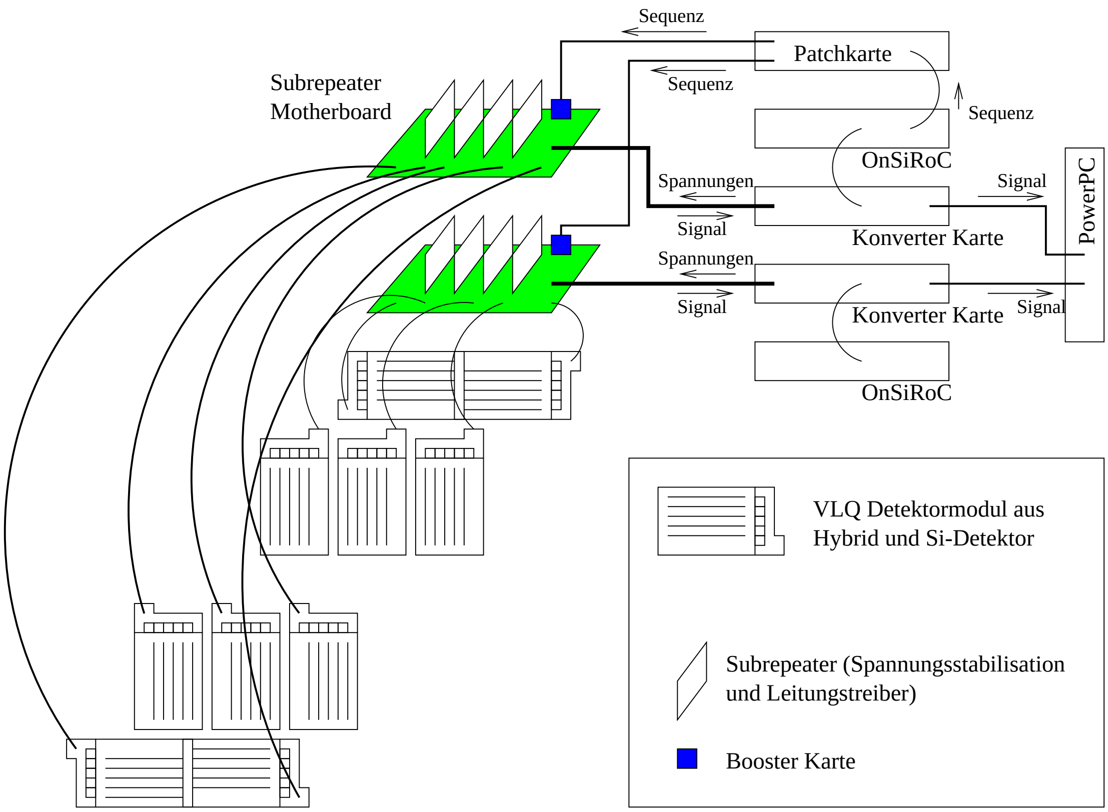

Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Auslese eines Moduls des VLQ Spursystems

20 m langen Kabelweg vom Detektor zu der Ausleseelektronik auszugleichen.

Auf dem Subrepeatermotherboard wird das ankommende Steuersignal (Sequenz) auf die vier Kanäle verteilt. Dieses Signal wird vorher auf der Boosterkarte verstärkt.

Die Signale der 640 Streifen eines Detektors werden nacheinander, gesteuert durch die Sequenz, über eine differentielle Signalleitung an das Subrepeatermotherboard abgeschickt. Da nur vier Kanäle vorhanden sind, aber fünf Detektoren pro Doppellage ausgelesen werden müssen, wird ein Detektor, nachdem der Auslesezyklus für die ersten vier Detektoren ("early") abgeschlossen ist, mit einem weiteren Auslesezyklus ausgelesen ("late"-Detektor). Die Signale der vier Kanäle werden über das 50polige Kabel an die Konverterkarte geschickt. In der Konverterkarte werden Signale und Spannungsversorgung getrennt. Die Spannungen werden von den OnSiRoCs erzeugt, von dort gelangen sie durch 5 m lange Kabel in die Konverterkarten.

Die Signale werden in den Konverterkarten durch eine weitere Verstärkerschaltung an das Eingangsniveau der PowerPCs angepaßt. Diese Anpassung erfolgt für jeden Kanal durch eine Einstellung der Verstärkung und des Pegels mit je einem Potentiometer. Schließlich gelangen die Signale eines Moduls in einen PowerPC, wo sie Programmgesteuert digitalisiert werden. Nach der Digitalisierung wird die Trefferidentifikation (siehe auch Abschnitt 7.2.1) auf die Daten angewandt. Anschließend werden die gefundenen Trefferdaten in die zentrale H1 Datennahme kopiert und auf Band geschrieben.

3.3 Akzeptanzbereich

Der zugängliche Winkelbereich für das VLQ Kalorimeter im H1 Koordinatensystem bestimmt sich wie folgt:

$$\boxed{\Theta^{e'}_{\text{Kalo,max}} = 177.4^\circ \qquad \Theta^{e'}_{\text{Kalo,min}} = 179.2^\circ.}$$

Bei der Berechnung dieser Winkel wurde angenommen, daß der Wechselwirkungspunkt bei $z = 0$ mm und $x = y = 0$ mm im H1 Koordinatensystem liegt. Der maximale Winkel ist für das VLQ nur zugänglich, wenn das SpaCal-Insert den oberen Teil des VLQ Spektrometers nicht mehr abdecken würde.

Die Winkel im Kalorimeter sind so angenommen, daß das Elektron 5 mm entfernt vom Rand des aktiven Materials auftrifft. Bei diesem Abstand ist eine Energierekonstruktion mit einer Genauigkeit von 85% sichergestellt.

Das Spursystem hat folgende Grenzwinkel für das gestreute Elektron:

$$\boxed{\Theta^{e'}_{\text{Tracker,max}} = 178.35^\circ \qquad \Theta^{e'}_{\text{Tracker,min}} = 179.34^\circ.}$$

Der minimale Winkel ist dabei jeweils in der Mitte des Detektors angelegt, der maximale Winkel oben rechts bzw. links. Es wurden dabei die Winkel ausgewählt, deren Spuren noch durch beide Lagen des Spursystems gehen.

Kapitel 4

Physikalische Ereignisse im VLQ Detektor

Mit dem H1 Detektor werden die Eigenschaften der e-p Streuung untersucht. Vor dem Bau des HERA Speicherringes gab es nur Untersuchungen dieses Streuprozesses mit Elektronen an ruhenden Protonen ("fixed target"). Bei HERA steht, bedingt durch die größere zur Verfügung stehende Schwerpunktsenergie als bei einem fixed target Experiment, ein wesentlich größerer Auflösungsbereich zur Verfügung.

Die Besonderheit der e-p Streureaktion ist, daß ein ausgedehntes Teilchen, das Proton, mit einem punktförmigen, dem Elektron, untersucht wird. Bei der Streuung dieser beiden Teilchen aneinander werden die Bestandteile des Protons, die Quarks, aufgelöst. Die Untersuchung der Elektron-Proton Reaktion ermöglicht daher auch das Studium der QCD, der Wechselwirkung von farbigen Teilchen in der starken Wechselwirkung.

Ein wesentlicher Aspekt der e-p Streuung ist die Untersuchung der γ^*-p Streuung. Bei hinreichend kleinen Massen des virtuellen Austauschteilchens kann der größte Teil der e-p Ereignisse auf diese Reaktion zurückgeführt werden. Diese Betrachtung erlaubt es die Struktur des Protons in einem weiten Auflösungsbereich zu studieren. Da das Auflösungsvermögen umgekehrt proportional zur Skala des Prozesses $|Q^2|$ ist, können bei großen Q^2 die Partonen im Proton aufgelöst werden. Bei kleinen $Q^2 \approx 0$ geht das Proton als ganzes in die Reaktion ein. Mit dem VLQ Spektrometer wird der interessante Übergangsbereich zwischen diesen beiden Regionen untersucht.

4.1 Die Kinematik der Elektron-Proton Streuung

Bei den HERA Experimenten H1 und ZEUS werden Elektronen und Protonen aus entgegengesetzter Richtung aufeinander geschossen. Dabei haben in der Runperiode

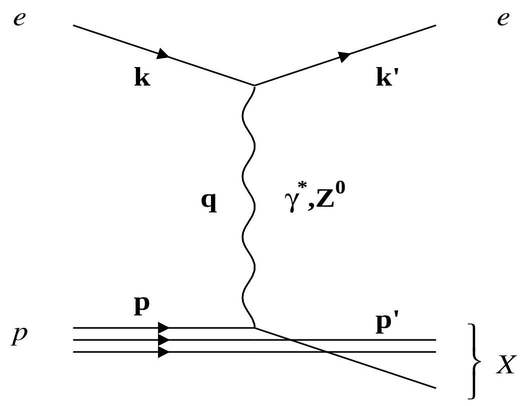

Abbildung 4.1: Feynmandiagramm niedrigster Ordnung einer neutralen Strom-Reaktion der Elektron-Proton Streuung. Der Vierervektor p' beschreibt Energie und Impuls des gesamten hadronischen Endzustandes X.

1998 die Elektronen eine Energie von 27.5 GeV, die Protonen 920 GeV. [1]

Allgemein ist die Reaktionsgleichung der e-p Streuung mit einem neutralen Austauschboson so aufzuschreiben:

$$e + p \to e + X.$$

In Abbildung 4.1 ist der Feynmangraph der inelastischen e-p Streuung in einer neutralen Stromreaktion in niedrigster Ordnung aufgetragen. Die fettgedruckten Buchstaben geben die Vierervektoren der beteiligten Teilchen an. Mit Hilfe dieser Vierervektoren lassen sich folgende Lorentz-invariante kinematische Variablen definieren:

[1] Diese Energien gelten nur für die Runperiode 1998, vorher wurde mit anderen Teilchenenergien und Positronen anstatt von Elektronen gemessen.

$Q^2 = -(k-k')^2 = -q^2,$	die invariante Masse des virtuellen Austauschteilchens
$s = (k+p)^2,$	das Quadrat der Schwerpunktsenergie des e-p Systems
$x_{\mathrm{Bj}} = \dfrac{Q^2}{2\,p\cdot q},$	Bjorken-Skalenvariable – interpretierbar als Impulsbruchteil des getroffenen Quarks im Proton[2]
$y = \dfrac{p\cdot q}{p\cdot k} = \dfrac{E-E'}{E},$	Inelastizität des Elektrons im Protonruhesystem
$W^2 = (p+q)^2.$	Quadrat der invarianten Masse des hadronischen Endzustandes X

Wenn man die Massen der beteiligten Teilchen vernachlässigt[3], gilt zusätzlich

$$\begin{aligned} Q^2 &= s\, x_{Bj}\, y, \\ W^2 &= \frac{1-x_{Bj}}{x_{Bj}}\, Q^2, \\ s &= (k+p)^2 = 2\,k\cdot p = 4\,E_e\,E_p. \end{aligned}$$

Die Kinematik eines Ereignisses ist durch zwei der oben eingeführten Variablen bei festem s definiert. Um diese Variablen aus den Meßgrößen zu erhalten, gibt es verschiedene Methoden der kinematischen Rekonstruktion. Im kinematischen Bereich des VLQ Detektors ist dazu am besten die Elektronmethode geeignet. Bei dieser Methode wird aus den Meßwerten E'_e, der Energie des gestreuten Elektrons und Θ'_e, dem Elektron-Streuwinkel, Q^2 und x_{Bj} bestimmt

$$\begin{aligned} Q^2_e &= 4\,E_e E'_e \cos^2\frac{\Theta'_e}{2}, \\ y_e &= 1 - \frac{E'_e}{E_e}\sin^2\frac{\Theta'_e}{2}, \\ x_{Bj,e} &= \frac{Q^2_e}{s\,y_e} = \frac{E'_e\,\cos^2\frac{\Theta'_e}{2}}{E_p(1-\frac{E'_e}{E_e}\sin^2\frac{\Theta'_e}{2})}. \end{aligned}$$

Neben der Elektronmethode gibt es noch die Methoden von Jacquet-Blondel, die Σ-Methode und die Doppelwinkelmethode zur Rekonstruktion der Ereigniskinematik. Jede dieser Methoden ist für eine bestimmte Art von Ereignissen oder in einem Teilbereich der kinematischen Ebene besonders geeignet. Hier soll aber nicht weiter auf diese Methoden eingegangen werden (siehe dazu z. B.: [7]). Da im weiteren davon

[2] Diese Betrachtung gilt im infinite momentum frame. In diesem Bezugssystem bewegt sich das Proton mit unendlichen Impuls

[3] Die Massen der beteiligten Teilchen werden im folgenden immer vernachlässigt. Es wird wie in der Hochenergiephysik üblich $\hbar = c = 1$ gesetzt

ausgegangen wird, daß die Kinematik mit der Elektronmethode aus den Meßwerten des VLQ rekonstruiert wurde, wird auf den Index e verzichtet.

Mit zwei dieser kinematischen Variablen und deren Abhängigkeiten von den Meßgrößen E'_e und Θ'_e nach der Elektronmethode kann man sich einen Überblick über die kinematische Ebene der e-p Streuung bei HERA verschaffen. Zu diesem Zweck werden in die $x_{\rm Bj} - Q^2$ Ebene Kurven bei festen Werten von E'_e oder Θ'_e eingezeichnet, um die Zusammenhänge der Variablen zu veranschaulichen. Abbildung 4.2 zeigt die $x_{\rm Bj} - Q^2$ Ebene bis herunter zu $Q^2 = 1$ MeV^2 mit $E_e = 27.5$ GeV und $E_p = 920$ GeV. In Abbildung 4.3 ist der Bereich $Q^2 < 10$ GeV, der für das VLQ Spektrometer zugänglich ist, aufgetragen. Zusätzlich sind auf diesem Bild einige Linien bei gleichem E'_e eingezeichnet, die im Bereich des kinematischen Peaks bei $E'_e = 27.5$ GeV liegen.

Als "kinematischen Peak" bezeichnet man die Häufung von Ereignissen mit einer gemessenen Elektronenenergie von 27.5 GeV, also von Elektronen, die zwar abgelenkt wurden, jedoch keine Energie verloren haben. Diese Häufung ist bei der e-p Streuung in der Energieverteilung aller Kalorimeter im Rückwärtsbereich zu sehen. Es ist zu erkennen, daß die Auflösung in y und x_{Bj} in diesem Bereich schlecht ist, da kleine Fehler der gemessenen Energie eine große Änderung von x_{Bj} und y zur Folge haben. Die Linien bei konstanten Winkeln bei 177.4°, 178.35°, 179.2° und 179.34° sind die Grenzen des Akzeptanzbereiches des VLQ Spektrometers, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben wurden.

Die Kurven in der kinematischen Ebene werden von diesen Funktionen beschrieben

$$
\begin{aligned}
x_{Bj}(Q^2, y) &= \frac{Q^2}{s\,y}, \\
x_{Bj}(Q^2, \Theta'_e) &= \frac{Q^2}{s - Q^2 \frac{E_p}{E_e}\,\tan^2\frac{\Theta'_e}{2}}, \\
x_{Bj}(Q^2, E'_e) &= \frac{Q^2}{s\,(1 - \frac{E'_e}{E_e}) + Q^2 \frac{E_p}{E_e}}.
\end{aligned}
$$

4.2 Theoretische Grundlagen

In diesem kurzen Abschnitt sollen die beiden wichtigsten theoretischen Ansätze zur Beschreibung des Wirkungsquerschnittes im kinematischen Bereich des VLQ Detektors vorgestellt werden. Dies ist zum einen die Beschreibung der Protonstruktur durch die Strukturfunktionen F_1 und F_2. Im Bereich kleiner Q^2 geht man über zu einer Behandlung, die sich an die Beschreibung mittels eines rein hadronischen Wirkungsquerschnittes anlehnt und den Photon-Proton Subprozess betrachtet.

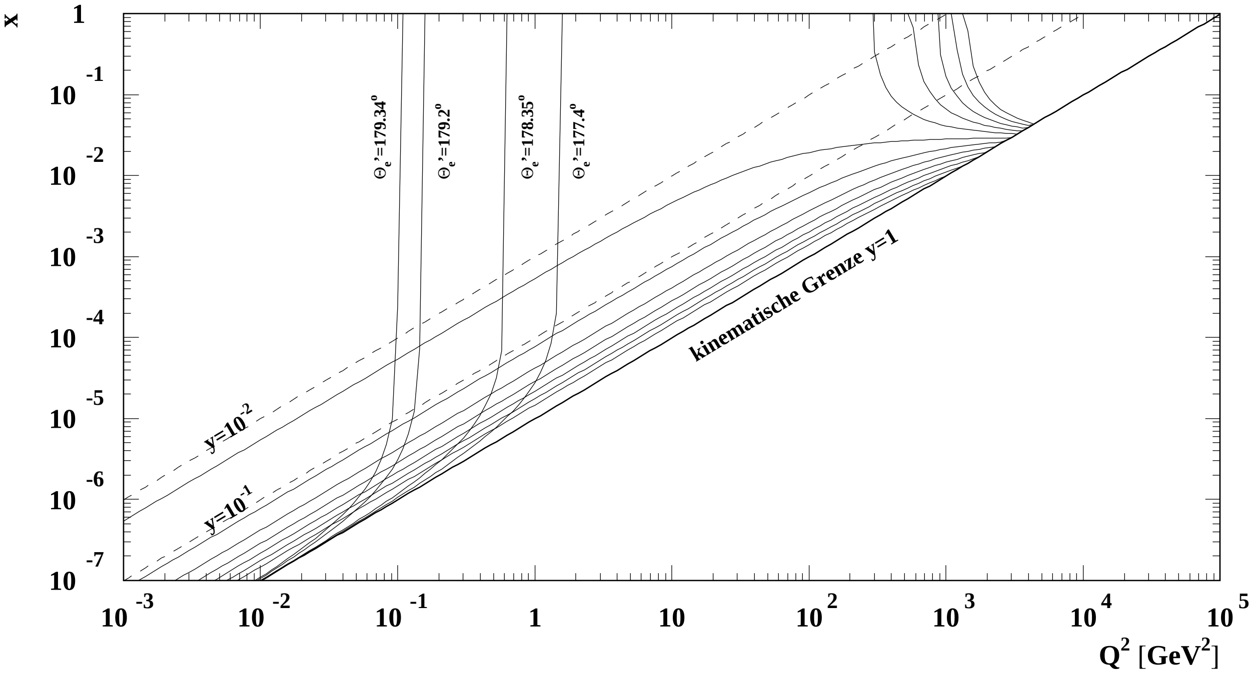

Abbildung 4.2: Übersicht über die kinematische Ebene bei der e-p Streuung. Die nicht bezeichneten Linien zeigen den Verlauf bei konstanter Energie des gestreuten Elektrons. Die Energien sind: $9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 32.5, 35, 37.5$ *und* 40 *GeV. (von unten nach oben. Mit* $E_e = 27.5$ *GeV und* $E_p = 920$ *GeV)*

Die Reaktionsgleichung

$$e + p \rightarrow e + X$$

beschreibt die e-p Streuung für neutrale Ströme, wobei das X einen beliebigen hadronischen Endzustand bezeichnet. Für die Messung des inklusiven e-p Wirkungsquerschnittes spielt die Struktur des X keine weitere Rolle. Geladene Ströme spielen im kinematischen Bereich des VLQ ebensowenig eine Rolle wie die mit dem Austausch eines Z^0. Der Einfluß des Z^0 beschränkt sich auf den Bereich großer $Q^2 \gtrsim M_{Z^0}$.

Bei der Beschreibung des Wirkungsquerschnittes der e-p Streuung mit nicht verschwindenden Q^2 kann das Proton nicht als punktförmig betrachtet werden. Zur Beschreibung des Querschnittes hat sich die Parametrisierung der Protonstruktur mit den Protonstrukturfunktionen F_1 und F_2 durchgesetzt:

$$\frac{d^2\sigma_{ep}}{dx_{\mathrm{Bj}}dy} = \frac{4\pi\alpha^2\, s}{Q^4}((1-y)F_2(x_{\mathrm{Bj}}) + xy^2F_1(x_{\mathrm{Bj}})).$$

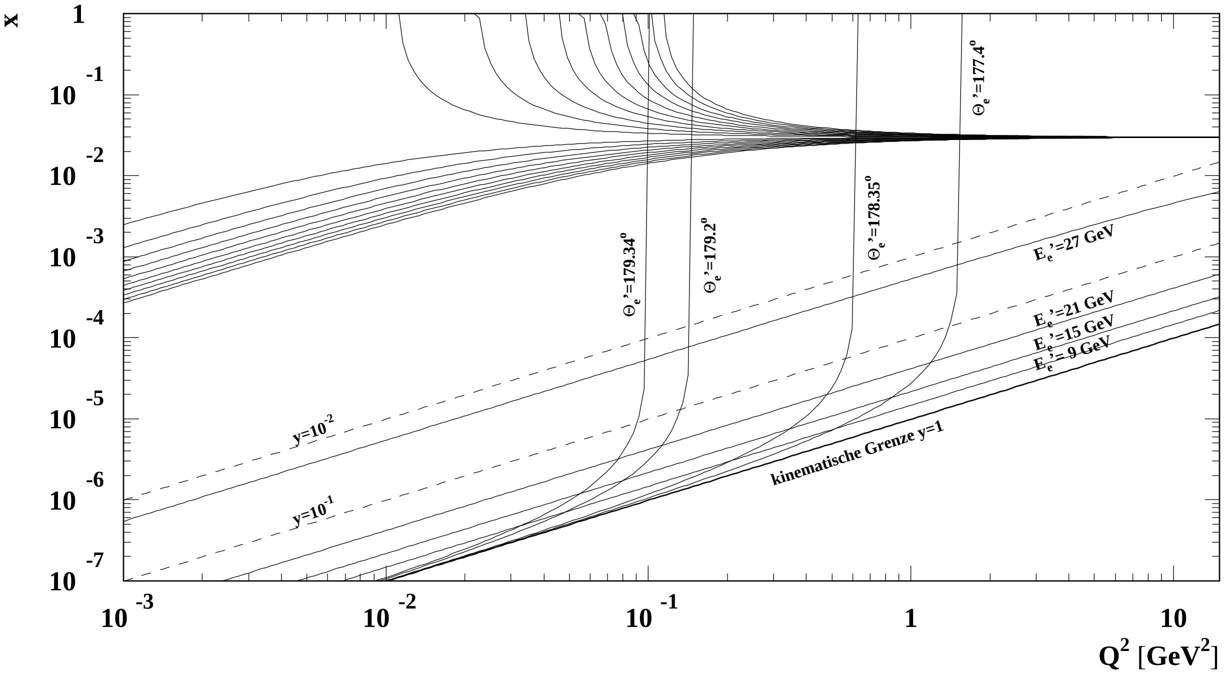

Abbildung 4.3: Übersicht über die kinematische Ebene bei der e-p Streuung im Akzeptanzbereich des VLQ Spektrometers. Die nicht bezeichneten Linien zeigen den Verlauf bei konstanter Energie des gestreuten Elektrons. Die Energien sind: $9, 15, 21, 27$ *GeV und einige Linien um den kinematischen Peak (zwischen* 27.499 *und* 27.501 *GeV, von unten nach oben).*

Dieser Querschnitt wird als "Born-Wirkungsquerschnitt" bezeichnet. Dieser beschreibt den Wirkungsquerschnitt des Feynmangraphen in Abbildung 4.1, ohne den Z^0 Austausch.

Die obige Darstellung geht außerdem davon aus, daß die Strukturfunktionen nicht von der Härte des Prozesses also von Q^2 abhängen. Diese Annahme gilt jedoch nur für den Bereich hoher Q^2, wo die beteiligten Quarks quasifrei sind. Im hier betrachteten Bereich kleiner Q^2 und x_{Bj} ist diese Annahme nicht erfüllt. Für kleine Q^2 ergibt sich eine Abhängigkeit der Strukturfunktionen von Q^2 und x_{Bj}

$$\frac{d^2\sigma_{ep}}{dx_{\mathrm{Bj}}dy} = \frac{4\pi\alpha^2 s}{Q^4}(\,Y_+\,F_2(x_{\mathrm{Bj}},Q^2) - y^2 F_L(x_{\mathrm{Bj}},Q^2)\,).$$

Dabei sind $Y_+ = (1 + (1-y)^2)$ und $F_L(x_{\mathrm{Bj}},Q^2) = F_2 - 2x_{\mathrm{Bj}}F_1$. F_L nennt man die longitudinale Strukturfunktion, die offensichtlich verschwindet solange die Callan-

Gross Relation gilt:

$$2x\, F_1(x_{\mathrm{Bj}}) = F_2(x_{\mathrm{Bj}}).$$

Streng gilt diese Relation nur für Spin 1/2 Quarks ohne Transversalimpuls und QCD Korrekturen. In diesem Bereich werden die Strukturfunktionen durch die Vorhersagen des Partonmodells beschrieben. Für $F_2(x_{\mathrm{Bj}})$ ergibt sich im Partonmodell:

$$F_2(x_{\mathrm{Bj}}) = \sum_i e_i^2\, x_{\mathrm{Bj}}\, f_i(x).$$

Die $f_i(x_{\mathrm{Bj}})$ beschreiben die Wahrscheinlichkeit, daß das $i$te-Parton den Bruchteil x_{Bj} des Protonimpulses trägt, e_i sind die Ladungen der Partonen. Mit Partonen sind hier zunächst Quarks und Gluonen gemeint. Die Gluonen gehen jedoch in $F_2(x_{\mathrm{Bj}})$ nicht ein, da $e_g = 0$ gilt. Alle Partonen i tragen gemeinsam den gesamten Impuls des Protons:

$$\sum_i \int x_{\mathrm{Bj}}\, f_i(x_{\mathrm{Bj}}) dx = 1.$$

Bei kleinen Q^2 und im Bereich der Photoproduktion mit $Q^2 \approx 0$ kann die e-p Streuung als $\gamma^* p$ Streuung betrachtet werden, in diesem System ergibt sich folgender einfacher Zusammenhang zwischen F_2 und dem totalen Wirkungsquerschnitt $\sigma^{\mathrm{tot}}_{\gamma^* p}$

$$\sigma^{\mathrm{tot}}_{\gamma^* p} = \frac{4\pi^2 \alpha}{Q^2}\, F_2(x, Q^2).$$

Mit einer inklusiven Messung im VLQ Detektor kann eine direkte Messung des Photon-Proton Wirkungsquerschnittes vorgenommen werden, aus dem wiederum direkt die Strukturfunktion F_2 in diesem kinematischen Bereich berechnet werden kann.

In Abb.4.4 ist eine Messung des Wirkungsquerschnittes $\sigma^{\mathrm{tot}}_{\gamma^* p}$ im Bereich kleiner Q^2 und x gezeigt. Die dort ausgewerteten Messungen wurden bis zu einem Q^2 Bereich von 1 GeV^2 mit dem SpaCal durchgeführt – mit dem VLQ sind Messungen bis zu $Q^2 = 0.022$ GeV^2 möglich.

4.3 QED Compton Ereignisse

Eine weitere wichtige Klasse von e-p Ereignissen, die im VLQ Detektor gemessen werden kann, ist die der Strahlungsereignisse:

$$e + p \rightarrow e + p + \gamma$$

Dieser Prozeß tritt überwiegend mit $(p - p')^2 \approx 0$ auf. Ist bei einem Strahlungsprozeß die invariante Masse $(p_e + p_\gamma)^2$ des e-γ Systems sehr viel größer als m_e, wird der

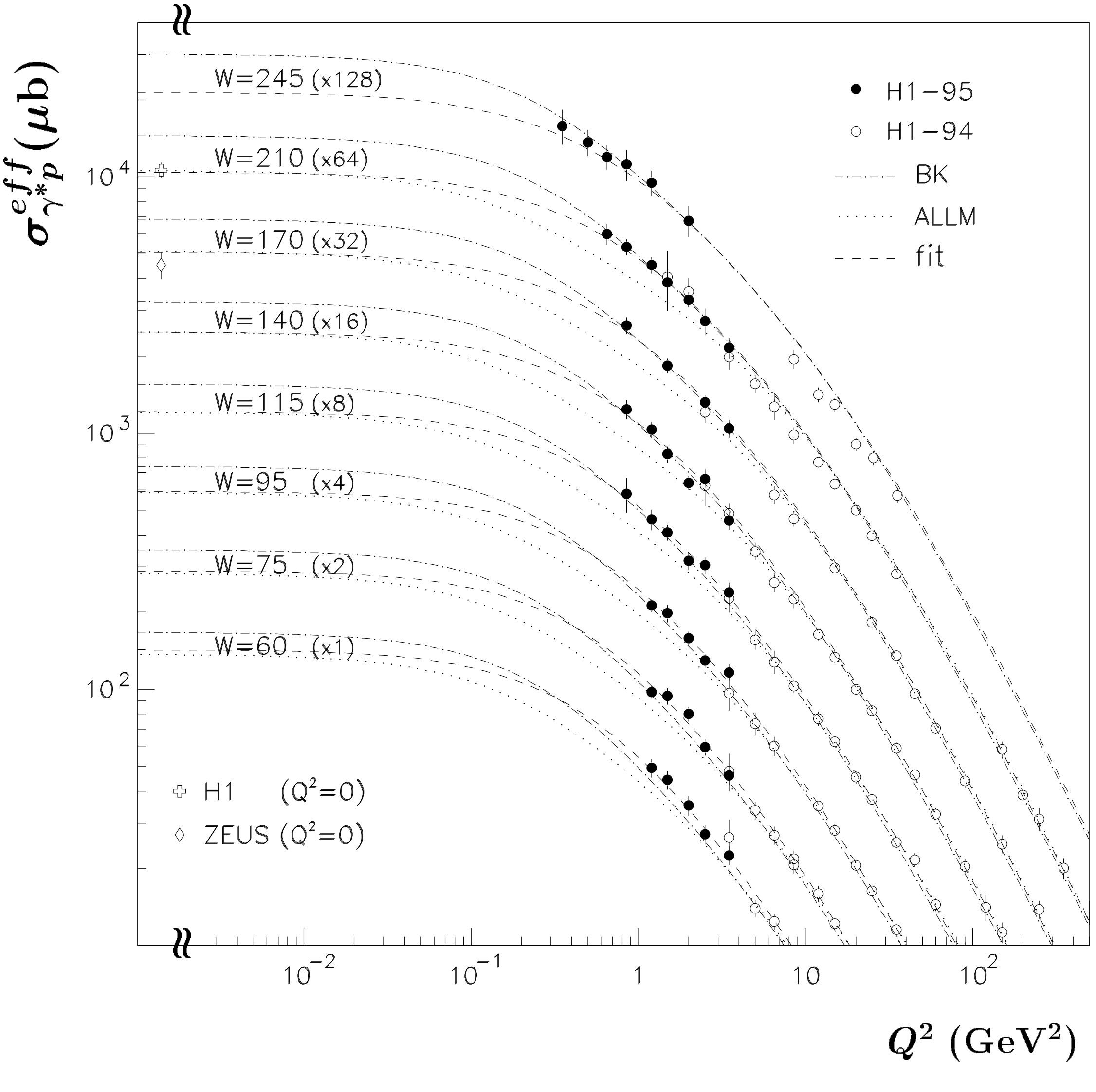

Abbildung 4.4: Der totale Wirkungsquerschnitt der Reaktion $\gamma^* p$ gegen Q^2 bei verschiedenen Werten von W (in GeV). Eingetragen sind Werte von H1 und ZEUS und verschiedene Parametrisierungen[16]. Der Bereich kleiner und Q^2 und x, in dem mit dem VLQ gemessen werden kann, ist durch fehlende Meßwerte zu erkennen.

Triggerbezeichnung	Bedingung & Schwelle	Skalierung
DIS Inklusive	E_{oben} oder $E_{\text{unten}} > 6^4\text{GeV}$	hoch
DIS mit Spur im Zentralbereich	E_{oben} oder $E_{\text{unten}} > 6$ GeV und Spur	≈ 1
QED Compton	E_{oben} und $E_{\text{unten}} > 3$ GeV	niedrig

Tabelle 4.1: Die wichtigsten VLQ Subtrigger, wie ursprünglich vorgeschlagen. Die endgültigen Schwellenwerte und Skalierungsfaktoren müssen im Experiment anhand von Messungen bestimmt werden.

Prozeß als Weitwinkelbremstahlung oder QED Compton bezeichnet. Der Begriff QED Compton deutet an, daß diese Wechselwirkung als Compton Streuung eines (quasi-)reelen Photons, das vom Proton ausgeht, an dem Elektron betrachtet werden kann.

Bei diesen Ereignissen wird im Detektor lediglich ein Elektron und ein Photon detektiert, das Proton fliegt undetektiert weiter. Der Wirkungsquerschnitt dieser Klasse von Ereignissen ist im Rahmen der Quanten-Elektrodynamik berechenbar, da die Struktur des Protons bei diesen Reaktionen nicht aufgelöst wird. Es existieren daher Monte Carlo Programme, die Vorhersagen machen, die mit den Messungen im Detektor verglichen werden können. Details hierzu können zum Beispiel [12] entnommen werden.

Für die Behandlung der Daten aus dem VLQ Detektor von besonderer Bedeutung sind die QED Compton Ereignisse, da mit ihrer Hilfe die Detektoren des Spursystems ausgerichtet werden können. Diese Ereignisse eignen sich hierzu besonders, da ihre Kinematik überbestimmt ist, was eine Anpassung der Positionswerte der Detektoren ermöglicht. Genauer wird auf die Problematik des Alignments in den Kapiteln 5 und 7 eingegangen.

Nicht nur der VLQ Detektor wird mit QED Compton Ereignissen kalibriert und ausgerichtet. Diese Methode wird auch für die rückwärtigen Detektoren BDC und SpaCal und für den hinteren Teil des LAr-Kalorimeters verwendet.

4.4 Ereignisse und Trigger

Zwischen der Aufzeichnung der Daten und einer physikalischen Analyse steht das Verständnis der Datennahme und der Triggerung der gemessenen Ereignisse. Besonders die Funktionsweise des Triggers und der Rekonstruktionsprogramme können einen großen Einfluß auf das Ergebnis einer Analyse haben. Es ist daher bei einem neuen Detektor notwendig vorher die Signatur der gesuchten Ereignisse im Detektor zu simulieren, um für die Datennahme geeignete Triggereinstellungen zu finden. Ein Vorschlag für die Triggerlogik des VLQ Kalorimeters hierzu ist in Tabelle 4.1 zu sehen.

Die Triggerentscheidungen müssen im H1 Experiment innerhalb von 2.5 μs auf der ersten von insgesamt vier Triggerebenen getroffen werden. Für die gesamte Auslese eines H1 Ereignisses wird $\approx$ 1 ms benötigt. Daher hat jede Detektorkomponente, die einen Trigger liefert, eine schnelle Auslese für die Triggerentscheidung und eine genaue zur Rekonstruktion.

Jedes Modul des VLQ Kalorimeters hat, wie in Kapitel 3 beschrieben, 82 Kanäle, die für die genaue Rekonstruktion eines Ereignisses ausgelesen werden müssen und vier schnelle Kanäle für die Triggerentscheidung. Die Trigger Signale für diese vier Kanäle werden jeweils als Summe der Ausgangssignale von zwölf Photodioden der 18 seitlichen Photodiodenreihen (siehe Abb. 4.5) gebildet. Die Bereiche der einzelnen Triggerkanäle überlappen sich, so wird sichergestellt, daß Cluster an der Grenze zwischen zwei Triggerbereichen durch eine Aufteilung des Signals die Triggerschwelle nicht unterschreiten.

Nach dem Einbau des Kalorimeters hat sich leider herausgestellt, daß die Triggerkanäle ein sehr starkes kohärentes Rauschen aufweisen. Die Stärke des Rauschens ist durch eine Addition von je zwölf Kanälen, die in Phase rauschen, um Größenordnungen stärker, als eine Addition von Kanälen mit "weißem" Rauschen zu erwarten wäre. Dieses Rauschen wird in der Triggerelektronik im Kalorimetermodul erzeugt. Der genaue Grund der Entstehung dieses Rauschens ist noch nicht geklärt. Daher wird im VLQ Triggerschema vorübergehend gefordert, daß in einem Modul nur ein Triggerbereich ein Signal haben darf, entweder der obere oder der untere. Dadurch wird der Bereich der Überlappung für die Triggerung von Ereignissen unsensitiv aber Triggerentscheidungen durch das kohärente Rauschen werden vermieden.

Um diese Ineffizienz zu beseitigen, wird nach einer anderen Lösung zur Triggerung des VLQ Kalorimeters gesucht. Bei diesem Trigger werden alle Kanäle der normalen Auslesekette zur Bildung der Triggersignale herangezogen. Da diese Auslese zu langsam für eine Triggerung ist, wird eine neue Elektronik außerhalb des Kalorimeters eine besonders schnelle Signalformung vornehmen, um das Triggersignal rechtzeitig zu erhalten. Durch die Summierung außerhalb des Kalorimeters, mit einer von der Spannungsversorgung des Kalorimeters unabhängigen Spannungsquelle, ist die Kohärenz des Rauschens der einzelnen Kanäle nicht mehr so stark.

Diese Elektronik wurde bis Anfang November 1998 gefertigt, getestet und Ende November 1998 eingebaut. Die genauen Effizienzen und die Schwellen dieser Triggerelektronik müssen noch durch Messungen bestimmt werden, es besteht nach ersten Messungen die Hoffnung die niedrige Triggerschwelle für QED Compton Ereignisse auf 6 GeV setzen zu können.

Alle Aussagen über das Kalorimeter in dieser Arbeit basieren auf Messungen mit dem alten Trigger.

[4]Die genauen Werte der oberen und unteren Triggerschwelle werden erst durch Messungen unter Luminositätsbedingungen festgelegt werden können.

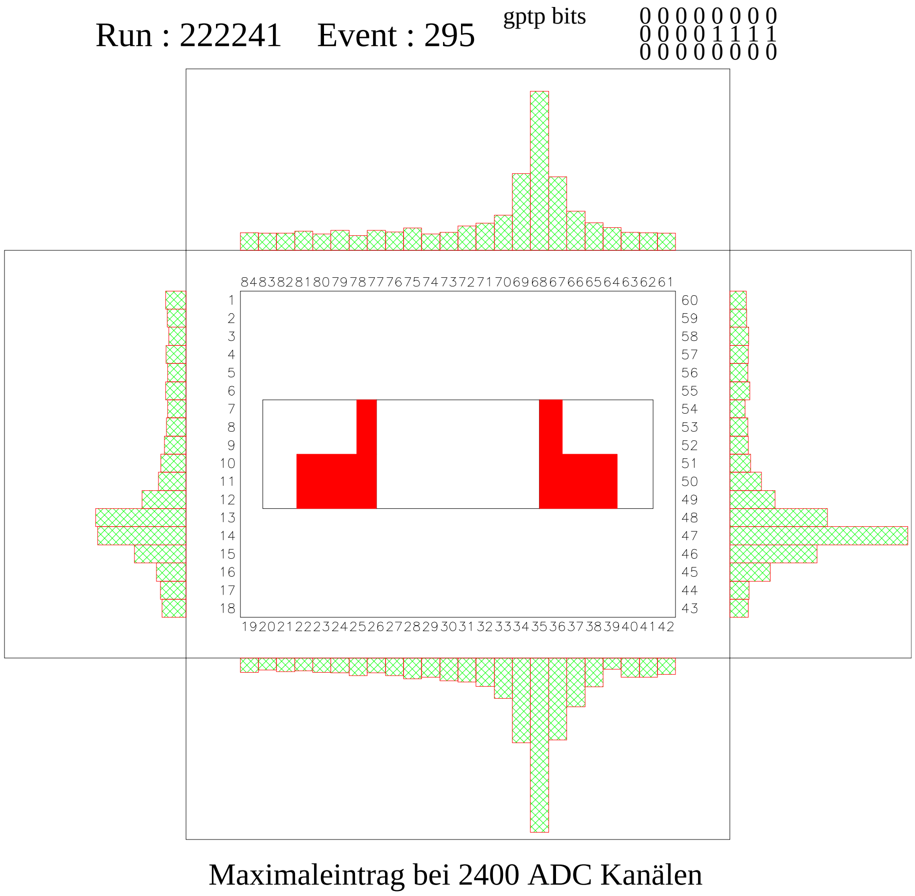

Abbildung 4.5: Ein Ereignisbild aus einem H1-Luminositätsrun. Aufgetragen sind die Rohdaten aus einem Kalorimetermodul. Im Inneren des Moduls sind die digitalisierten Werte der vier Triggerkanäle als Balkendiagramme aufgetragen. Jedes dieser Balkendiagramme korrespondiert dabei mit den danebenliegenden Photodioden, die zur Summierung herangezogen wurden. Oben, unter der Bezeichnung "gptp bits", sind Informationen über die Triggerbits aufgetragen, die angesprochenen haben.

4.5 Ereignisrekonstruktion

Bei der Messung eines jeden Ereignisses im H1 Experiment ist das Ziel die Kinematik vollständig zu rekonstruieren. Eine wichtige Methode dazu ist die Elektronmethode.

Wenn ein Elektron in das VLQ Spektrometer einfällt und getriggert wird, liefert es zur Berechnung der Kinematik mit der Elektronmethode alle notwendigen Größen: Die Energie E_e' des gestreuten Elektrons wird direkt im Kalorimeter gemessen. Der Streuwinkel Θ_e' wird nicht direkt gemessen, es werden die x- und y-Koordinaten des Kalorimeterclusters beziehungsweise der Spur im Spursystem gemessen. Um aus diesen Informationen den Winkel zu berechnen, benötigt man zusätzlich genaue Informationen über die Geometrie des Detektors. Der Streuwinkel ergibt sich dann aus:

$$\Theta_e' = \arctan \frac{\sqrt{(x_{VLQ} + x)^2 + (y_{VLQ} + y)^2}}{z_{VLQ}}.$$

Dabei sind x und y die Spur bzw. Kalorimeter-Meßwerte aus dem VLQ Spektrometer und x_{VLQ}, y_{VLQ} und z_{VLQ} die Komponenten des Ortsvektors der die relative Lage des VLQ Spektrometers zum H1-Koordinatensystem bestimmt. Dem Wert von y_{VLQ} kommt besondere Bedeutung zu, da sich die y-Position bei jeder neuen Luminositätsfüllung ändern kann wenn das gesamte Spektrometer zwischen zwei Füllungen aus der Meßposition herausgefahren wird.

Die Meßwerte x und y werden aus dem Schwerpunkt des Kalorimeterclusters und den Positionen der dazugehörigen Spur des Spursystems berechnet. Auf Abbildung 4.5 ist ein Bild eines Ereignisses im VLQ Kalorimeter zu sehen. Dieses Ereignis stammt aus einem Luminositätsrun und zeigt die Signatur eines hochenergetischen Elektrons. Aus diesen Rohdaten der vier Photodiodenreihen kann mittels eines Clusteralgorithmus der Auftreffpunkt des Elektrons berechnet werden. Wenn es eine gute Spur im Spursystem gibt, wird diese zur Verbesserung der Genauigkeit der x- und y-Bestimmung benutzt.

Aus den in Abschnitt 3.3 angegebenen Grenzwerten des Akzeptanzbereiches des VLQ ergeben sich folgende Maximalwerte der kinematischen Variablen:

Nimmt man den maximalen Winkel des VLQ Kalorimeters $\Theta^{e'}_{\mathrm{Kalo,max}} = 177.4°$ bei einer typischen Energie des gemessenen Elektrons von $E_e' = 27.5$ GeV, ergeben sich für

$$Q^2 = 1.6\ \mathrm{GeV}^2 \qquad \text{und}$$
$$x_{\mathrm{Bj}} = 3.1 \cdot 10^{-2}.$$

Bei den kleinsten nachweisbaren Winkeln im VLQ Spursystem von $\Theta^{e'}_{\mathrm{Tracker,min}} =$

$179.34°$ und mit einer Triggerschwelle bei 6 GeV^2 erhält man

$$Q^2 = 0.022\ \mathrm{GeV}^2 \qquad \text{und}$$
$$x_{\mathrm{Bj}} = 2.5 \cdot 10^{-7}.$$

Kapitel 5

Halbleiterstreifendetektoren bei H1

Zur Erklärung der Begriffe der Physik von Halbleiterdetektoren, die in den weiteren Kapiteln immer wieder gebraucht werden, wird in diesem Kapitel ein allgemeiner Überblick gegeben. Darüberhinaus werden die bewährten Systeme von BST und CST, von denen das VLQ Spursystem viele Eigenschaften übernommen hat, vorgestellt.

5.1 Funktionsprinzip von Halbleiterdetektoren

Alle Teilchendetektoren basieren darauf Teilchendurchgänge durch die Wechselwirkung des Teilchens mit der Materie des Detektors nachzuweisen. Spursysteme mit einer großen Ausdehnung werden als Driftkammern mit einem Gas als aktiven Material gebaut. Diese Systeme basieren auf der Ionisation von Atomen des Gases, wobei die Ladungsträger in einer Hochspannung abgezogen und nachgewiesen werden. Festkörperdetektoren weisen Teilchendurchgänge auch durch die Wechselwirkung mit der Materie nach, in einem Festkörper ist es aber nicht möglich die Atome des Materials zu ionisieren.

Ein Festkörper hat innerhalb des Kristalls eine feste Bandstruktur der Elektronenzustände (Bänder) und quantisierte Anregungsniveaus der Atomkerne (Phononen). Für den Teilchennachweis wichtig ist die Anordnung der Elektronenniveaus.

In einem nichtleitenden Szintillator führt ein Teilchendurchgang zu einer Anregung der Moleküle des aktiven Materials, die bevorzugt durch die Emission von Lichtquanten in den Grundzustand zurückfallen. Zum Nachweis von Teilchendurchgängen wird das entstandene Licht gesammelt und in elektrische Signale umgewandelt.

Im Gegensatz zum nichtleitenden Szintillator hat ein Halbleiter eine kleine Bandlücke, dabei ist das Leitungsband nicht ausreichend besetzt um Leitung zu ermöglichen. Um in einem Halbleiter, der durch die Dotierung und thermische Anregung immer eine nicht verschwindende Anzahl von Ladungsträgern aufweist, Teilchendurchgänge nachzuweisen, muß dafür gesorgt werden, daß möglichst wenige Ladungsträger im aktiven Material sind. In der Umgebung eines p-n Überganges eines dotierten Halbleiters gibt es eine solche Verarmungszone. Wird eine äußere Spannung an den p-n Übergang in Sperrichtung angelegt, so vergrößert sich die Verarmungszone des Materials.

Die Dicke der Verarmungszone kann folgendermaßen berechnet werden[34]:

$$w = \sqrt{2\,\rho\mu\epsilon(V_{\mathrm{depl}} + V_{\mathrm{bi}})}$$

dabei bedeuten:

ρ	spezifischer Widerstand (Typisch 1-10 kΩ cm)
μ	Ladungsträgerbeweglichkeit
ϵ	Dielektrizitätskonstante (9-11 $\times\epsilon_0$)
V_{bi}	"eingebaute" Spannung am p-n Übergang, Materialkonstante
V_{depl}	angelegte Verarmungsspannung[1]($V_{\mathrm{depl}} > 0$)

Eine Darstellung der Bänder an einem p-n Übergang ist in Abbildung 5.1 zu sehen.

Nur im Bereich der Verarmungszone ist es möglich Teilchendurchgänge zu messen. Um ein möglichst großes aktives Volumen nutzen zu können, versucht man eine vollständige Verarmung zu erzielen. Für die verwendeten Siliziumdetektoren wird die vollständige Verarmung bei Spannungen zwischen 20 V - 50 V erreicht[27]. Gallium Arsenid Detektoren werden mit einer höheren Spannungen betrieben, sie sind ab 80 V vollständig verarmt.

Das Prinzip eines Halbleiterdetektors ist in Abbildung 5.2 skizziert. Diese schematische Darstellung trifft auf die Detektoren von BST, CST und VLQ zu. In der Abbildung wurde auf die Schottky-Kontakte an den Übergängen zwischen den metallischen Beschichtungen und dem Halbleitermaterial verzichtet, da das Prinzip auch von einem einfachen p-n Übergang dargestellt wird.

Ein geladenes Teilchen, das die Verarmungszone passiert, erzeugt entlang seiner Bahn Elektronen-Lochpaare. Im Feld der Verarmungsspannung werden die Paare getrennt und die Löcher zur p+ Seite abgeleitet, während die Elektronen auf die n+ Seite wandern. In einem 300 μm dicken Halbleiterdetektor erzeugt ein minimal ionisierendes Teilchen (MIP) circa 25.000 Ladungsträger[34]. Die Ladungsträger, die den Auslesestreifen erreichen, werden über die Metallisierung abgeleitet und auf einem Kondensator gesammelt. Dort werden sie vom Vorverstärker des Auslesechips abgezogen und weiterverarbeitet.

---

[1] Die Verarmungsspannung wird hier als V_{depl}, nach dem englischen "depletion voltage", bezeichnet. Auch üblich ist die Bezeichnung V_{Bias}, die hier nicht benutzt wird.

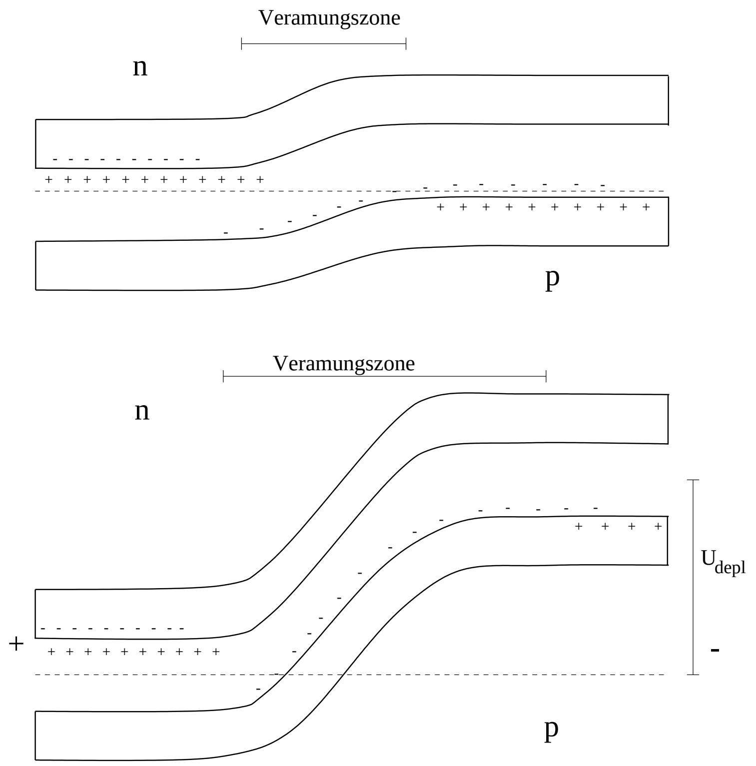

Abbildung 5.1: Bandstruktur einer p-n Halbleiterdiode am Übergang ohne (oben) und mit Sperrspannung. Durch das Anlegen einer Sperrspannung wird die Verarmungszone stark vergrößert (nach [32]).

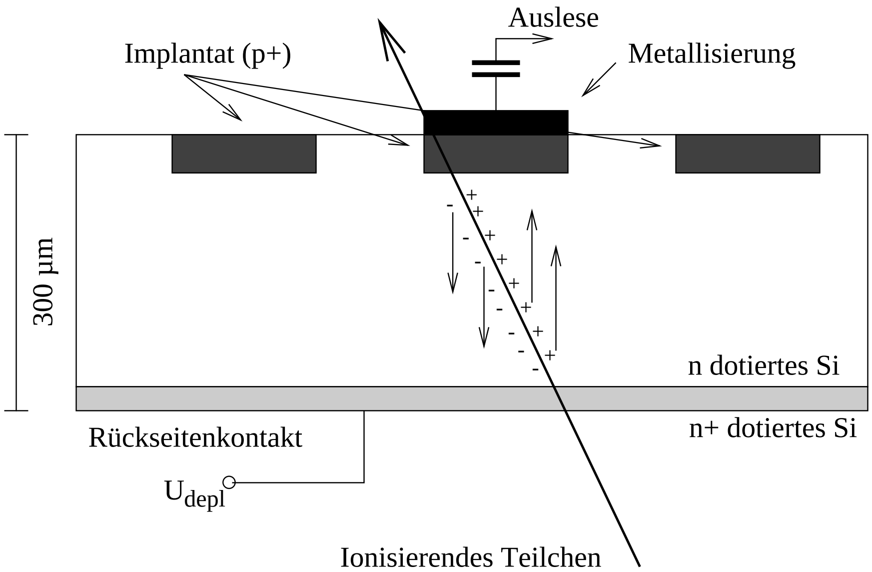

Abbildung 5.2: Funktionsprinzip eines schematisch dargestellten Halbleiterdetektors. Links und rechts an die dargestellten Streifen schließen sich weitere Auslesezellen an. Da die Strukturierung der n-Seite in Auslesestreifen beim VLQ Spursystem nicht benutzt wird, ist in dieser Darstellung darauf verzichtet worden. Der Rückseitenkontakt besteht aus einer n+ Implantationsschicht und einer metallischen Kontaktfläche.

	Silizium	GaAs
Atomzahl	14	31/33
Dichte (g/cm^3)	2.33	5.32
Strahlungslänge (cm)	9.36	2.29
Bandlücke (eV)	1.12	1.42
Elektronenbeweglichkeit μ_e (cm^2/V s)	1500	8500
Löcherbeweglichkeit μ_n (cm^2/V s)	450	400

Tabelle 5.1: Materialeigenschaften von Silizium und Gallium Arsenid[31].

5.2 Silizium und Gallium-Arsenid

In der ursprünglichen Planung des VLQ Spursystems war vorgesehen Gallium Arsenid (GaAs) als Halbleitermaterial einzusetzen. Sowohl Silizium als auch GaAs haben Vor- und Nachteile als Detektormaterial in Hochenergiephysikexperimenten.

Die Materialeigenschaften der beiden Halbleiter sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Für den Einsatz in einem Hochenergiephysikexperiment wichtig ist die Eigenschaften der Strahlungslänge. In einem Material mit einer kürzeren Strahlungslänge erfährt ein Teilchen mehr Vielfachstreuung und einen größeren Energieverlust.

Die Eigenschaften von fertigen Detektoren sind in Tabelle 5.2 zusammengefaßt. Die wichtigen Größen für den Betrieb der Detektoren sind vor dem Einsatz in einem Experiment mit großer Dosisleitung vergleichbar. Nach 10 Jahren Meßbetrieb im LHC gelten die Werte in den “nach”-Bestrahlung Spalten der Tabelle. Ein Detektor aus Silizium benötigt nach der Bestrahlung eine deutlich höhere Verarmungsspannung, die wiederum einen größeren Leckstrom nach sich zieht, die Anzahl der gemessenen Elektronen pro MIP bleiben jedoch in der gleichen Größenordnung. Der größte Nachteil von Silizium ist somit der ansteigende Strom- und Spannungsbedarf und die Notwendigkeit der Kühlung des Detektormaterials.

Gallium Arsenid zeigt, was die Spannungen und Ströme betrifft, ein etwas besseres Verhalten nach Dauerbelastung. Besonders attraktiv für den Bau eines größeren Detektors ist es, daß auf die Kühlung des Detektors verzichtet werden kann. Die Effizienz des Detektors, bezüglich der Ladungssammlung sinkt jedoch durch die Bestrahlung um eine Größenordnung. Der Detektor ist durch diesen starken Abfall in der Ladungssammlungseffizienz nicht dauerhaft für ein Experiment mit diesen Anforderungen geeignet. Nicht erwähnt ist in der Tabelle 5.2, daß Gallium Arsenid eine größere Toleranz gegenüber Synchrotronstrahlung hat.

Für den Einsatz im H1 Experiment sind, da insbesondere die hadronische Strahlungsbelastung nicht so groß ist, beide Halbleiter als Detektormaterial geeignet. Die verhältnismäßig große Synchrotronstrahlung an der Position des VLQ Detektors, deren genaue Intensität nicht bekannt ist, läßt den Einsatz von GaAs im Rahmen des VLQ Spursystems weiterhin geraten scheinen.

Eigenschaft	Silizium vor Bestrahlung	Silizium nach Bestrahlung	Gallium Arsenid vor	Gallium Arsenid nach
Betriebsspannung (in V)	50	1000	220	180
Leckstrom (in $\frac{\mu A}{cm}$)	5	50	5	3.5
Elektronen pro MIP	2.4×10^4	1.0×10^4	1.5×10^4	1.7×10^3
Kühlung	wird benötigt		nicht notwendig	

Tabelle 5.2: Eigenschaften von Halbleiterdetektoren aus Silizium und Gallium Arsenid (aus [31])

5.3 Datennahme mit dem Auslesechip APC128

In diesem Abschnitt werden einige Begriffe, die in Kapitel 7 vorausgesetzt werden, erklärt. Ein zentraler Teil der Auslese aller H1 Siliziumdetektoren ist der Auslesechip APC128. Auf einem Hybriden des VLQ Spursystems sind fünf APCs und ein Decoder angebracht. Der Decoderchip wurde ebenfalls speziell für die H1 Datennahme entwickelt um die APCs steuern zu können. Dazu empfängt er die Steuersignalsequenzen vom OnSiRoC und wertet sie aus.

Ein schematisches Schaltbild des APC ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Die Signale der Streifen werden auf der linken Seite eingekoppelt und gelangen in die Speicherkapazität C_p des aktuellen Pipeline-Registers. Die 32 Pipeline Register werden mit der HERA Frequenz von 10.4 MHz weitergeschaltet, so daß die Signale der letzten 3.1 μs auf dem APC gespeichert sind. Wird eine positive Triggerentscheidung getroffen, wird das Pipeline Schieberegister angehalten und das Auslese-Schieberegister in Gang gesetzt. Dieses Schieberegister schaltet nacheinander die Speicherkapazitäten aller Kanäle auf den Ausgangsverstärker. Die Kanäle werden mit einer Frequenz von 2.5 MHz weitergeschaltet.

Bei der Auslese wird von dem Pipeline Buffer, in dem das Signal erwartet wird, das Signal eines anderen Buffers abgezogen um eine Pedestalkorrektur vorzunehmen. Von der Steuerung der Auslese mittels der Auslesesequenz hängt die genaue Art der Datennahme ab. Zur Korrektur von Pedestalschwankungen wird bei der Datennahme von dem Pipeline Buffer, der das Signal enthält, das Signal eines folgenden Pipeline Buffers abgezogen. Das so bestimmte Signal eines Kanals wird von zwei Operationsverstärkern verstärkt und zur Digitalisierung an die folgende Elektronik weitergegeben.

Bei den Daten der Testmessungen mit dem VLQ in Kapitel 7 wurde eine einfache Subtraktion durchgeführt.

Bei der Datennahme im H1 Experiment mit dem VLQ Spursystem wird, wie beim CST eine Steuersequenz mit einer dreifachen Auslese und Subtraktion verwendet. Die Sequenz, die beim CST Detektor benutzt wird, nimmt aus drei aufeinanderfolgenden Pipeline Buffern das Signal und subtrahiert die Signale drei späterer Buffer als Pedestalkorrektur.

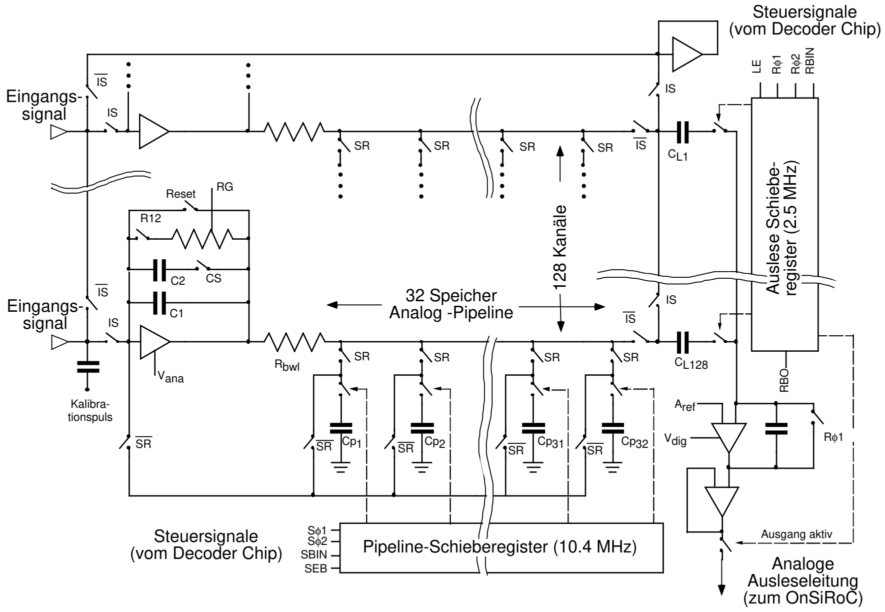

Abbildung 5.3: Schematische Ansicht des APC 128 Auslesechips

Zur Auswertung der Messungen mit dem APC128 ist es wichtig die charakteristischen Eigenschaften der aufgezeichneten Daten zu kennen. Diese Eigenschaften sind in Abschnitt 7.2.1 anhand eines Ereignisses anschaulich beschrieben.

- Common Mode

  Die Rohdaten mit dem APC weisen von Ereignis zu Ereignis eine Schwankung des Mittelwertes aller Signale der Streifen auf. Der Mittelwert aller Signale eines APCs wird als “Common Mode” bezeichnet. Um die Signale aller Messungen vergleichen zu können wird bei jeder Messung der Common Mode von den Signalen abgezogen.

  Die Common Mode Schwankungen ergeben sich aus Schwankungen der Versorgungsspannungen der Ausgangsverstärker. Da auf dem VLQ Hybriden für jeden APC eine eigene Konstantstromquelle zur Versorgung der Ausgangsverstärker vorhanden ist, kann sich auch der Common Mode jedes APCs einzeln verändern.

- Pedestal

  Eine weitere Eigenschaft der Daten, die mit dem APC gemessen wurden, ist es, daß Streifen nebeneinander eine Signaldifferenz haben, die von Messung zu Messung nur wenig differiert. Der Verlauf dieser konstanten Anteils des Signals ist für jeden APC und daran angeschlossenen Detektor typisch. Dieser Verlauf wird als "Pedestal" bezeichnet. Da das Pedestal über einen längeren Zeitraum stabil bleibt, ist es möglich durch eine Auswertung von vielen Ereignissen, eine Berechnung des Pedestals vorzunehmen und die Meßdaten damit zu korrigieren.

Das Pedestal eines APCs ist nicht für alle Pipeline Buffer gleich, bei der Auswertung der Testmessungen wurde daher für jeden Pipeline Buffer ein eigenes Pedestal berechnet.

Ein idealer Auslesechip würde für alle Streifen und Pipelines ein gleiches Signal liefern. Da bei der Produktion der Chips die Fertigung Toleranzen aufweist unterscheiden sich die Kapazitäten der einzelnen Pipeline Buffer und Kanäle. Die Eingangssignalverstärker haben ebenfalls unterschiedliche Eigenschaften die sich auf das Ausgangssignal auswirken. Ein weiterer Grund für Pedestalvariationen sind Bereiche auf dem Detektor, die größere Leckströme haben als andere. Diese Variationen in den Eingangssignalen werden durch die Subtraktion bei der Auslese korrigiert, aber nur wenn das Signal im linearen Arbeitsbereich der Eingangssignalverstärker liegt.

Der APC hat eine weitere Betriebsart, mit der es ermöglicht wird auf jeden Eingangskanal ein Kalibrationssignal mit einer festen Struktur zu geben. Mit diesem Signal ist es möglich die Funktion der Auslese zu testen, da es die gesamte Auslesekette durchlaufen muß. Zusätzlich kann nach

$$\Delta Q_{\mathrm{FADC}} = \frac{1}{e} \times \frac{59.5\ \mathrm{mV}\ 40\ \mathrm{fF}}{\Delta S} \tag{5.1}$$

eine Kalibration für die Anzahl der gemessenen Elektronen pro Digital-Analog Wandlereinheit gestimmt werden ([30], [22]). Bei der Messung eines Kalibrationspulses wird eine feste Spannung von 59.9 mV an die Kalibrationskapazitäten angelegt, die Ihre Ladung danach an die Eingangsverstärker Ihres Kanals weitergeben. Die Größe von Kapazitäten unterscheidet sich innerhalb einer Vierergruppe um 40 fF. Der Wert ΔS ist die mittlere Differenz zwischen den Signalen zweier benachbarter Streifen innerhalb einer Vierergruppe. Das Resultat einer Messung mit Kalibrationspulsen wird in Abschnitt 7.3.3 gezeigt.

In Abbildung 5.4 ist ein Detektormodul bestehend aus Trägerplatine, Hybrid und Detektor zu sehen. Das abgebildete Detektormodul ist in der inneren Ebene im unteren Modul des Spursystems eingebaut.

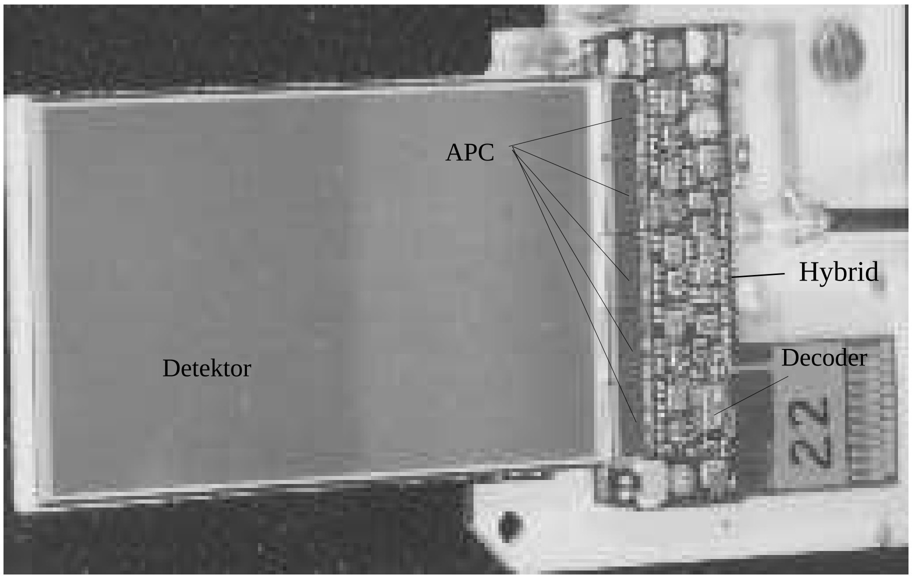

Abbildung 5.4: Photo eines Detektormoduls des VLQ Spursystems.

5.4 Die Detektoren von CST und BST

Da viele Eigenschaften des VLQ Spursystems von den Bauteilen der anderen Halbleiterspursysteme übernommen wurden, werden diese beiden Spursysteme etwas ausführlicher vorgestellt. Anders als beim VLQ Spursystem werden die Detektoren im CST jeweils in Dreiergruppen ausgelesen. Um das zu ermöglichen, sind jeweils drei Detektoren zu einer sogenannten "Half-Ladder" (siehe Abbildung 5.5) zusammengefaßt. Zwei dieser Leitern bilden zusammen die volle aktive Länge des CST. 20 Leitern bilden die äußere Lage des CST, zwölf die innere. Der gesamte Aufbau des CST ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Die Detektoren des BST sind nicht rechteckig sondern haben die Form eines Kreisringsegmentes. Sie sind senkrecht zum Strahlrohr in Form einer Scheibe angebracht. Der Aufbau des BST ist in Abbildung 5.7 zu erkennen. Der BST Detektor beseht, in seiner Ausbaustufe von 1998, aus acht Lagen mit insgesamt 128 r-Detektoren und acht ϕ-Detektoren. Die r-Detektoren bestimmen den Abstand des Teilchendurchgangs vom Strahlrohr, die ϕ-Detektoren den Azimutalwinkel. Die Konstruktion des BST und der verwendeten Detektoren ist in [29] beschrieben.

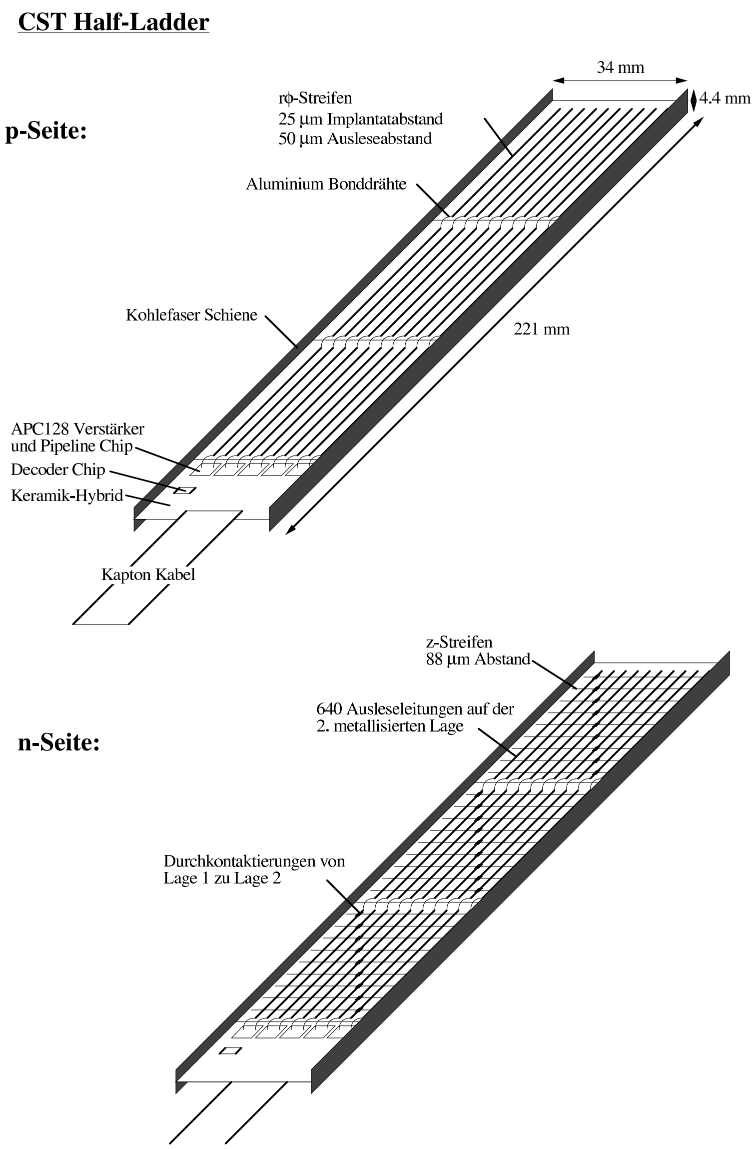

Abbildung 5.5: Die Detektoren und Hybriden werden für den CST zu "Half-Ladders", oder Halbleitern, zusammengebaut.

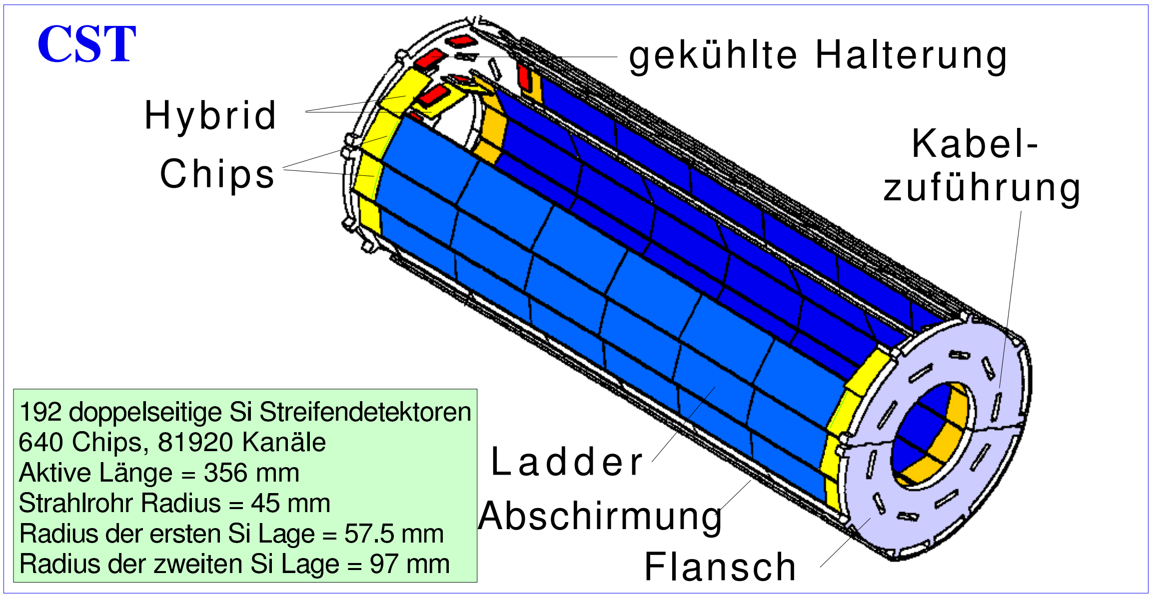

Abbildung 5.6: Übersicht des CST Detektors. Es sind 64 "Half-Ladders" aus Bild 5.5 im Einsatz.

5.5 Auslesesysteme und Datennahme von CST und BST

Obwohl die Auslese aller drei Silizium Spurdetektoren (CST, BST und VLQ Spursystem) auf dem Auslesechip APC128 basiert, unterscheiden sich die einzelnen Detektoren untereinander. Die wichtigsten Eigenschaften und Unterschiede sollen hier kurz vorgestellt werden.

- Gemeinsamkeiten aller Halbleiterspursysteme in H1:
  - OnSiRoC zur Erzeugung der Steuersignalsequenzen
  - APC und Decoder als Frontendelektronik
  - Digitalisierung und Treffererkennung mit PowerPCs
- Besonderheiten des Auslesesystems des CST:
  - optische Auslese
  - Spannungsversorgung (V_{ana}, V_{dig} und V_{depl}) über OnSiRoC
  - gesonderte Einstellmöglichkeiten für V_{ana}, V_{dig} und V_{depl} auf eigenen Karten, auf denen auch die optischen Signale in elektrische gewandelt werden.

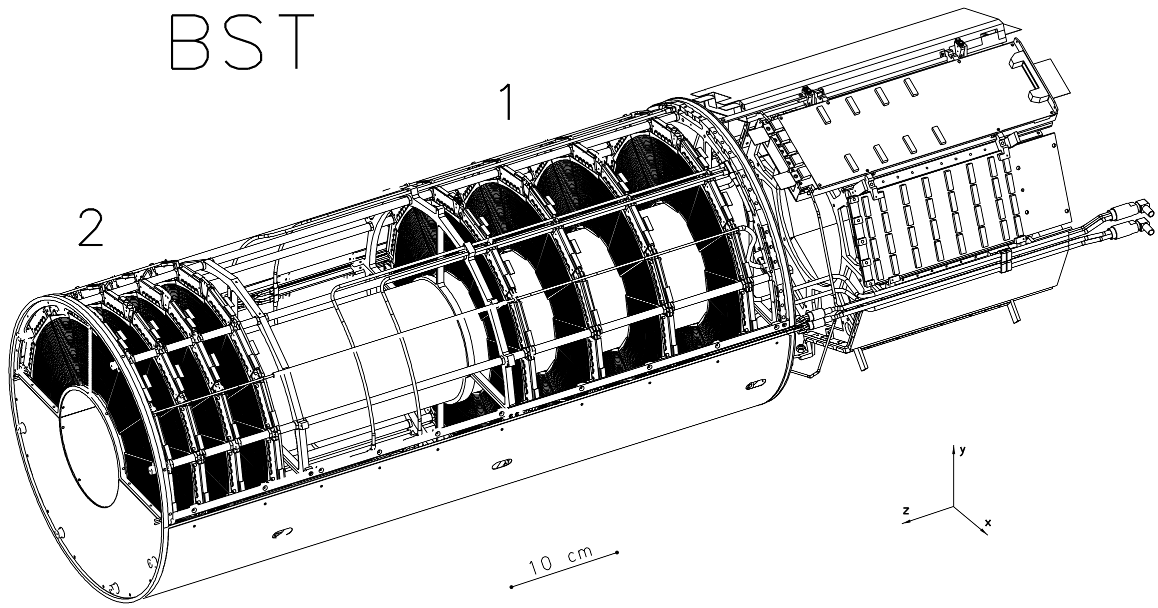

Abbildung 5.7: Technische Zeichnung des BST Detektors in der aktuellen Ausbaustufe, bestehend aus BST 1 und BST 2.

- Besonderheiten des Auslesesystems des BST:
  - OnSiRoC nur zur Erzeugung der Sequenz
  - Decoder für jeden APC
  - eigene VME Karten zur Spannungsversorgung (alle Spannungen).
  - Patchkarten zur Verteilung der Sequenzen und Spannungsversorgung der Booster.
  - Booster Karten

Auf die Auslese des VLQ Spursystems wurde genauer in Abschnitt 3.2.2 eingegangen, hier daher ebenfalls nur Stichworte:

- Der erste OnSiRoC erzeugt die Sequenz für alle Detektoren.
- Die Verteilung der Sequenz auf die vier Doppellagen wird von einer Patchkarte und vier Boosterkarten wie beim BST übernommen.
- Die Niederspannungsversorgung der Frontendelektronik wird von vier OnSiRoCs übernommen.
- Erzeugung der Verarmungsspannung in einem eigenen Gerät, dem C.A.E.N. Crate.
- Konverterkarten zur Signalbehandlung zwischen Frontendelektronik und PowerPC.

5.5.1 Alignment

Ein Halbleiterspursystem kann seine volle Leistungsfähigkeit immer erst nach einer vollständigen Bestimmung der Positionen der Detektoren erbringen[25]. Die Bestimmung der genauen Positionen von Detektoren bezeichnet man als Alignment. Das deutsche Wort Ausrichtung beschreibt den Sachverhalt genau so gut, ist aber unüblich und daher mißverständlich.

Da es nicht möglich ist die Detektoren schon beim Bau genau zu vermessen, da sich die Trägermechanik bei Transport und Einbau durch Verwindungen in ihren Eigenschaften verändern kann, muß die Bestimmung der Detektorpositionen im laufenden Experiment durchgeführt werden.

Zur Bestimmung der Positionen der Detektoren innerhalb des CST werden vor allem zwei Kategorien von Ereignissen verwendet. Die erste Kategorie wird von Ereignissen mit kosmischen Myonen gebildet. Diese Myonen durchqueren den gesamten H1 Detektor und hinterlassen dabei in allen Detektorteilen eine Spur minimaler Ionisation. Mit

Hilfe dieser Ereignisse ist es möglich die Position verschiedener Detektorkomponenten untereinander zu bestimmen. Es ist ebenfalls möglich die relative Position der beiden Halbschalen des CST zueinander mit diesen Ereignissen festzulegen.

Eine weitere Klasse von Ereignissen zur Bestimmung der Alignmentparameter des CST sind solche Ereignisse bei denen eine Spur durch zwei Detektoren der gleichen Lage hindurchgeht. Ermöglicht wird dies durch eine kleine Überlappung der Half-Ladders einer Lage, die genau für diesen Zweck vorgesehen wurde.

Um das Alignment des gesamten CST Detektors durchzuführen werden für jeden Detektor 6 Parameter variiert, 3 Translationen und 3 Winkel. Insgesamt ergibt sich so ein Fit mit 384 freien Parametern. Um zu verhindern, daß der Detektor sich bei diesem Fit gegenüber dem Rest des Experimentes verschiebt, werden sechs dieser Parameter festgehalten.

Die bisher bestimmten Alignment-Parameter hatten für jeweils eine Meßperiode des H1 Detektors Gültigkeit, nach dem Aus- und Einbau des Detektors müssen die Parameter neu bestimmt werden.

Kapitel 6

Slow-Control

Als "Slow-Control" wird der Teil eines Systems bezeichnet, der alle Betriebsparameter des Systems überwacht und steuert. Im Fall eines Hochenergiephysikexperimentes umfaßt das unter anderem die Überwachung der Betriebsspannungen, Gasflüsse, Arbeitstemperaturen und die Positionen der mechanischen Stellsysteme. Alle überwachten Meßgrößen müssen anhand der vom Designer festgelegten Abläufe mit Sollwerten verglichen werden, um dann mittels eines Regelkreises einen möglichst ununterbrochenen Betrieb des Detektors zu ermöglichen. Da die Datenmengen, die von den Slow-Control Programmen ausgewertet werden, im Vergleich zu denen in der Datennahme des Experimentes sehr klein sind und die Zeit zwischen den Erhebungen der Slow-Control Daten verglichen mit den Zeiten zwischen zwei Bunchcrossings, also zwei möglichen Messungen, sehr groß sind, hat sich der Begriff "Slow-Control" eingebürgert. Diese Zeiten sind im H1-Experiment 96 ns zwischen zwei Bunchcrossings und bis zu einigen Minuten zwischen zwei Messungen von Slow-Control Daten. Die Datenmengen bei der Datennahme des VLQ Spursystems beträgt für ein Ereignis im Rohdatenmodus 18.8 kByte, für einen vollständigen Satz der Slow-Control Meßwerte reichen 216 Byte, wie in Tabelle 6.2 zu sehen ist.

In diesem Kapitel werden alle wichtigen Überlegungen bei der Erstellung eines Slow-Control Systems am Beispiel des VLQ Spursystems aufgezeigt und die Funktionsweise dieser Slow-Control vorgestellt.

6.1 Anforderungen an das Slow-Control System eines Detektors

Ein Slow Control System muß den folgenden Kriterien genügen:

- Die Erfassung der zu überwachenden Meßwerte in möglichst kurzen Zeitabständen.

- Zur Kommunikation mit den Hardwarekomponenten des Detektors muß ein Interface zu allen Teilen bestehen. Da nicht für die gesamte Hardware spezialisierte Interfaces zu den ausgewählten Plattformen, also Computerhard- und Software, zur Verfügung stehen, umfaßt die Arbeit an der Slow-Control auch hardwarenahe Programmierung um die Detektorkomponenten anzusprechen und auszulesen.

- Alle möglichen Betriebszustände sind anhand der Meßwerte der beteiligten Komponenten zu identifizieren. Die so festgelegten Zustände müssen mit den Sollzuständen während der Messung verglichen und gegebenfalls angeglichen werden.

- Für alle Überwachungsaufgaben und der daraus folgenden Regelanweisungen ist ein klares Ablaufdiagramm zu erstellen. Insbesondere müssen Abhängigkeiten der Zustände und der Regelbefehle untereinander im voraus erkannt werden.

- Alle gesammelten Meßwerte müssen in in eine Datenbank abgelegt werden, damit der Status des Systems später nachvollzogen werden kann.

- Den Bedienern des Systems ("Shift-Crew" beziehungsweise "Experte") ist eine einfache Oberfläche zur Verfügung zu stellen. Diese Benutzeroberfläche soll intuitiv verständlich sein und die wichtigsten Betriebszustände auf einen Blick durchschaubar machen. Benutzereingriffe müssen fehlertolerant abgefangen werden und sich auf ein Minimum beschränken. Die Bedienung des Systems soll für jeden Physiker der Schichtbesatzung (Shift-Crew) möglich sein, ohne die zugrunde liegende Systematik zu verstehen.

6.2 Die Komponenten des VLQ in der Slow-Control

Diese Werte werden von der Slow-Control des VLQ Spursystems überwacht:

- Verarmungsspannung für 20 Detektoren (50 V für Silizium- bis zu 300 V für GaAs Detektoren)

- V_{ana}, Spannungsversorgung für die Operationsverstärker auf den Hybriden, 16 Werte

- V_{dig}, Spannung zur Versorgung der digitalen Elektronik der Hybriden, 16 Werte

- Temperaturen auf den Detektorlagen (12 Werte)

- Temperaturen der Hybriden (20 Werte)

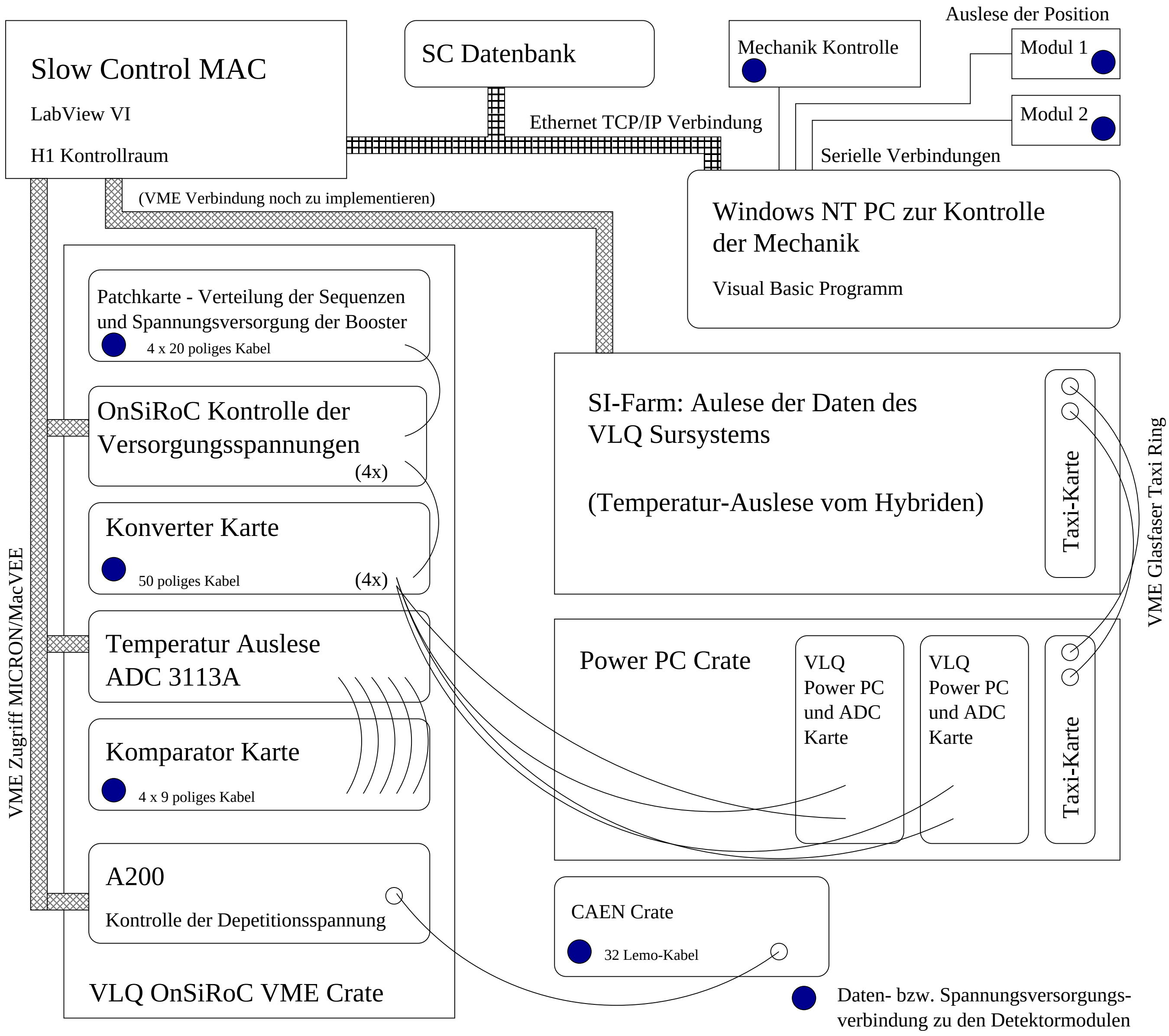

Abbildung 6.1: Schema aller Komponenten der Slow Control des VLQ Spursystems. Die Verbindungslinien deuten den Datenfluß zwischen den Systemen an.

Vier weitere Versorgungsspannungen von 5 V für die Boosterkarten können von der Slow-Control nicht überwacht werden. Diese Versorgungsspannung wurde dem System nachträglich hinzugefügt, ohne eine überwchungsmöglichkeit vorzusehen.

Die Geräte, die zur Überwachung dieser Werte notwendig sind, werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

6.2.1 Das OnSiRoC VME Crate

In Bild 6.1 sind alle Komponenten der Slow-Control des VLQ Spursystems schematisch angedeutet. Der Hauptteil der Elektronik des Spursystems befindet sich im "OnSiRoC VME-Crate[1] ". Auf dem Bild ist dieses als großer Kasten unten links zu sehen. Dieses Crate befindet sich auf der unteren Ebene des H1 Elektronik-Trailors in Rack B8. Das Crate ist ein spezielles VME Crate, das für den Einsatz im H1 Experiment modifiziert wurde. Die Modifikationen umfassen eine größere Einbautiefe für die Auslesekontrollkarten (OnSiRoCs), eine gesonderte Spannungsversorgung auf der J2[2] Steckerleiste und eine erweiterte Backplane[3] auf J2 für die Verteilung der zentralen Triggersignale und des HERA Clocksignals von 10.4 MHz.

In dieses Crate sind folgende Komponenten eingebaut, der Einbaureihenfolge von links nach rechts folgend, beginnend bei Einschub Nummer 1:

- Vier OnSiRoCs – Online Silicon Readout Controller
  Die VME Karte OnSiRoC wurde von der Abteilung FEC am DESY entwickelt. Die Karte ist speziell für die Steuerung, Auslese und Spannungsversorgung von Halbleiterstreifendetektoren im H1 Experiment ausgelegt. Sie bilden daher die zur Frontendelektronik[4] aus APC128 und Decoderchip passende Auslese- und Steuerlogik. Der OnSiRoC verfügt dafür über vier unabhängige Kanäle.

  Der OnSiRoC wurde für die Erfüllung folgender Aufgaben entwickelt:

  - Erzeugung und Überwachung der Verarmungsspannungen der Detektoren.
  - Erzeugung der Versorgungsspannungen V_{ana} und V_{dig} für die Frontendelektronik. Auch diese Spannungen können rudimentär überwacht werden.

[1] Als Crate (engl. Obstkiste) wird die Halterung bezeichnet, in die Elektronikeinschübe eingesetzt werden können. Das Crate versogt die Einschübe mit Spannung und stellt, je nach System Lüftung, Daten- und Adressleitungen zur Verfügung. In der Hochenergiephysik kommen vor allem VME-, VXI-, CAMAC- und NIM-Crates zum Einsatz.

[2] J2 ist die untere Steckerreihe in einem VME Crate, deren Geometrie in der Definition des VME Standards festgelegt ist, nicht aber deren elektronische Belegung. In der H1 Umgebung wird J2 für die Verteilung der Triggersignale benutzt.

[3] Eine Backplane (= Rückwand) bezeichnet in einem VME Crate die Platine, auf der die Signale zwischen den VME Einschüben ausgetauscht werden.

[4] Als Frontendelektronik bezeichnet man den Teil der Elektronik, der sich unmittelbar am Detektor befindet.

– Steuerung der Auslese durch Abgabe einer festen Abfolge von Steuersignalen (Sequenz) an die vier Kontrolleitungen.

– Digitalisierung der Daten. Ein OnSiRoC ist mit vier Analog-Digitalwandlern ausgestattet, die zusätzlich einen fest implementierten Trefferidentifikationsalgorithmus nachgeschaltet haben. Details und genaue Untersuchungen der Leistungsfähigkeit des OnSiRoC sind in [22], [23] und [24] zu finden.

Zur Steuerung der Decoder auf den Hybriden erzeugt der OnSiRoC die "Auslesesequenz". Die Sequenz wird vor Beginn der Datennahme in den Speicher des OnSiRoC geladen, bei jeder positiven Triggerentscheidung erzeugt er auf den vier Steuerleitungen ein Signal, das die Datenauslese kontrolliert. Um auszuschließen, daß die vier OnSiRoCs unterschiedliche Sequenzen erzeugen, wird nur die Steuersequenz des ersten OnSiRoCs verwendet und mit der Patchkarte an alle Detektordoppellagen verteilt. Zu diesem Zweck wird der 20polige Ausgang des ersten OnSiRoCs mit dem Eingang der Patchkarte verbunden.

Am 50 poligen Anschluß des OnSiRoCs liegen die 8 Versorgungsspannungen für die Ausleseelektronik an und es sind 8 Leitungen für die differentiellen Signaleingänge vorgesehen. Da die Analog-Digitalwandler (ADC) der OnSiRoCs nicht verwendet werden, sind diese Eingänge unbenutzt. Da für die Analog-Digitalwandlung die flexibleren PowerPCs mit ihren ADCs verwendet werden, werden für das VLQ Spursystem OnSiRoCs eingesetzt, die nicht mit eigenen ADCs ausgestattet sind.

Die Möglichkeit die Verarmungsspannung auch vom OnSiRoC erzeugen zu lassen wird beim VLQ Spursystem ebenfalls nicht benutzt, da diese Spannung bei diesem System vom C.A.E.N. Crate erzeugt wird.

- Patchkarte
  Um sicherzustellen, daß die Steuersignale der OnSiRoCs gleichzeitig auf alle vier Lagen des Spursystems verteilt werden, hat es sich während der Integration des Systems als vorteilhaft herausgestellt, die Signale eines OnSiRoCs auf alle Lagen zu verteilen. Zu diesem Zweck wurde für die Steuerung der BST Auslese eine Patchkarte entworfen. Diese Karte hat einen Eingang für ein 20 poliges Kabel mit den Steuersignalen eines OnSiRoCs und vier Ausgänge an die die Kontrollsignalkabel der Detektorebenen angeschlossen werden. Die Elektronik auf der Patchkarte verteilt die Steuersignale und verstärkt sie dann für jeden Kanal getrennt. Die Ausgänge der Patchkarte sind, wie die der OnSiRoCs differentiell.

  Da die Steuersignale, wie alle anderen Signale über ein 20m langes Kabel zum Detektor gelangen, erreichen sie die Elektronik des Hybriden gedämpft. Damit eine ausreichende Signalamplitude der Kontrollsignale an den Eingängen aller Decoder sichergestellt werden kann, wurden "Booster-Karten" eingebaut. Diese

Karten sind in der Elektronikbox, unmittelbar am Detektor zwischen Subrepeatermotherboards und dem 20 poligen Kabel eingesetzt. Um den Decoderchips ausreichende Steuersignalqualität zur Verfügung zu stellen, nehmen die Booster eine weitere differentielle Verstärkung der Kontrollsignale vor.

Die Verstärkerschaltungen der Booster benötigen eine Versorgungsspannung von 5 Volt. Diese Spannung kann nicht von den Versorgungsspannungen der OnSiRoCs genommen werden, daher ist auf der Patchkarte für jeden Kanal ein stabilisierter Gleichspannungskonverter eingebaut, der die benötigten 5 Volt erzeugt. Über jedes der 20-poligen Kontrollsignalkabel wird daher außer den eigentlichen Kontrollsignalen auf zwei Adern die Spannungsversorgung der Booster zur Verfügung gestellt[5].

- STC Karte (Subsystem Trigger Card – Die STC ist nicht Bestandteil der Slow Control, aber im gleichen Crate eingebaut)
  Jedes Subsystem im H1 Experiment verfügt auch über ein eigenes Triggersystem. Im Falle des Silizium-Zweiges der Datennahme befindet sich ein "Subsystem Trigger Crate" in Rack B9. Von diesem Crate aus werden die Triggersignale an die drei Detektoren des Si-Zweiges CST, BST und VLQ Spursystem verteilt. Die Signale werden mit 20 poligen Twisted-Pair Flachbandkabeln von System zu System weitergereicht. Dabei geht das Signal zuerst in die "Master STC", dann in die "Slave STC"s. In der letzten Karte muß das Signal, um Reflektionen im Kabel zu vermeiden, terminiert werden. In dem Crate des VLQ Spursystems ist eine nicht mit Abschlusswiderständen versehene "Slave STC" eingebaut. Der Verlauf der Triggersignalkabel ist daher durch die Hardware fest vorgegeben:

  - Mastersignal vom Subsystem Trigger Crate, geht in
  - Die CST Master STC. Das Slavesignal am Ausgang dieser Karte geht in
  - Die VLQ Slave STC ohne Terminator, von dort in
  - Die terminierte BST STC.

  Diese Verbindung gilt für die OnSiRoC Crates der drei Systeme. Die PowerPC Crates werden entsprechend verbunden, da es aber nur zwei gibt (eins für CST gemeinsam mit dem VLQ und eins für den BST) sind keine Zweideutigkeiten in der Verbindung möglich: Das Signal aus dem Subsystem Trigger Crate geht in die Masterkarte, die mit der Slavekarte verbunden ist.

[5]Der BST Detektor hat in der Datennahmepause 97/98 ebenfalls Signalbooster erhalten, dort werden die Spannungen für die Booster über vier Adern übertragen. Es hat sich nach der Installation herausgestellt, daß die Ströme der Booster stark variieren. Diese Variation ist von der Auslesephase und daher von der Steuersignalsequenz abhängig. Durch diese wechselnden Ströme in den Kontrollkabeln wurden Störungen im Zentralbereich des H1 Detektors induziert. Da der VLQ Detektor nicht in der Nähe anderer sensibler Detektoren ist, wurden bisher keine Störungen durch die Auslese des VLQ Spursystems beobachtet.

Da die hochfrequenten Trigger- und Clocksignale auf der Backplane des VME Crates Reflektionen unterliegen können, die nur auf Einschub Nummer 21 durch Abschlußwiderstände verhindert werden, hat es sich es sich als vorteilhaft erwiesen die STC Karte in Einschub Nummer 5 zu betreiben (siehe Tabelle 6.1).

- Vier Konverterkarten
  Die vier Karten, für jede Doppellage eine, sind jeweils einem OnSiRoC zugeordnet. Am Eingang der Konverterkarten ist das 50 polige Kabel einer Detektorebene angeschlossen. Durch dieses Kabel werden die Spannungen V_{ana} und V_{dig} für jeweils vier Kanäle zum Detektor geführt und die differentiellen Ausgangssignale der vier Auslesekanäle vom Detektor zurückgeliefert.

  Die Aufgabe der Konverterkarten besteht darin die Auslesesignale über eine Verstärkerschaltung so anzupassen, daß die Ausgangssignale in Dynamikbereich und Signalniveau dem Eingangsbereich des Digital Analog Wandlers der PowerPCs angepasst sind. Für die Regelung der Signale stehen für jeden Kanal zwei Potentiometer zur Verfügung, die eine individuelle Anpassung der Signale ermöglichen.

  Um die Versorgungsspannungen der Hybridelektronik, die der OnSiRoC liefert, in das 50polige Kabel einzuspeisen, besitzt die Konverterkarte einen Eingang, über den die Spannungen der OnSiRoCs in die Konverterkarte gelangen. Die Versorgungsspannungen aller vier Kanäle werden auf den Konverterkarten zusätzlich überwacht, um ein BBL3 Signal für die Zentrale H1 Überwachung zu erzeugen. Um aus den 32 Spannungen in vier Kanälen und vier Konverterkarten ein Alarm-Signal zu erzeugen, sind die Konverterkarten untereinander mit einem logischen "oder" verbunden.

- A200 Karte
  Diese Karte verbindet das VME System mit dem SY127 Spannungsversorgungsgerät. Dieses Gerät wird benötigt um die Verarmungsspannungen der Detektoren zu regeln und zu überwachen. Das SY127 befindet sich auf der zweiten Ebene des H1 Elektronik-Trailors in Rack H10. Um über das Slow Control Programm im Macintosh kontrolliert werden zu können, stellt die A200 Karte eine serielle Verbindung zum SY127 her. Diese benötigt ein einzelnes Lemo Koaxialkabel. Auf dieser seriellen Leitung werden, mittels eines ebenfalls proprietären Protokolls, die Status- und Kontrollsignale zwischen der A200 Karte und dem Spannungsversorgungsgerät ausgetauscht. Die Daten, die in der A200 Karte eintreffen, stehen dann auch dem Slow-Control Programm im Macintosh zur Verfügung.

- Komparatorkarte
  Um das Spursystem vor Überhitzung zu schützen, stellt die Komparatorkarte

eine hardwaremäßige Schutzfunktion für den Detektor zur Verfügung. Diese Karte wurde speziell für die Slow Control des VLQ entworfen. Die ankommenden Temperaturwerte werden von zwölf Temperaturfühlern geliefert. Diese Fühler sind auf die Aluminiumplatten (siehe Abb. 3.4) neben den Hybriden aufgeklebt. Zwei Fühler sind auf der Vorderseite der Doppellage, einer auf der Rückseite angebracht. Die drei Signale jeder Doppellage werden in einem 9 poligen Kabel in die Komparatorkarte geführt. Die Temperaturfühler werden von der Digitalspannung der OnSiRoCs versorgt. Daher ist keine Temperaturmessung möglich, wenn diese Spannungen ausgeschaltet sind.

Wenn die Temperaturwerte am Eingang der Komparatorkarte einen fest eingestellten Grenzwert übersteigen, wird durch eine Schaltung ein Signal erzeugt, das direkt in die C.A.E.N. SY127 Spannungsversorgungseinheit geführt wird. Ist dieses Signal gesetzt (TTL logisch 1, entspricht anliegender Spannung ¿500 mV), wird vom C.A.E.N. System eine Abschaltung der Verarmungsspannungen vorgenommen.

Auf einem 96 poligen Stecker liegen am Ausgang der Komparatorkarte alle zwölf gemessenen Temperaturwerte und die vier Vergleichsspannungen der eingestellten Schwellenwerte an.

- ADC Karte (Hersteller: VMIC, VME Microsystems International Corporation, Modell-Nummer: VMIVME-3113A)
  Diese Karte dient dazu, die auf der Komparatorkarte anfallenden Temperaturmeßwerte und die Schwellenspannungen zu digitalisieren und an das Slow-Control Programm weiterzugeben. Zu diesem Zweck verfügt die Analog-Digital Wandlerkarte (ADC-Karte) über 64 Eingänge, von denen für die Temperaturauslese momentan nur 16 genutzt werden.

  Die Erfassung der Daten mit dem Slow-Control Programm arbeitet im Modus der programmierten Abfrage der Kanäle mit einem Eingangsspannungsbereich von 0 bis 1 Volt.

- MacVEE Karte
  VME Karte zur direkten Verbindung von NuBus Apple Macintosh mit dem VME Bus über zwei 60 polige Kabel. Durch diese Verbindung ist der gesamte Adressbereich des VME Crates in den des Macintosh Computers abgebildet. Auf diese Weise kann jedes Programm mittels einfacher Speicherzugriffe auf die VME Karten zugreifen.

- Taxi Karte[6]

[6] Die Taxikarte im VME Crate des Spursystem ist auf Abb. 6.1 nicht eingezeichnet, da sie nur für die Initialisierung des Systems benötigt wird, während der Datennahme ist diese Taxikarte inaktiv. Daher wird an einer Möglichkeit gearbeitet das System ohne die Taxikarte in Betrieb zu nehmen.

VME Master Karte zur Verbindung mehrerer VME Crates untereinander in einer proprietären Glasfaser Ring-Topologie.

Position	Karte	Anzahl	VME aktiv?	benötigt Triggersignale
1	Taxikarte	0/1[a]	ja	nein
2-4	MacVEE	1	ja	nein
2-4	A200	1	ja	nein
2-4	ADC 3113A	1	ja	nein
5	STC Karte	1	nein	ja
2-21	Komparatorkarte	1	nein	nein
2-21	Patchkarte	1	nein	nein
6-21	OnSiRoC	4	ja	ja
2-21	Konverterkarte	4	nein	nein

[a]siehe Text

Tabelle 6.1: Einbaupositionen der Hardwarekomponenten des VLQ Spursystems in das OnSiRoC Crate. Zu jeder Karte ist vermerkt, ob sie über den VME-Bus anzusprechen sind oder Zugang zu Triggersignalen benötigen.

Beim Einbau der Komponenten des Spursystems in das VME Crate ist die Beachtung einer festen Reihenfolge wichtig. Diese Reihenfolge wird von zwei Bedingungen diktiert:

- Die Verteilung der Triggersignale auf der Backplane beginnt erst ab Einbauposition 5.
- Alle anderen aktiven VME Karten sollten vor Position 5 eingesetzt werden um die Triggersignale nicht zu beeinflussen.

Zusammengefaßt sind die Bedingungen an die Einbaureihenfolge in Tabelle 6.1.

6.2.2 Die mechanische Steuerung des VLQ Detektors

Die Anforderung an die Mechanik ist es neben der reinen Bewegung des Detektors, eine große Genauigkeit bei der Bestimmung der Position zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde die Mechanik für den VLQ Detektor mit kommerziellen Präzisionskomponenten bestückt. Im einzelnen sind das je ein Schrittmotor, ein photoelektrisches Längenmeßsystem für jedes Modul, ein Steuergerät für die beiden Motoren und je eine Positionsanzeige für die Längenmessgeräte.

Die Längenmessgeräte sind unmittelbar an den Detektormodulen befestigt, ebenso wie je zwei Endschalter pro Modul, die mit der Motorsteuerung verbunden sind. Die Endschalter sollen eine Beschädigung der Mechanik oder des Detektors verhindern, indem die Motorbewegung bei Erreichen der Endschalter gestoppt wird.

Die Schrittmotoren sind ca. 2 m unter dem VLQ Detektor angebracht, die Bewegung der Motoren wird mittels je eines Hydraulikzylinders mit zwei Hydraulikleitungen übertragen. Die Schrittmotoren sind nicht unmittelbar am Detektor angebracht, da dieser Motorentyp auch bei Stillstand von der Steuerung ständig Spannungspulse erhält, die in den Detektoren Störungen hervorrufen würden. Auch die Kabel zur Ansteuerung der Motoren sind von denen zur Übertragung von Detektorsignalen getrennt verlegt, da von ihnen Störungen ausgehen.

Die beiden Geräte zur Positionsanzeige (siehe [20]) lassen sich durch eine serielle Verbindung auslesen. Beide Module sind mit einem Windows NT PC verbunden, der in Abständen von 30 s die Positionswerte beider Module ausliest und in eine Datei schreibt. Diese Datei enthält in Klartext den Status und die Position der beiden Detektormodule und sie ist mittels FTP für den Slow-Control Macintosh lesbar. Das Programm zur Auslese und Weiterverarbeitung der Positionsanzeigegeräte wurde von mir in Visual Basic (siehe [19]) entwickelt.

Es ist geplant auch das Motorkontrollgerät von dem Windows NT PC zu steuern. Diese Aufgabe soll auch in einem Visual Basic Programm implementiert werden. Durch dieses Programm wird es dann möglich die gesamte Mechanik über die Oberfläche des Slow-Control Programms des VLQ Spursystems zu steuern.

6.2.3 Weitere Komponenten

Alle weiteren wichtigen Komponenten des Slow Control Systems werden hier kurz erwähnt. Diese Einheiten des Systems sind auch auf Abbildung 6.1 eingetragen.

- Macintosh im H1 Kontrollraum
  Der Computer übernimmt alle zentralen Steueraufgaben der Slow-Control. Er ist direkt mit dem VME Crate beim Experiment verbunden und ist über Ethernet und Apple Talk vom Desygelände aus anzusprechen.

- PowerPC Karten mit Analog-Digitalwandler
  Bei diesen Karten handelt es sich um eigenständige Computer mit einem PowerPC Chip, die als Zusatz eine Analog-Digitalwandlerkarte mit 8 Eingangskanälen haben. Die PowerPCs sind in einem speziellen Crate gemeinsam mit denen des CST Detektors eingebaut. Die Daten werden aus den Karten über VME ausgelesen und von einer Taxi Karte über den Si-Glasfaserring in die Silizium-Farm kopiert.

- Si-Farm
  Die Silizium-Farm ist ein weiterer Computer in VME Bauform, der sich in Raum 300 neben dem H1-Kontrollraum befindet. Die Aufgabe der Si-Farm ist es, die Daten des gesamten Silizium Zweiges in Übersichtshistogramme zu füllen und an die zentrale Datennahme weiterzuleiten. Zu diesem Zweck ist die Si-Farm auch an den Taxi-Ring der CDAQ angeschlossen. Die Übersichtshistogramme (L4 Histos) dienen dazu, während der Datennahme die aufgezeichnenten Daten zu überprüfen. Unter anderem stehen dazu von allen Detektoren des Si Zweiges Trefferverteilungen in Histogrammen zur Verfügung.

- C.A.E.N. Crate zur Erzeugung und Kontrolle der Verarmungsspannungen.
  Das C.A.E.N. Crate SY127 stellt auf komfortable Art und Weise geregelte Spannungen für jede Art von Teilchendetektor zur Verfügung. Fur das VLQ Spektrometer wurde das SY127 mit Modulen zur Erzeugung von positiver Hochspannung mit maximalen Ausgangsspannungen von 800V und 2kV ausgestattet. Das SY127 ist programmierbar und meldet Ausnahmezustände wie Überspannungen über den schon erwähnten seriellen Bus.

- Slow-Control Datenbank
  Neben der Aufzeichnung der *e-p* Ereignisse gibt es im Rechenzentrum des DESY eine weitere Datenbank die von allen Untersystemem des H1-Detektors die Zustandsdaten der Slow-Control speichert. Dieses System basiert auf der komerziellen Datenbank Oracle.

6.3 Datenflüsse

In Abbildung 6.1 sind die Datenflüsse der Slow-Control Informationen und der eigentlichen Meßdaten des Spursystems nur schematisch angedeutet. Die Flüsse der Slow-Control Meßdaten werden im folgenden noch etwas genauer beschrieben:

- Temperaturdaten der unabhängigen Fühler

  Die Meßwerte dieser Temperaturfühler werden, für eine Lage, analog über je ein 9 poliges Kabel an die Komparatorkarte übermittelt. Nach dem Hardware-Vergleich mit dem eingestellten Schwellenwert werden die zwölf analogen Daten zusammen mit den vier Schwellenwerten an die ADC Karte weitergegeben. Dort werden Sie programmgesteuert digitalisiert und an das Slow-Control Programm übertragen.

- Zustandswerte der Verarmungsspannungsversorgung

  Das C.A.E.N. Crate digitalisiert und überwacht die Strom- und Spannungswerte aller Ausgänge ständig ohne daß weitere programmgesteuerte Eingriffe notwendig sind. Die Aufgabe der Slow-Control beschränkt sich darauf die aktuell anliegenden Werte auszulesen und anzuzeigen. Die Daten werden dabei über die serielle Lemo Verbindung vom C.A.E.N. Crate zur A200 Karte übertragen, von dort werden sie vom Slow-Control Programm ausgelesen und weiterverarbeitet. Eingriffe bei Überspannungen und Überströmen sind bei diesem System ebenfalls nicht zeitkritisch, da diese automatisch vom Gerät vorgenommen werden. Lediglich das Wiedereinschalten der Spannungen nach dem Abschalten eines Kanals muß programmgesteuert erfolgen. Da sich im bisherigen Betrieb keine Probleme mit Überspannungen und Überströmen ergeben haben, wird das Slow-Control Programm bis auf weiteres einen ausgeschalteten Kanal automatisch wieder einschalten.

Beim Programmstart des Slow-Control Programms werden die Sollwerte für alle Kanäle, also Sollspannungen, Maximalströme und Ein- beziehungsweise Ausschaltgeschwindigkeiten an das C.A.E.N. Crate übertragen.

- Temperaturwerte der Fühler auf den Hybriden

  Die Hybriden liefern neben den Auslesedaten der 640 Streifen eines Detektors auch Slow-Control Werte. Dabei werden Meßwerte der Analogspannungen und eines Temperaturfühlers nacheinander übertragen. Diese Werte werden bei der Datenauslese im PowerPC extrahiert und stehen dann in der Si-Farm für das Slow-Control Programm zur Verfügung. Diese Daten werden gemeinsam mit den Ereignis-Daten über den Si-Taxiring von den PowerPCs in die Si-Farm übertragen. Im jetzigen Zustand des VLQ Hybriden ist es nicht klar, ob die Temperatur- und Spannungswerte in den PowerPCs erfaßt werden können, da sich bei den ersten Tests herausgestellt hat, daß die Hybriden eine zu langsame Auslegung der Ausgangsverstärker für diese "Special Cycles" haben. Die Test legen bisher nahe, daß die Erfassung der Special Cycles die gesamte Auslesekette stark verzögern würde, was die Benutzung dieser Werte verbietet. Bisher ist daher die endgültige Implementierung dieser Funktionalität nicht vorhanden.

- Versorgungsspannungen der Hybriden

  Die "Low Voltages" der OnSiRoC Spannungsversorgungen werden im OnSiRoC selbst überwacht. Zur Kontrolle für das Slow-Control Programm steht im Statusregister des OnSiRoC ein vier-Bit Zustandswert zur Verfügung, der jederzeit abgefragt werden kann. Da der OnSiRoC acht Spannungen erzeugt, aber nur vier Bits zur Kontrolle vorhanden sind, kann nur überprüft werden, ob bei einem Kanal beide Spannungen an sind (o.k.), oder ob mindestens eine Spannung aus ist (fail). Daher ist keine Identifikation der ausgefallenen Spannung V_{ana} oder V_{dig} möglich. Dies macht es unmöglich zu entscheiden, ob die mit der unabhängigen Temperaturauslese erfaßten Daten gültig sind oder nicht. Wenn V_{dig} ausfällt sind auch diese Temperaturfühler ohne Spannungsversorgung, es werden dann bei dem zugeordneten Kanal nur noch 0°C gemessen. Bei den drei Kanälen (1,2 und 3), an denen ein Temperaturfühler angeschlossen ist, ist so eine indirekte Entscheidung möglich, welche Spannung ausgefallen ist.

Die genaue Messung der Spannungen am Frontend, ist, wie schon bei den Temperaturwerten von den Hybriden beschrieben, nicht möglich.

Zur Erzeugung eines unabhängigen Hardware-Alarms haben die Konverterkarten eine Schaltung, die aus allen 32 Spannungen ein logisches Signal erzeugt, das einen Alarm im BBL3 System erzeugt, wenn mindestens eine Spannung unter einen einstellbaren Schwellenwert absinkt.

- Funktionsfähigkeit der mechanischen Steuerung

  Die Kommunikation mit der mechanischen Steuerung ist mit dem FTP Protokoll (siehe dazu [17]) auf der Basis eines TCP-IP Stacks implementiert. Dieser Programmteil arbeitet im allgemeinen recht zuverlässig. Wenn jedoch ein Netzwerkfehler auftritt, zum Beispiel durch eine momentane Überlastung des Netzwerkes, ist der Status der Mechanik nicht mehr bekannt. Daher muß in diesem Fall die Software einen Alarm auslösen.

  Die FTP Verbindung wird zwischen dem Slow-Control Macintosh und dem Windows NT PC aufgebaut, der PC holt die Daten von den Kontrollgeräten der Mechanik ab und schreibt sie in eine Datei. Diese Datei wird per FTP vom Slow-Control Programm gelesen und die Daten ausgewertet, angezeigt und gesichert.

Neben diesen Aufgaben, die mit der Erfassung von externen Daten beschäftigt sind, muß das Slow-Control Programm auch interne Aufgaben erfüllen:

- Die Uhrzeit des Macintosh wird regelmäßig überprüft. In Intervallen von ca. einer Stunde wird ein zentraler Zeitserver abgefragt und die Systemuhr des Macintosh neu gestellt. Der Gleichlauf der Uhren innerhalb des Experimentes ist wichtig um die Gleichzeitigkeit von Ereignissen aller Systeme auch in den Datenbanken reproduzieren zu können.

- Fehlermeldungen, die in einzelnen Programmteilen auftreten können, müssen verarbeitet, festgehalten und angezeigt werden. Die Verarbeitung dieser Meldungen ist neben der Kontrolle der Uhrzeit die Aufgabe der Slow-Control mit den längsten Intervallen zwischen zwei Aufrufen (einmal pro Minute).

- Treten Alarmmeldungen auf, müssen sie an das Zentrale H1-Slow-Control System ARGUS weitergegeben werden. Dies wird mittels eines "Watchdog Prozesses", der auftretende Alarmmeldungen über Netzwerkfunktionen weitergibt, implementiert.

- Benutzereingaben werden auf Plausibilität überprüft, um Fehlbedienungen und unerwünschte Systemzustände zu verhindern. Die Schleife zur Plausibilitätsüberprüfung kontrolliert gleichzeitig den Zugang zum Expertenmodus. Für den Wechsel in den Expertenmodus muß der Experte das Paßwort eingeben.
- Der aktuelle Zustand wird in regelmäßigen Abständen in die Slow-Control Datenbank (siehe Tabelle 6.2) geschrieben.

#	Name	Erklärung	Anzahl	Wertebereich	Anzahl Bytes
0	Run Information	Runnummer, Zeit...	1	..?	8
1	Temperatur	Unabhängige ADC Auslese	12	0-80	12
2	Temperatur	Hybrid... über Si-Farm	32	0-80	32
3	Low Voltage Status	OnSiROC V_{ana} und V_{dig} Status Bits	16	0-1	2
4	Bias Voltage Status	CAEN Vmon ($\frac{1}{10}$ V)	32	0-600	64
5	Bias Current Status	CAEN Imon ($\frac{1}{10}\mu$A)	32	0-600	64
6	CAEN Status	Trip, Überspannung, Überstrom, Unterspannung	32	0-15	16
7	Mechanik Status	je Modul 8 bit	2	0-256	2
8	Mechanik Position	Je Modul 1 float in μm	2	0-400,000	16

Tabelle 6.2: Vorgesehener Inhalt der VLQ-Tracker Slow-Control Datenbank.

6.4 Design des Slow-Control Systems

Die Programmierung der meisten Slow-Control Systeme bei H1 wurde auf Apple Macintosh Computern mit dem graphischen Entwicklungssystem LabVIEW ausgeführt. Da diese Hard- und Software schon vorhanden war, wurde das Slow-Control Programm für das VLQ Spursystem auch auf dieser Plattform aufgesetzt.

Die prinzipiellen Überwachungsaufgaben des Programms sind auf Abbildung 6.2 gezeigt. Die oberen drei Ablaufdiagramme in diesem Bild dienen der Temperaturüberwachung. Dabei stehen die genannten Temperaturen in den Verzweigungskästen für die folgenden, schon vorher erwähnten Temperaturmeßwerte:

- T_1
  In der Komparatorkarte auflaufende Werte der insgesamt zwölf unabhängigen Temperaturfühler.
- T_C
  Schwellenwert, der mittels Potentiometer an der Komparatorkarte festgelegt ist.

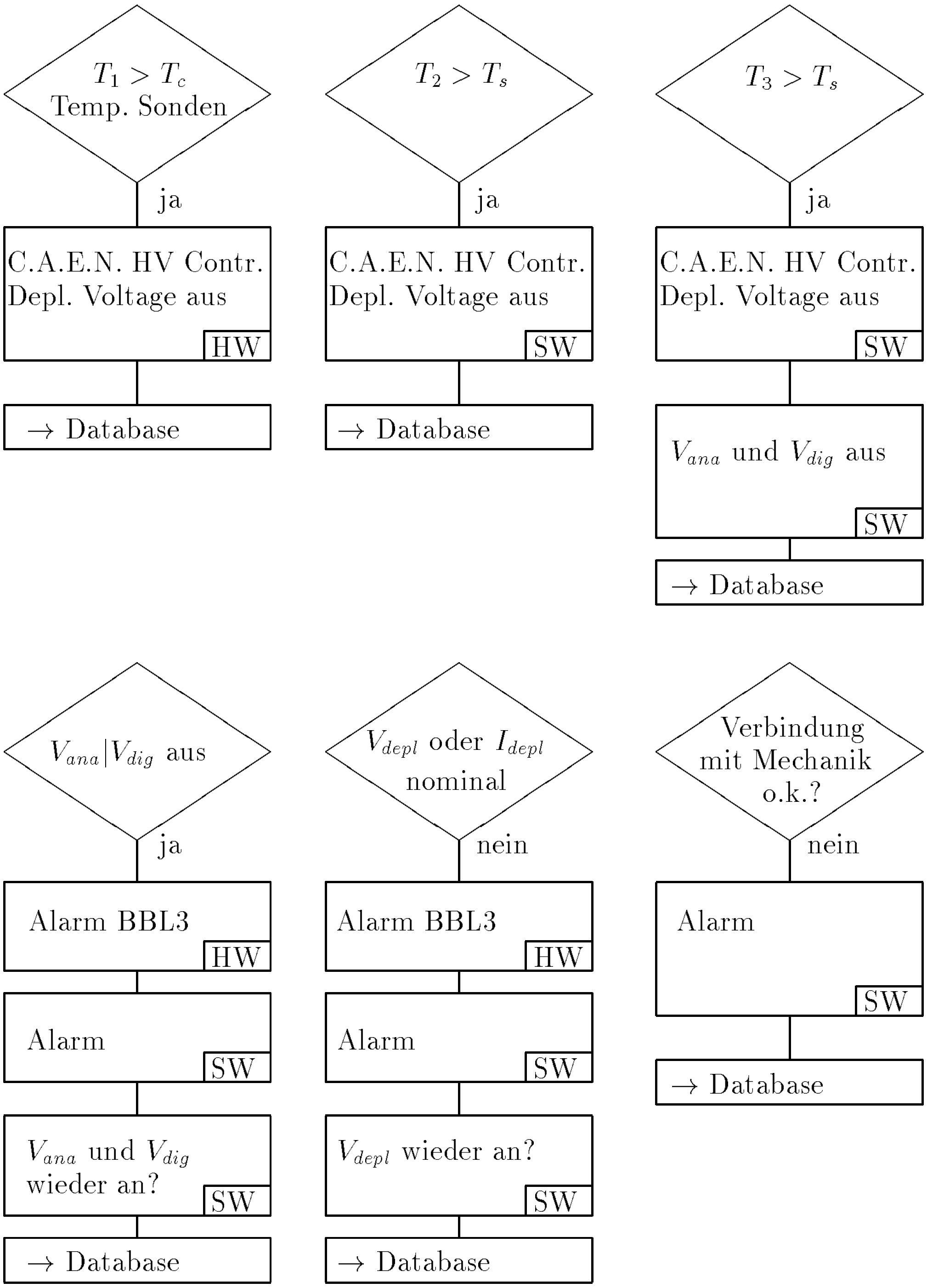

Abbildung 6.2: Vereinfachtes Flußdiagramm der parallelen Überwachung der Eingangsparameter des Slow-Control Systems. Die Bezeichnungen "SW" und "HW" zeigen ob diese Funktion soft- oder hardwareseitig implementiert ist. Die anderen Abkürzungen sind im Text erklärt.

Dabei gibt es vier Potentiometer, die jeweils die Schwellenwerte für die 3 Meßwerte einer Doppellage definieren

- T_2
  In der ADC Karte 3113A digitalisierte Meßwerte der unabhängigen Temperaturfühler. (Insgesamt 12 Werte)

- T_S
  Schwellenwert, der im Programm festgelegt ist. Wie diese Schwellenwerte verändert werden können wird in Abschnitt 6.5 erklärt.

- T_3
  Meßwerte der 20 Temperaturfühler auf den Hybriden. Da diese Messung momentan nicht implementiert ist, wie auf Seite 58 ausgeführt wurde, findet die dritte Temperaturüberwachung nicht statt.

- $V_{ana}|V_{dig}$ aus
  Überprüfung, ob laut Statusregister des OnSiRoCs alle Versorgungsspannungen vorhanden sind.

- V_{depl}, I_{depl}
  Die über die A200 aus dem C.A.E.N. System ausgelesenen Werte für die Spannungen und Ströme der Verarmungsspannungen werden mit den Sollwerten verglichen. Desweiteren wird überprüft, ob Ausnahmezustände des C.A.E.N. Systems ("Trip", Kommunikationsfehler,...) aufgetreten sind. Treten solche Fälle auf, wird ein Eingriff von der Shift Crew verlangt, die unter Umständen einen Experten rufen muß, der die Sollwerte anpaßt.

- Verbindung mit Mechanik o.k.?
  Diese Überwachungsaufgabe erfaßt das reibungslose Funktionieren der Steuerung des PCs und der Mechanik indem es überprüft, ob die Kommunikation mit diesen Komponenten gewährleistet ist. Ist dies nicht der Fall, ist der Eingriff eines Experten erforderlich.

6.5 Bedienung des Slow-Control Systems

Die Bedienungsoberfläche des Slow Control-Programmes ist auf Abbildung 6.3 zu sehen. Die Bedienungselemente des Programmes sind alle oben links in einem Rahmen mit der Bezeichnung "Run Control" zusammengefaßt. Innerhalb dieses Rahmens sind weitere Kontrollelemente zu sehen:

- HV: (Verarmungsspannungen)
  Dieses Element zeigt sich als Knopf, der je nach Zustand die Aufschrift "HV is

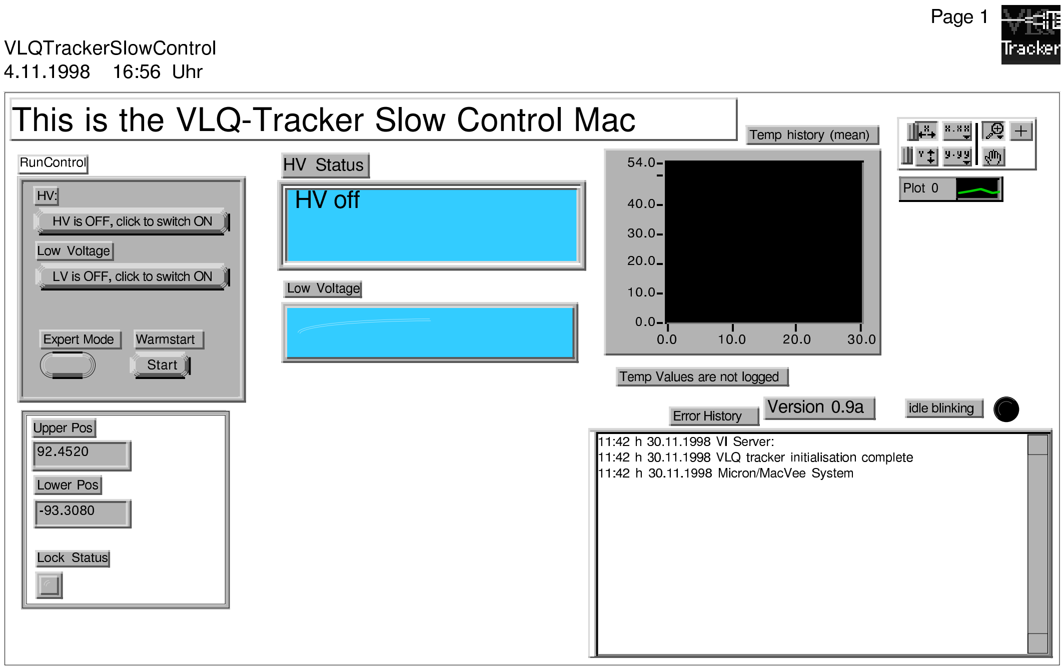

Abbildung 6.3: Ansicht der Bedienungsoberfläche des Slow-Control Programmes.

on, click to swich off" oder "HV is off, click to switch on" trägt. Rechts neben diesem Kontrollelement ist der gegenwärtige Status der Hochspannungsversorgung zu sehen. Der Standardstellung beim Start des Slow-Control Programmes ist "HV is off,...".

- Low Voltage (Versorgungsspannungen V_{ana} und V_{dig})
  Die Bedienung des Low Voltage Knopfes folgt der gleichen Logik wie die des HV Knopfes. Die beiden Bezeichnungen des Knopfes lauten "LV is on, click to swich off" und "LV is off, click to switch on". Der aktuelle Status der Spannungen wird auch hier rechts daneben angezeigt. Der Standardwert beim Start des Programmes ist "LV is off,...".

- Mech Readout (Auf Bild 6.3 nicht zu sehen)
  Im normalen Betrieb ist dieser Schalter nicht zu sehen, er wird erst im Expertenmodus sichtbar. Mit diesem Knopf wird die regelmäßige Kommunikation mit dem Windows NT PC ein- und ausgeschaltet. Dabei ist der jeweilige Zustand der Kommunikation auf dem Knopf vermerkt. Der Standardwert für diese Einstellmöglichkeit ist "ON", also regelmäßige Übertragung der Daten von der Mechanik.

- Expert Mode
  Dieser Knopf dient dazu, dem Experten des Systems weitere Details des Zustandes und Einstellmöglichkeiten des Slow-Control Programms zugänglich zu machen. Wird der Knopf gedrückt, erscheint ein weiterer Dialog der das Paßwort abfragt. Der Knopf "Expert Mode" springt nach der Eingabe des Paßworts wieder heraus und die Daten für den Experten erscheinen. Das System befindet sich daraufhin im Expertenmodus. Der Expertenmodus wird wieder verlassen, indem der "Expert Mode" Knopf wieder betätigt wird. Beim Start des Programms befindet sich das System nicht im Expertenmodus.

- Warmstart
  Der Warmstartknopf wurde hinzugefügt, da die Warmstartprozedur mittels der Taxikarte aufgrund mehrerer Defekte ausgefallen war. Sollte der Warmstart mit der Taxikarte wieder einsatzfähig sein, kann der Warmstartknopf im Slow- Control Programm wieder deaktiviert werden. Wird der Knopf gedrückt, werden, nach einer Sicherheitsabfrage, die OnSiRoCs des VLQ Spursystems neu initialisiert und mit einer neuen Steuersignalsequenz geladen.

  Diese Funktion darf nicht während einer H1 Datennahmephase (Run) gestartet werden, da der Run unter Umständen dadurch gestört werden kann.

Die Bedienung des Slow-Control Programms ist in der bisher vorgesehenen Version einfach. Wenn die Mechanik in Meßposition ist, und Daten von e-p Ereignissen gemessen werden sollen, sind die beiden Spannungen "HV" und "Low Voltage" einzuschalten. Da die Mechanik im jetzigen Zustand nur von Experten gefahren werden kann, ist die Bedienung den Experten vorbehalten. Erst wenn der gesamte Detektor aus Kalorimeter, Spursystem und Mechanik von der Shift-Crew benutzt werden kann, wird eine routinemäßige Datennahme und damit ein Betrieb der Slow-Control des VLQ Spursystems beginnen.

6.6 Fehlerzustände

Folgende Fehlerzustände wurden identifiziert und können einfach behoben werden:

- HV Communication Error (A200)
  Es besteht ein Problem bei der seriellen Kommunikation zwischen A200 Karte und dem C.A.E.N. SY127. Zur Behebung reicht es meist die Reset Taste vorne auf der A200 Karte zu drücken. Sollte ungefähr 20 s nach dem Reset keine der LEDs auf der A200 Karte anfangen zu blinken ist das C.A.E.N. Crate für circa 5 min auszuschalten und danach die A200 Karte erneut zurückzusetzen.

- HV Trip Channel: N
  Ein oder mehrere Kanäle der Verarmungsspannungsversorgung haben sich aufgrund eines Überstromes oder eines Spannungsabfalls ausgeschaltet. Normalerweise behebt sich ein solches Problem innerhalb einiger Minuten von selbst. Sollte das nicht der Fall sein, muß der Sollspannungswert für den betreffenden Kanal abgesenkt werden. Es ist auch möglich die Grenzwerte für den Maximalstrom zu erhöhen, dies sollte aber nur in Ausnahmefällen geschehen. Die Sollwerte sind in der Datei `default.config` gespeichert. Diese Datei kann mit jedem Texteditor geändert werden. Nach einer Änderung der Datei ist ein Neustart des Slow-Control Programms erforderlich, damit die neuen Werte dem Programm bekannt werden.

- Low Voltage Off -> Temp Value Invalid
  Mindestens eine Versorgungsspannung V_{ana} oder V_{dig} ist ausgefallen. Da einige dieser Spannungen auch die Temperaturfühler versorgen, können auch Temperaturmeßwerte ungültig sein. Durch aus- und wieder einschalten der Versorgungsspannungen wird dieses Problem normalerweise gelöst.

  Ist das Problem nicht behoben, ist die Spannung der zusätzlichen Spannungsversorgung der VME Backplane vom Experten zu überprüfen. Ist die Spannung dieses Moduls aus (erkennbar an der grünen Leuchtdiode an dem Modul) muß das Netzteil aus- und wieder eingeschaltet werden. Sollte die Spannung vorhanden sein, ist das VME-OnSiRoC Crate vom Experten aus- und wieder einzuschalten. Danach muß ein Warmstart der VLQ Spursystems durchgeführt werden.

Kapitel 7

Testmessungen am DESY III Elektronenstrahl

Vor Produktionsbeginn der Hybriden wurde ein Prototyp des VLQ Hybriden mit einem CST Siliziumdetektor im DESY III Elektronenstrahl getestet. Das Ziel dieses Tests war es, die Auslesekette mit dem neuen VLQ Hybriden zu testen und die Eigenschaften dieser elektronischen Bausteine kennenzulernen. Die Messungen wurden am Teststand 21 in der Halle 1 des DESY gemeinsam mit der Heidelberger Kalorimetergruppe durchgeführt. Die Ergebnisse der Testmessungen der beiden Kalorimetermodule sind in [6] zusammengefaßt.

Der DESY Teststand stellt einen Elektronenstrahl mit variabler Strahlenergie zwischen 1 GeV und 6 GeV zur Verfügung. Die Messungen für das Spursystem wurden mit einer Strahlenergie von 5 GeV durchgeführt. Durch ein Leck im Vakuum der Strahlführung der Elektronen waren die gemessenen Teilchen nicht monoenergetisch, sondern hatten eine Verteilung wie sie schon in Abbildung 3.3 gezeigt wurde. Die Energieverteilung und das Schauerverhalten der Elektronen aus dem Teststrahl wirkt sich auch auf die Messungen mit den Spurdetektoren aus.

7.1 Aufbau

Die wichtigsten Eigenschaften von Halbleiterdetektoren sind Genauigkeit der Ortsauflösung und Signal zu Rauschabstand. Diese beiden Werte sind für die CST Detektoren mit der Elektronik des CST bereits bestimmt worden. Eine Bestimmung der Ortsauflösung des CST ist in [27] zu finden. Dort wird aber von Voraussetzungen ausgegangen, die nicht auf das VLQ Spursystem zutreffen. Die intrinsische Ortsauflösung der hochauflösenden p-Seite ist dort zu $\sigma(\hat{x}) = 15.8 \pm 0.3\ \mu$m bestimmt. Bei diesem Wert ist der Einfluß der Geometrie und die Ungenauigkeit der Ortsbestimmung der einzelnen Detektoren untereinander dominant. Daher handelt es sich bei diesem Wert nicht um eine Eigenschaft des Halbleiterdetektors sondern um eine des gesamten CST Detektors.

Der Signal zu Rauschabstand des Halbleiterdetektors ist mit dem benutzten Aufbau nicht festzustellen. Bestimmt werden sollte das Signal zu Rauschverhalten der gesamten Auslesekette, vom Detektor über den Hybriden und die Subrepeater bis zur Analog Digitalwandlung.

Unter den Bedingungen des H1-Experimentes, mit der optischen Auslese und einer für den CST optimierten Auslesesequenz des CST wird ein mittlerer Wert von 23.6 für das Signal zu Rausch Verhältnis erreicht [26]. Dieser Wert wurde mit Myonen aus der kosmischen Strahlung (MIPS - minimal ionisierende Teilchen) gemessen. Dieser Wert gilt für eine in Abbildung 5.5 gezeigte Half-Ladder, also drei Detektoren mit einer Gesamtkapazität von 27 pF.

Um die Größen Signal zu Rauschen und Auflösung zu bestimmen, ist ein Aufbau mit einer guten Spurauflösung und einer hohen Triggereffizienz erforderlich. Mit Hilfe der genau gemessenen Spuren ist es möglich die Ortsauflösung des zu testenden Detektors zu bestimmen. Eine hohe Triggereffizienz für Elektronen ist notwendig, um das Signal zu Rausch Verhältnis bewerten zu können. In den folgenden zwei Abschnitten wird auf diesen Aufbau eingegangen.

7.1.1 Anordnung der Detektoren

Der Aufbau war in zwei Teile unterteilt. Einen zur Bestimmung der Spuren der durchgehenden Elektronen und einen zur Auslese des VLQ Prototypen.

Zur Bestimmung der Spuren wurde ein Silizium Teleskop verwendet. Dieses Teleskop ist ein Meßgerät, das speziell für den Test von neuen Detektoren entwickelt wurde. Es besteht aus acht Lagen Siliziumstreifendetektoren, deren Streifen abwechselnd in x- und y- Richtung angeordnet sind. Zur Auslese dieser Streifen wird der Auslesechip Premux verwendet. Das Teleskop stellt darüberhinaus einen Trigger für den Teilchendurchgang durch das aktive Volumen zur Verfügung. Es wurde am I. Physikalischen Institut der RWTH gebaut und stand uns für die Messungen mit dem VLQ Spursystem und dem VLQ Kalorimeter zur Verfügung. Weitere Details zum Si-Teleskop sind in [31] zu finden. Dort wurde für die Spurauflösung des Silizium Teleskops eine zu 11.20 ± 0.04 μm bestimmt.

In der Mitte dieses festen Aufbaus befindet sich eine Aussparung für den Detektor, dessen Eigenschaften bestimmt werden sollen. Um den VLQ Prototypen dort befestigen zu können, ist er in einem lichtdichten Aluminiumbehälter eingebaut. Die Lichtundurchlässigkeit muß sichergestellt werden, da sowohl Halbleiterstreifendetektoren als auch der Auslesehybrid lichtempfindlich sind.

Lage und Nummer	x0	y0	x1	y1	y2	x2	y3	x3
z-Position in mm	96.1	106.0	120.0	129.6	295.4	305.0	318.6	328.1
Orientierung	x	y	x	y	y	x	y	x
Nummer der Lage	0	1	2	3	4	5	6	7
Ausleserichtung	+	+	+	+	−	−	−	−
Auslesereihenfolge	0	2	1	3	6	4	7	5
Reihenfolge im Fit	0	1	2	3	5	4	7	6

Tabelle 7.1: Anordnung der Detektorebenen im Si-Teleskop. Die unterschiedlichen Zählweisen der Detektoren ergeben sich aus Unterschieden der geometrischen Anordung der Detektoren (siehe Abbildung 7.1) und der Auslesereihenfolge der ADCs. Im Fit (Abschnitt 7.4) wurden abwechselnd x- und y- Lagen benutzt, um die Übersichtlichkeit des Programms zu verbessern.

Die Anordnung der 9 Halbleiterdetektoren ist auf Abbildung 7.1 schematisch dargestellt. Die aktive Fläche der Detektoren im Teleskop ist 2×2 cm^2 groß, die des VLQ Detektors beträgt 3.195×5.623 cm^2. Die Triggerfläche, die von den gekreuzten Szintillatoren abgedeckt wird ist ebenfalls 2×2 cm^2 groß. Der erste Szintillator ist vor, der andere hinter den Streifendetektoren angebracht. Die Auslese der Szintillatoren erfolgt mit Photomutlipliern. Das Triggersignal wird von einer schnellen Elektronik mit Diskriminatoren und einer Koninzidenzschaltung im Teleskop gebildet. Die Abstände der Silizium-Detektoren sind in Tabelle 7.1 zu sehen, die z-Position des VLQ Detektors wurde erst durch den Fit in Abschnitt 7.4 bestimmt. Die Detektoren des Teleskops haben jeweils 384 Streifen, ein Detektor vom CST Typ hat 640 Auslesestreifen. Beide Detektortypen haben einen Streifenabstand von 50 μm. Es werden daher nur in einem Teilbereich des VLQ Prototypen durchgehende Elektronen untersucht. Der Aufbau wurde dabei so eingerichtet, daß der mittlere Teil, also die Streifen, die von den APCs 2-4 ausgelesen werden, von Elektronen, die den Trigger auslösen können, getroffen wurden.

Der kombinierte Aufbau aus Teleskop und VLQ Detektor war auf einem Fahrtisch vor dem Kollimator des Elektronenstrahls aufgestellt. Der Kollimator war mit einem Bleikanal mit einem Durchmesser von 0.5 cm versehen. Der Aufbau wurde nach Augenmaß in Höhe und seitlicher Verschiebung vor dem Austrittsfenster des Kollimators zentriert.

7.1.2 Auslese der einzelnen Komponenten

Im Teststand wurde eine vereinfachte Version der VLQ Datennahme und das Si-Teleskop mit seinen Elektronik- und Versorgungsmodulen aufgebaut. Folgende Kom-

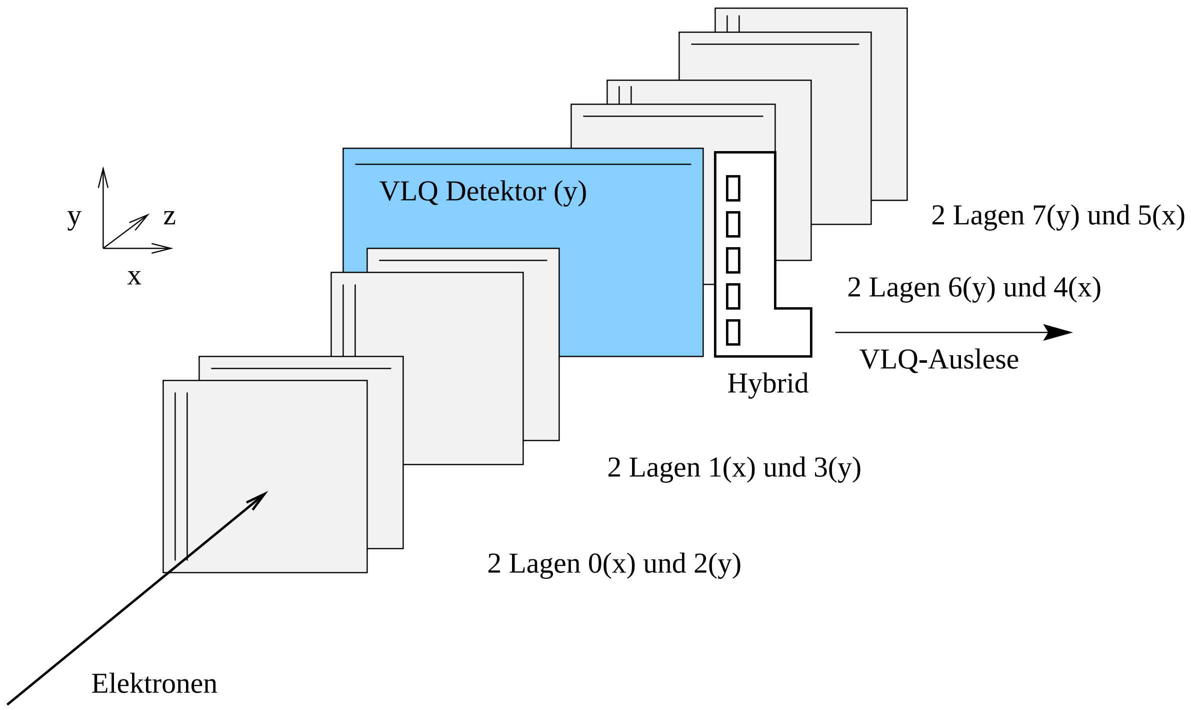

Abbildung 7.1: Schematische Ansicht der Anordnung der 8 Detektoren zur Spurbestimmung im Teleskop. Der Si-Detektor für das VLQ ist in der Mitte eingebaut.

ponenten waren im Teststand aufgebaut:

- Das Teleskop mit 8 Lagen Siliziumdetektoren und 2 gekreuzten Szintillatoren.
- Die Triggerelektronik des Teleskops zur Bildung der Koinzidenztriggersignale. Die Elektronik hält auch die schnellen Zwischenspeicher der Premux Elektronik der 8 Detektoren an, damit sie für die Auslese zur Verfügung stehen.
- Das Subrepeatermotherboard war als Prototyp vorhanden und wurde für die Messungen so modifiziert, daß die Einkopplung der Verarmungsspannung 34 in den Prototypen über ein gemeinsames Kabel mit den Versorgungsspannungen, Steuersignalen und den Auslesesignalen möglich war.

In der Meßhütte wurde die gesamte Ausleseelektronik aufgebaut:

- Für die Auslese und Versorgung des Teleskops:
  - CAMAC Crate mit 4 FADCs und Steuerungsmodul zur Kommunikation zwischen Trigger und Auslesecomputer.

  - VME-basierter Auslesecomputer mit OS/9 Betriebssystem. Dieser Rechner ist mittels VME-CAMAC "Branch-Highways" gleichzeitig CAMAC Master. Während der Messungen der Kalorimetergruppe wurde dieser Computer gleichzeitig für die Auslese des Kalorimetermoduls benutzt.
  - Nieder-, Verarmungs- und Hochspannungsversorgung für Teleskopelektronik, Siliziumdetektoren und Photomultiplier der Szintillatoren. Diese Spannungsversorgungen sind in drei einzelnen Geräten ausgeführt.

- Für die Auslese und Versorgung des VLQ Detektors:
  - Das OnSiRoC VME Crate war mit einem OnSiRoC und einer MacVEE Karte bestückt. Zur Versorgung des OnSiRoCs mit der zusätzlichen +5 V Spannung wurde ein Labornetzteil eingesetzt. Zur Auslese des Detektors wurde, anders als im H1 Experiment, der Analog-Digital Wandler (FADC) des OnSiRoCs benutzt. Die Wandlung mittels PowerPCs ist ohne Triggersignale des zentralen H1 Triggers nicht möglich. Die Daten aus dem OnSiRoC werden, wie beim PowerPC, mit 12 Bit Tiefe ausgelesen. Zwischen den Detektor und den OnSiRoC wurde ein Prototyp der Konverterkarte geschaltet. Die Messungen, die in Anhang B aufgelistet sind, wurden mit drei verschiedenen Einstellungen der Konverterkarte vorgenommen.
  - Macintosh Computer mit LabVIEW Programm zur Datennahme. Dieser Rechner ist über das Micron/MacVEE System mit dem OnSiRoC VME Crate verbunden. Das Programm zur Datennahme ist in [30] beschrieben.
  - Die Verarmungsspannung von 50 V wurde von einem weiteren Labornetzteil geliefert.

7.2 Auswertung der Messungen

Alle Messungen mit diesem Aufbau sind im Anhang B in einer Tabelle (S. 109) zusammengefaßt. Um diese Messungen auszuwerten, sind die Schritte notwendig, die in den nächsten Abschnitten erklärt werden.

7.2.1 Trefferidentifikation

Ein getriggertes Ereignis des VLQ Prototypen findet sich als Abfolge von 12 Bit Informationen pro Streifen in einer Datei. Die FADCs der Teleskopauslese liefern für jeden Streifen eine 6 Bit Information. Graphisch aufgetragen ist eine solche Abfolge von Informationen für je ein Ereignis des VLQ Prototypen und einen Detektor des Teleskops in Abbildung 7.2. Es ist ohne eine gute Kenntnis des Detektors, selbst für die gute Mustererkennung des menschlichen Gehirns, nicht immer möglich, einen Treffer als solchen zu identifizieren. Die Signale aus dem Silizium Teleskop sind als lokale Maxima in den Meßdaten zu erkennen, die Signatur eines Teilchentreffers bei dem VLQ Detektor ist die eines Minimums. Dieser Unterschied ist in der unterschiedlichen Art der Auslese begründet, das Ausgangssignal des VLQ Hybriden wird durch die Ausleseelektronik invertiert. Um die Treffererkennung zu automatisieren, sind einige Rechenschritte notwendig.

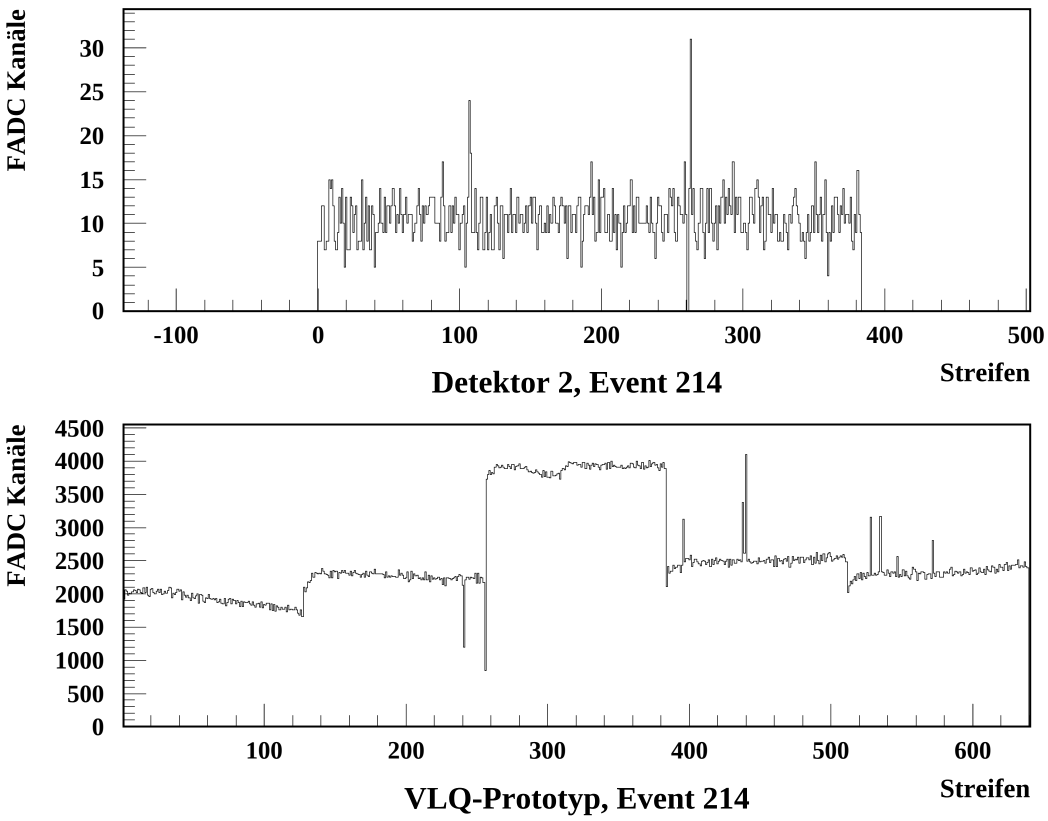

Abbildung 7.2: Rohdaten aus Detektor 2 des Teleskops (oben) und aus dem VLQ Prototypen (unten). Die Daten stammen aus der Messung 8102.

Um die Common Mode Schwankungen auszugleichen, subtrahiert man den Common

Mode CM (siehe 5.3) für den VLQ Detektor

$$\mathrm{CM}_{apc}^{\mathrm{VLQ}} = \frac{1}{N} \sum_{i=N*apc}^{N-1+N*apc} \mathrm{str}_i^{\mathrm{VLQ}} \qquad apc = \quad 0..4$$

$\mathrm{str}_i^{\mathrm{VLQ}}$ Meßwert des i-ten Streifens

N Anzahl der Streifen pro APC (128)

bzw. für die Teleskop Detektoren

$$\mathrm{CM}_{det}^{\mathrm{Tel}} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M} \mathrm{str}_{i,det}^{\mathrm{Tel}} \qquad det = \quad 0..7$$

M Anzahl der Streifen pro Detektor (384)

von jedem Streifen. Daraus ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 7.4 zu sehen.

Der Common Mode des VLQ Detektors schwankt nicht nur für den gesamten Detektor, sondern auch für jeden einzelnen APC. Daher wird für den VLQ Detektor ein Common Mode für jeden APC, also für jeweils 128 Kanäle berechnet. Erkennbar wird die Abhängigkeit des Common Mode vom APC in Bild 7.3. Dort ist deutlich zu erkennen, daß die gemeinsame Schwankung der APCs 1 und 5 überwiegt, es aber noch weitere Abhängigkeiten zwischen den Signalen der einzelnen Auslesechips gibt, die nur durch eine APC-weise Bestimmung des Common Mode korrigiert werden können.

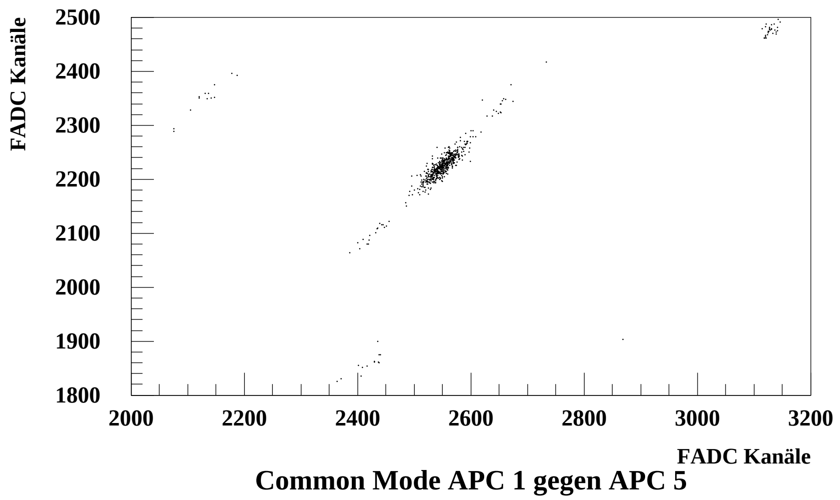

Abbildung 7.3: Aus der Rauschmessung 8107n gewonnene Abhängigkeit zwischen den Common Modes der APCs 1 und 5. Neben den dominanten gemeinsamen Schwankungen gibt es Sprünge in den Signalniveaus der APCs.

Zieht man den Common Mode von den Rohdaten ab, zeigt das Bild für jeden APC eine um Null schwankende Verteilung (Abbildung 7.4, unten).

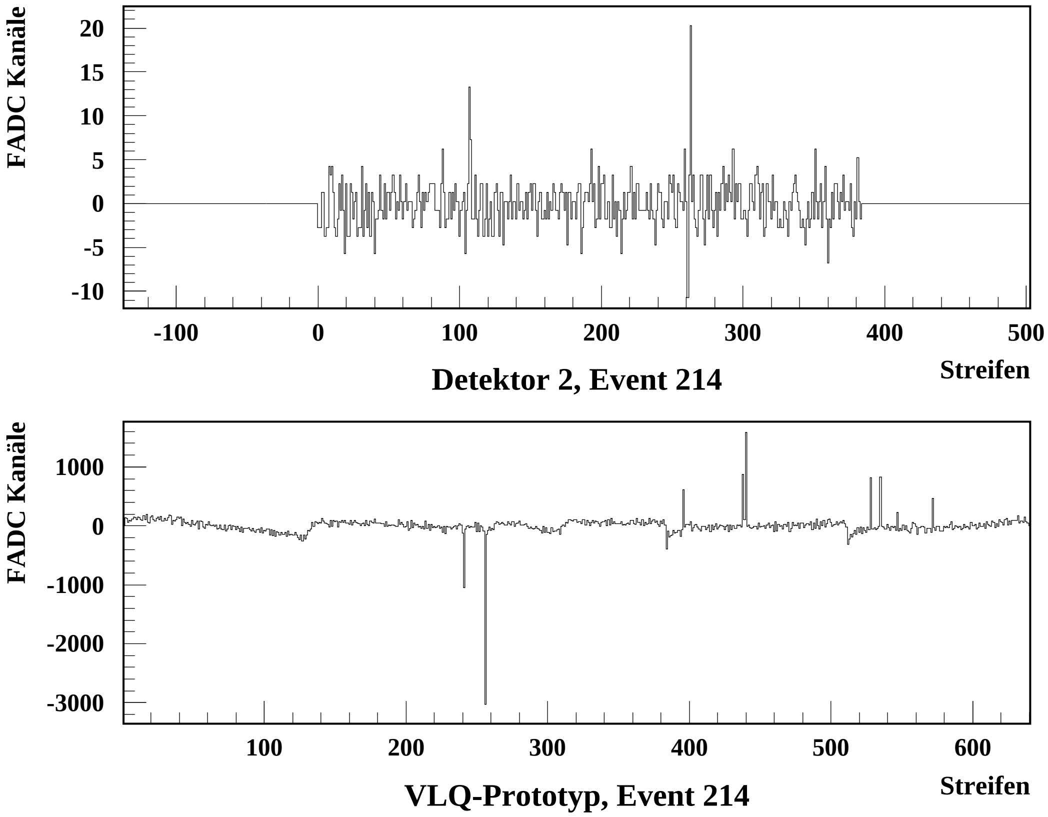

Abbildung 7.4: Common Mode subtrahierte Rohdaten des zweiten Detektors des Teleskops und des VLQ Prototypen. Die Daten zeigen das gleiche Ereignis wie in Abbildung 7.2.

Da aber nicht nur die Schwankungen von Ereignis zu Ereignis eine Erkennung der Teilchentreffer erschweren, wird eine weitere Subtraktion von kumulierten Mittelwerten eines jeden Streifens vorgenommen. Dieses Pedestal wird aus allen Common Mode subtrahierten Ereignissen mit

$$\mathrm{Ped}_i^{\mathrm{VLQ}} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}(\mathrm{str}_{n,i}^{\mathrm{VLQ}} - \mathrm{CM}_{n,apc(i)}^{\mathrm{VLQ}})$$

N	Anzahl der Ereignisse
$\mathrm{CM}_{n,apc(i)}^{\mathrm{VLQ}}$	Common Mode des n-ten Ereignisses
$\mathrm{str}_{n,i}^{\mathrm{VLQ}}$	Meßwert des i-ten Streifens beim n-ten Ereignis
$apc(i)$	zum Streifen i gehöriger APC

beziehungsweise

$$\mathrm{Ped}_{i,det}^{\mathrm{Tel}} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}(\mathrm{str}_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} - \mathrm{CM}_{n,det}^{\mathrm{Tel}})$$

det	Detektor 0 bis 7
$\mathrm{CM}_{n,det}^{\mathrm{Tel}}$	Common Mode des n-ten Ereignisses, Detektor det
$\mathrm{str}_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}}$	Meßwert des i-ten Streifens beim n-ten Ereignis, Detektor det

einer Messung bestimmt und korrigiert die Unterschiede in der Signalhöhe benachbarter Streifen. Die Common Mode- und Pedestal-korrigierten Daten sind in Abbildung 7.5 aufgetragen. Die in Abbildung 7.4 noch zu erkennende Struktur in den Daten ist nach der Pedestal-Subtraktion nicht mehr erkennbar. Die Struktur ist besonders bei dem VLQ Detektor zu erkennen, bei dem an den APC Grenzen bei Streifen Nummer 128, 256, 384 und 512 Sprünge zu sehen sind.

Da sich herausgestellt hat, daß das Pedestal der Auslese mit dem APC nicht nur von der Streifennummer, sondern auch vom Pipeline Buffer abhängig ist, wird das Pedestal bei ausreichender Anzahl von Ereignissen in Abhängigkeit vom Pipeline Buffer berechnet:

$$\mathrm{Ped}_{i,\mathrm{PIC}}^{\mathrm{VLQ}} = \frac{1}{N_{\mathrm{PIC}}}\sum_{n=0}^{N_{\mathrm{PIC}}}(\mathrm{str}_{n,i,\mathrm{PIC}}^{\mathrm{VLQ}} - \mathrm{CM}_{n,apc(i)}^{\mathrm{VLQ}}).$$

Um die Signifikanz des Wertes jedes Streifens beurteilen zu können, wird die Varianz

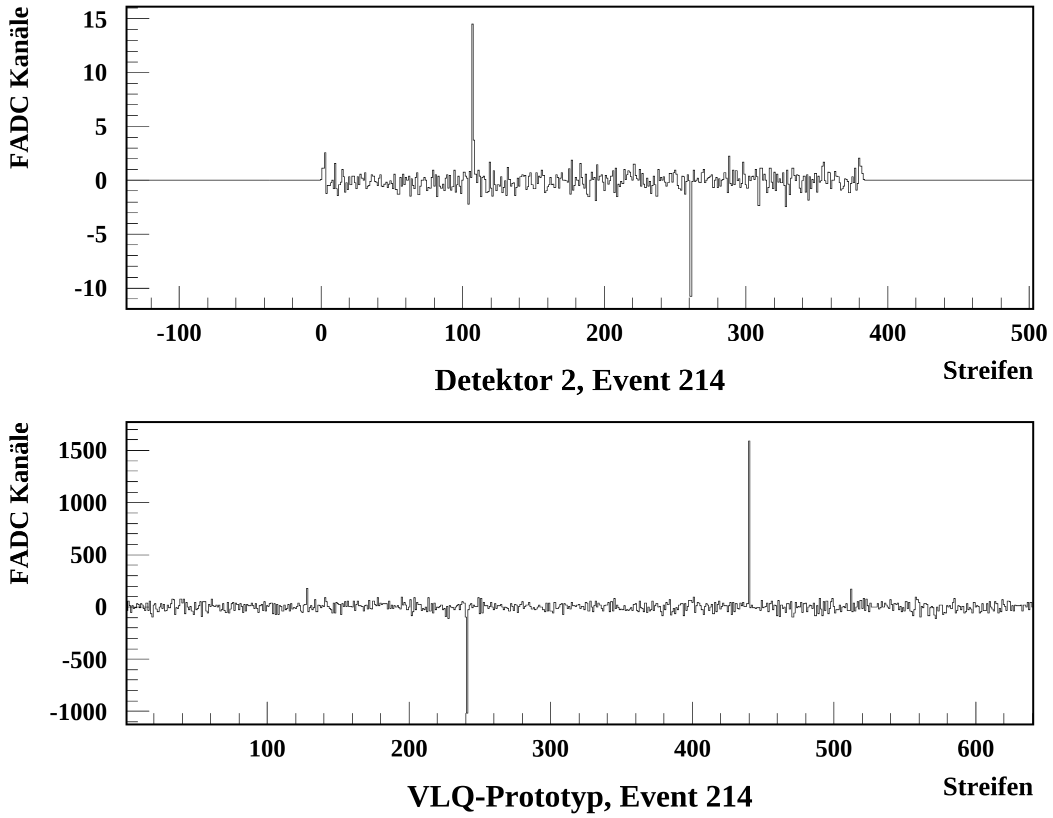

Abbildung 7.5: Die Rohdaten aus Abbildung 7.2, Common Mode und Pedestal subtrahiert. Dabei wurde für den Prototypen ein Pedestal für den Pipeline Buffer 6 verwendet.

der Meßwerte über alle Ereignisse bestimmt:

$$
\begin{aligned}
S_{n,i}^{\mathrm{VLQ}} &= \mathrm{str}_{n,i}^{\mathrm{VLQ}} - \mathrm{Ped}_{i}^{\mathrm{VLQ}} - \mathrm{CM}_{n,apc(i)}^{\mathrm{VLQ}} \\
\langle S_{i}^{\mathrm{VLQ}} \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{n,i}^{\mathrm{VLQ}} \\
\sigma_{i}^{\mathrm{VLQ}} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N} \left(S_{n,i}^{\mathrm{VLQ}} - \langle S_{i}^{\mathrm{VLQ}} \rangle \right)^2} \\
S_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} &= \mathrm{str}_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} - \mathrm{Ped}_{i,det}^{\mathrm{Tel}} - \mathrm{CM}_{n,det}^{\mathrm{Tel}} \\
\langle S_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} \\
\sigma_{i,det}^{\mathrm{Tel}} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N} \left(S_{n,i,det}^{\mathrm{Tel}} - \langle S_{i,det}^{\mathrm{Tel}} \rangle \right)^2}.
\end{aligned}
$$

Die Werte σ_i^{VLQ} und $\sigma_{i,det}^{\mathrm{Tel}}$ für die ausgewählte Messung sind auf Abbildung 7.6 zu sehen. Die Werte σ_i^{VLQ} werden nicht nur für jeden Streifen, sondern auch für jeden der 32 Pipeline Buffer des APCs gesondert berechnet. Der Wert des Pedestals ist ebenfalls Pipeline Buffer abhängig. Es ist daher notwendig für jeden Detektor 32 Pedestal- und Rauschdatensätze zu bestimmen.

Teilt man die Common Mode- und Pedestal korrigierten Werte aus Bild 7.5 durch die Rauschwerte

$$(\mathrm{S/N})_i^{\mathrm{VLQ}} = \frac{S_i^{\mathrm{VLQ}}}{-\sigma_i^{\mathrm{VLQ}}} \qquad \text{bzw.} \qquad (\mathrm{S/N})_i^{\mathrm{Tel}} = \frac{S_i^{\mathrm{Tel}}}{\sigma_i^{\mathrm{Tel}}}$$

erhält man Bild 7.8. Bei dem VLQ Prototypen wurden dabei die korrigierten Signale durch $-\sigma_i^{\mathrm{VLQ}}$ geteilt, da das Signal eines Elektrons auf diese Weise positiv wird. Bei der weiteren Berechnung von Trefferpositionen werden Streifen mit einem σ_i^{VLQ} nicht berücksichtigt. Es ist in den Abbildungen 7.6 und 7.5 beziehungsweise 7.8 zu erkennen, daß der Streifen mit der Nummer 440 durch dieses Kriterium auf den Wert Null gezogen wird.

Der Verlauf des Rauschens in Abbildung 7.6 über alle Streifen des VLQ Detektors zeigt einen Anstieg des Rauschens im Triggerbereich zwischen den Streifen 140 und 550. Dieser Verlauf ist begründet in der Art der Berechnung der σ_i^{VLQ}-Werte aus den Daten, die Elektronen enthalten. Wenn eine Datenmenge, die ausschließlich aus Rauschen besteht, zur Berechnung der σ_i^{VLQ} herangezogen wird, ergibt sich eine Verteilung der Rauschwerte für die gleichen Streifen und im gleichen Pipeline Buffer, wie sie in Abbildung 7.7 zu sehen ist. Diese Rauschwerte wurden aus einer Messung (8107n) ohne Elektronen, mit einem Zufallstrigger bestimmt. Der Mittelwert des Rauschens ist bei dieser Berechnung etwas niedriger und der Detektor ist insgesamt etwas "ruhiger", einige Streifen rauschen auch ohne Einfluß der Messung stark.

Die weitere Behandlung der Meßwerte wird mit den Rauschwerten aus der Messung mit Elektronen durchgeführt. Die Signal-Rauschabstände der Treffer sind größer, wenn die Trefferidentifikation mit einem gesonderten Rauschdatensatz durchgeführt wird. Da es im Rahmen des H1 Experimentes aber nicht möglich ist, regelmäßig Rauschdaten aufzuzeichnen, wird die Bearbeitung der Daten im weiteren mit Rausch- und Pedestalwerten aus der Messung vorgeführt.

7.3 Berechnung von Clusterschwerpunkten

Sind die Daten in einer Form wie in Abbildung 7.8 vorhanden, ist die nächste Aufgabe, den Ort der Teilchendurchgangs zu rekonstruieren. Ist der Ort bestimmt, kann durch einen Vergleich mit den Referenzwerten aus dem Teleskop die Ortsauflösung bestimmt werden.

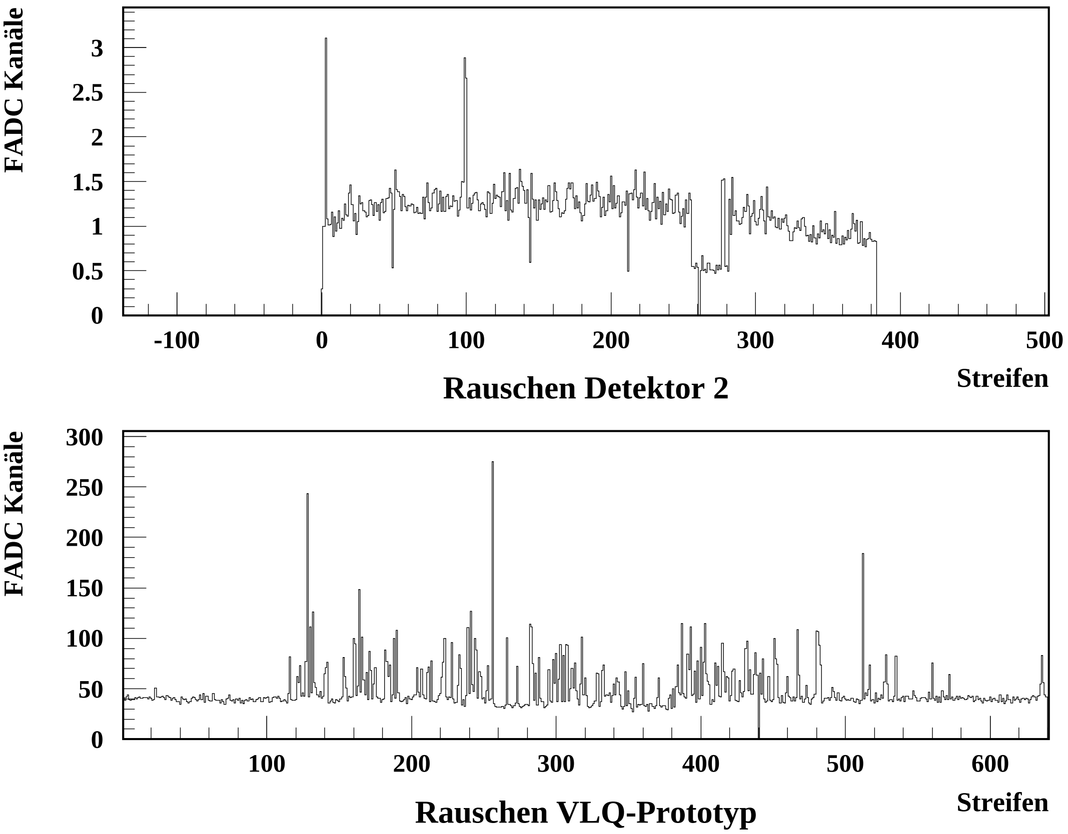

Abbildung 7.6: Die Rauschwerte eines Teleskopdetektors und des VLQ Prototypen aus der Messung 8102. Die Werte des VLQ Prototypen sind für den Pipeline Buffer 6, aus dem das bisher gezeigte Ereignis 214 ausgelesen wurde, aufgetragen.

Das Detektorsignal, inklusive der Ortsauflösung eines Halbleiters kann auch mit Simulationsrechnungen berechnet werden. Zu diesem Zweck existieren Programmpakete, die in der Lage sind das Verhalten von Siliziumdetektoren zu beschreiben. Da eine solche Berechnung nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, wird hier nur die Bestimmung aus den Meßdaten durchgeführt.

7.3.1 Digitale Auflösung

Die Auflösung eines Detektors zur Ortsbestimmung wird an der “digitalen Auflösung” gemessen. Die digitale Auflösung ergibt sich aus der Standardabweichung einer Rechteckverteilung. Die Rechteckverteilung ist dabei eine Vereinfachung der Detektorantwort

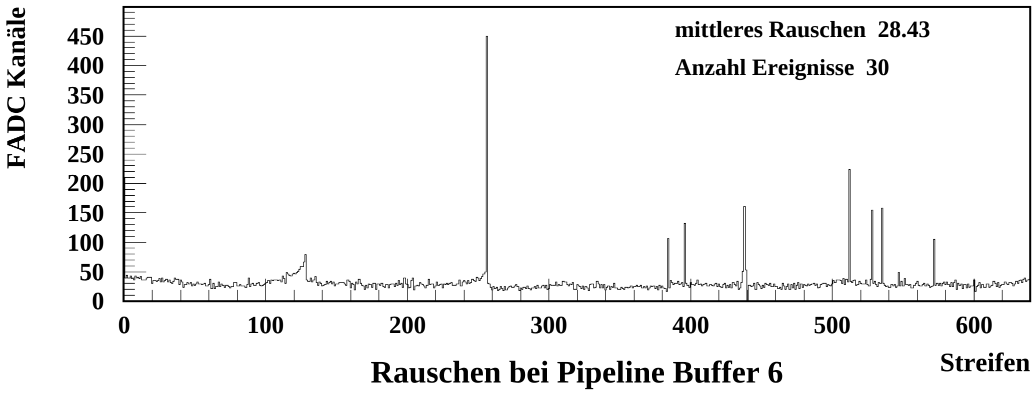

Abbildung 7.7: Rauschen der Streifen des VLQ Prototypen. Die Ereignisse zur Bestimmung dieser Werte wurden mit einem Zufallstrigger aufgezeichnet (Messung 8107n).

bei einem Teilchendurchgang durch die betrachtete Zelle von der Dicke d. Dieser Detektor liefert eine 1, wenn ein Teilchen durch die Zelle hindurch geht, sonst eine 0.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & -d/2 < x < d/2, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Der Erwartungswert $\langle f \rangle = \int x f(x) dx$ dieser Verteilung ist offensichtlich 0. Ein Teilchendetektor hat bei einer Zellengröße d eine digitale Auflösung von:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{\int f(x)(x - \langle f \rangle)^2 dx}{\int f(x) dx} \\ &= \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} 1 \cdot x^2 dx \\ &= \frac{d^3/12}{d} = d^2/12 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \sigma_x = \frac{d}{\sqrt{12}}$$

Für einen Streifenabstand von 50 μm ist $\sigma_x = 14,4$ μm. Da kein realer Detektor ein Antwortverhalten wie $f(x)$ hat und die Antwortfunktion von Detektor und Auslesesystem nicht einfach darstellbar ist, muß die Ortsauflösung aus Testmessungen mit bekannten Teilchenspuren oder aus Monte Carlo Simulationen bestimmt werden.

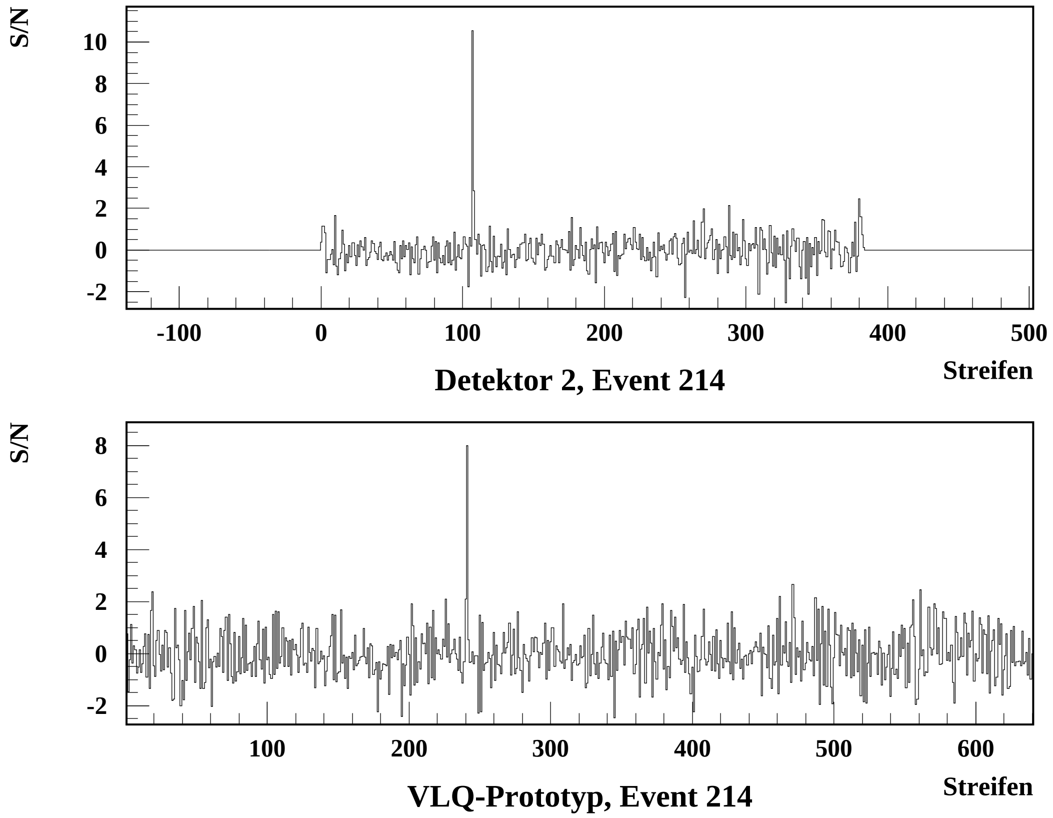

Abbildung 7.8: Common Mode und Pedestal subtrahierte Rohdaten, geteilt durch die Rauschwerte der jeweiligen Streifen.

7.3.2 Schwerpunktsalgorithmus

Nach der Anwendung aller bisher aufgezählten Schritte, ist ein Treffer eindeutig festzumachen indem eine Schwelle $(S/N)_{\mathrm{cut}}$ gesetzt wird. Die einfachste Möglichkeit einen Treffer zu definieren besteht darin, in den S/N Daten, wie sie in Abbildung 7.8 zu sehen sind, nach Streifen zu suchen, die eine feste Schwelle überschreiten. Auf diese Weise erhält man aber als Trefferposition lediglich eine Streifennummer, also eine Auflösung in der Größenordnung der Streifenabstände. Um diese Auflösung zu verbessern, wird auf die Daten ein "Center of Gravity"- oder Schwerpunkts-Algorithmus angewendet. Dieser liefert eine Position P_{COG}, den Clusterschwerpunkt, beginnend von dem ersten

Streifen, der $(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}}$ überschreitet:

$$P_{\mathrm{COG}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} i \cdot (\mathrm{S/N})_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} (\mathrm{S/N})_i}.$$

$(\mathrm{S/N})_i = S_i^{VLQ}/\sigma_i$	Rauschabstand des Streifens i innerhalb des betrachteten Clusters
n	Anzahl der Streifen mit S/N >$(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}}$

Die wahre Position Pos des Trefferschwerpunktes erhält man also, bei einem Streifendetektor mit 0.05 mm Streifenabstand, aus:

$$\mathrm{Pos} = (P_0 + P_{\mathrm{COG}}) \times 0.05 \text{ mm}$$

P_0 ist die Nummer des ersten Streifens des Clusters.

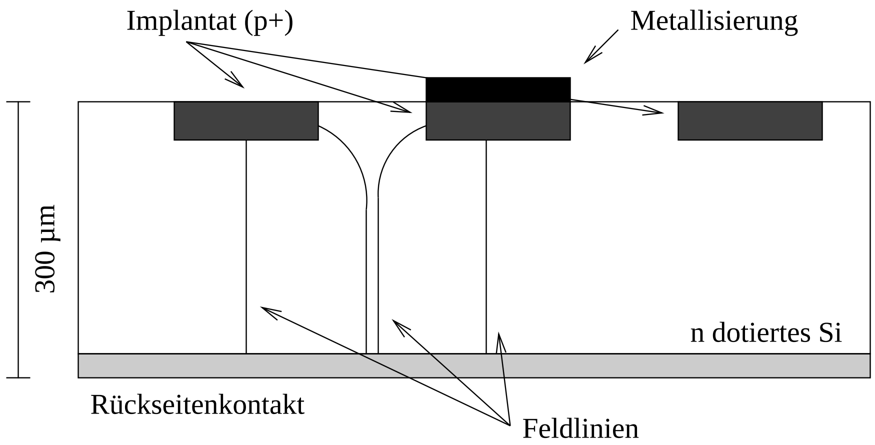

Abbildung 7.9: Schematische Darstellung des Streifendetektors des VLQ Spursystems zur Ladungsteilung. Teilchenspuren, die zwischen zwei Streifen hindurchgehen, können Ladungen auf beiden Streifen erzeugen. Da nur jeder zweite Streifen metallisiert ist werden die dazwischenliegenden Streifen durch die kapazitive Kopplung ausgelesen.

Der Grund für die Verbesserung der Ortsrekonstruktion durch den COG-Algorithmus liegt in der Konstruktion des Detektors. Bei dem verwendeten Detektor ist nur jeder zweite Streifen mit einer Metallisierung versehen. Die Ladungsträger, die auf die nicht metallisierten Streifen abgeleitet werden, werden kapazitiv als Spiegelladungen auf den kontaktierten Streifen nachgewiesen (siehe 7.9). Da die Ladung auf einem solchen mittleren Streifen immer das Signal zweier Streifen beeinflußt, ist die Clustergröße solcher Ereignisse größer als eins, dies Bezeichnet man als Ladungsteilung.

Das alleine ermöglicht noch keine verbesserte Ortsbestimmung mit dem COG Algorithmus. Da die gemessenen Signale eines Streifens nicht nur digitale Informationen, sondern proportional zur deponierten Energie sind, ist es möglich, aus der Verteilung der Signale eines Clusters auf den Ort des Teilchendurchgangs rückzuschließen.

Der Clusteralgorithmus, der zur Berechnung der Trefferpositionen im VLQ Detektor verwendet wurde, hat zwei verschiedene Schwellen: Eine niedrige $(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}}$ um die Treffersuche zu starten, und eine höhere, die an die Summe der Signal zu Rauschwerte eines Clusters angelegt wird, um eine eindeutige Trennung zwischen Signal und Rauschen vornehmen zu können. Signale, bei denen ein oder mehrere Streifen die Schwelle $(S/N)_{\mathrm{cut}}$ überschreiten, können noch verworfen werden, wenn die Summe $\sum(\mathrm{S/N})_i$ die hohe Schwelle nicht überschreitet. Zwei unterschiedliche Schwellen werden eingeführt, um einen möglichst guten Kompromiß zwischen Effizienz und Ortsauflösung zu erreichen.

Wird nur ein Schwellenwert für S/N benutzt, und zu groß gewählt, sinkt die Effizienz, da Ereignisse, die nur eine kleines Signal erzeugen, nicht erkannt werden. Die Ortsauflösung verschlechtert sich dabei, durch den größeren Anteil von Ereignissen mit Clustergröße 1.

Senkt man den Parameter $(S/N)_{\mathrm{cut}}$ ab, so werden mehr Ereignisse eine Clustergröße über 1 erhalten, es werden jedoch auch mehr nebeneinanderliegende Streifen, die zufällig in die gleiche Richtung fluktuieren, als Treffer erkannt.

Um dieser Problematik beizukommen werden zwei Schwellen verwendet, eine niedrige $(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}}$ um dem COG Algorithmus mehrstreifige Treffer anzubieten und so die Ortsauflösung zu verbessern und eine große $\sum(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}}$ um eindeutig Signale zu erhalten.

Es hat sich als beste Lösung herausgestellt, Schwellenwerte von $\sum(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}} = 6$ und $(\mathrm{S/N})_{\mathrm{cut}} = 2.5$ für den VLQ Detektor anzuwenden. Mit diesem Schnitten erhält man eine Verteilung der Clustergrößen, wie sie in Abbildung 7.10 zu sehen ist. Der Mittelwert der Clustergröße liegt etwas über 2, so daß mindestens bei jedem zweiten Cluster eine Verbesserung der Trefferrekonstruktion durch den COG-Algorithmus zu erzielen ist.

Der verwendete Detektortyp ist mit dem COG-Algorithmus in der Lage eine bessere Auflösung als die digitale zu erreichen.

In den folgenden Abschnitten werden die Spuren berechnet und die Teleskopdetektoren ausgerichtet, danach wird in Abschnitt 7.5 die Auflösung bestimmt.

7.3.3 Rauschabstand, Effizienz und das Verhalten des Auslesesystems

Ein wichtiges Ziel der Testmessungen war es, herauszufinden, wie effizient die Auslese und Datennahme mit dem VLQ Hybriden und dem OnSiRoC ist. Um über die

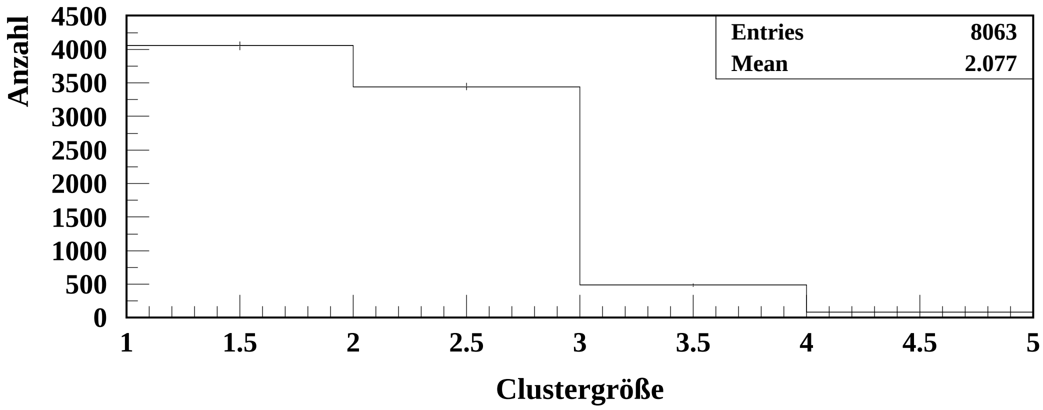

Abbildung 7.10: Verteilung der Clustergrößen in den 11000 Ereignissen der Messungen 8106-8. Die Schwellenwerte für die Clusterbestimmung waren 2.5 und 6.

Effizienz eine Aussage machen zu können, wird das Kriterium der Clusterrekonstruktionseffizienz ausgewählt. Diese Größe gibt an, bei welchem Anteil der getriggerten Ereignisse ein Cluster im VLQ Prototypen rekonstruiert werden konnte. Die Effizienz der Clustermessung liegt bei diesen beiden Messungen weit auseinander, da diese Messungen mit unterschiedlichen Einstellungen der Konverterkarte aufgezeichnet wurden. Die Messung 8104 wurde mit einer minimalen Verstärkung aufgezeichnet, was einem Verzicht auf 60% des Akzeptanzbereiches des FADCs für die APCs $\neq 2$ entspricht.

Die anderen Messungen, die eine gute Ausnutzung des Akzeptanzbereiches des Analog-Digital Wandlers hatten, liefern eine Clusterrekonstruktionseffizienz, die größer als 85% ist. Es ist auch möglich andere Größen als Effizienz des Detektors zu definieren,

Messung 8106		Messung 8104		
Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	
5001	100%	4001	100%	Ereignisse
4553	91%	3595	89%	mit mindestens einer akzeptierten Spur
4354	78%	2191	54%	mit mindestens einem Treffer im VLQ Prototypen
5223		2749		Treffer im VLQ Prototypen
40662		32503		Treffer im Teleskop
336025	100%	284089	100%	Spuren rekonstruiert
4988	1.5%	3961	1.4%	Spuren ausgewählt

Tabelle 7.2: Tabelle der Effizienzen zweier Ausgewählter Messungen

alle haben jedoch gemeinsam, daß durch die schlechte Qualität des Elektronenstrahls eine Vielzahl von Ereignissen mit Vielfachstreuung und Abstrahlung von Sekundärteilchen eine saubere Definition der Effizienz nicht möglich ist. Der Zweck einer solchen Größe wird aber auch von der oben definierten erfüllt, denn diese Größe stellt eine Vergleichbarkeit der Effizienzen bei verschiedenen Einstellungen der Konverterkarte her.

Der Akzeptanzbereich der Messungen mit dem Prototypen ist insgesamt eingeschränkt, da die Pedestals der APCs sich sehr stark unterscheiden. Zu erkennen ist dies in Abbildung 7.2. Für die Messung wurde eine Einstellung der Konverterkarte gewählt, bei der die Signale der APCs 0, 1, 3 und 4 so hoch wie möglich liegen, ohne daß das Signal des APC 2 in den Bereich der Sättigung gelangt. Durch den großen Unterschied der Signalniveaus der APCs geht bei den APCs 0, 1, 3 und 4 etwa die Hälfte des Akzeptanzbereiches verloren. Bei den Hybriden der Serienfertigung wurde dies durch sorgfältige Selektion der Bauteile vermieden. Die Unterschiede in den Pedestals der APCs bei den Hybriden, die in das VLQ Spursystem eingebaut wurden, sind nicht größer als 1000 FADC Kanäle.

Eine Teilchendetektor mit einer energieabhängigen Detektorantwort hat eine Signalverteilung gemäß einer Landau-Verteilung

$$L(x) = P_3 \cdot \Lambda(\frac{x - P_1}{P_2}) \quad \text{mit}$$
$$\Lambda(t) = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty e^{-u\ln u - ut}\sin(\pi u)du.$$

Die Parameter P_1 bis P_3 sind die freien Parameter, mit denen die Meßwerte an die Landau-Verteilung angepaßt werden. P_3 gibt dabei die Fläche unter der Kurve, P_1 die Position des wahrscheinlichsten Wertes und P_2 die Breite der Verteilung an.

Da die Energie des Elektronenstrahls am Teststand nicht eindeutig festgelegt war, wie schon in [6] und [31] berichtet wurde und die Verteilung der Rauschwerte gaußförmig ist, beschreibt die Landau-Verteilung allein die Form der Verteilung nicht ausreichend. Die Funktion $L(x)$ wurde daher mit einer Gaußverteilung gefaltet und dann angepaßt.

In Abbildung 7.11 sind die Signal zu Rauschwerte für die Cluster aus 11000 Ereignissen aufgetragen. Die Daten sind aufgeteilt in Treffer in den Bereich des mittleren APCs (unten) und in den Bereich der APCs 0, 1, 3 und 4 (oben). Diese Trennung nach APCs wird durch die unterschiedlichen Werte der Kalibration (siehe 5.3), die in Abbildung 7.12 zu sehen sind, nahegelegt.

Für die vier APCs (0, 1, 3, 4) ergibt sich ein wahrscheinlichster Wert für S/N eines Clusters von 9.96, der mittlere APC (2) liefert am wahrscheinlichsten einen Wert von 10.45.

Auf der rechten Seite von Abbildung 7.12 ist der Verlauf der Kalibrationspulse für den APC 2 aufgetragen. Die Differenz je zweier benachbarter Kanäle ist auf der linken Seite

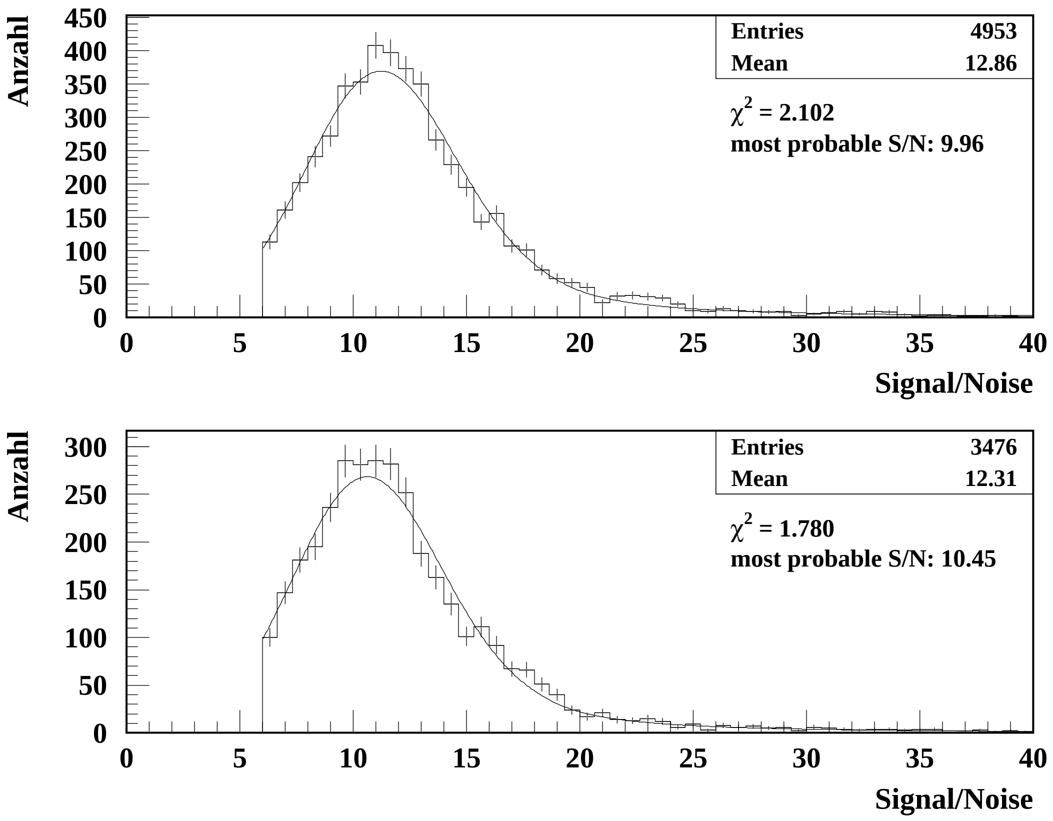

Abbildung 7.11: Verteilung des summierten Cluster Signalabstandes. Es wurden nur Cluster, die zu guten Spuren passen, ausgewählt. Den Daten liegen 11000 Ereignisse aus den Messungen 8106-8 zugrunde. Sie wurden aufgeteilt in Treffer auf den APCs 0, 1, 3 und 4 (oben) und 2 (unten).

von Abbildung 7.12 zu sehen. Die Werte sind in der Abbildung schon nach Formel 5.1 in e^-/FADC Kanal umgerechnet. Es ist deutlich zu erkennen, daß der APC 2 andere Eigenschaften hat als die anderen. Auf diese Weise kann auch eine Erklärung für die großen Unterschiede in den Signalniveaus der APCs gegeben werden. Der Ausgangsverstärker des APC 2 hat eine größere Verstärkung als die anderen APCs, daher liefert er bei gleichen Bedingungen ein höheres Signal pro FADC Kanal.

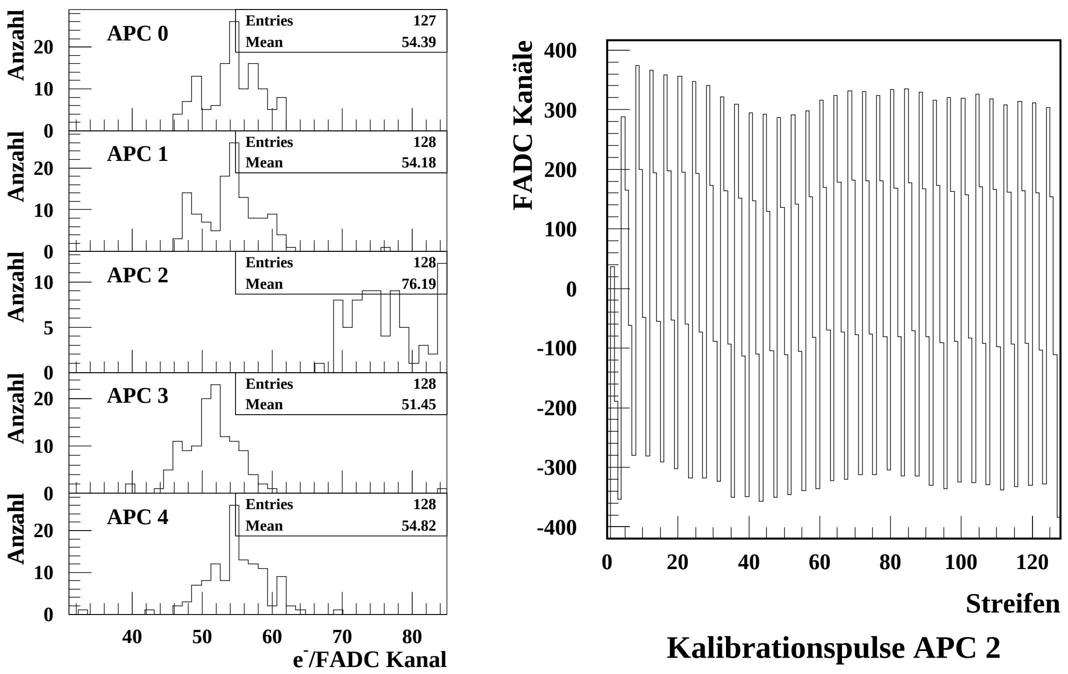

Abbildung 7.12: Auf der rechten Seite ist der Verlauf der Kalibrationssignale an einem Beispiel aus Messung 8107c gezeigt. Auf der linken Seite ist die mittlere Pulshöhe der Kalibrationspulse für die 5 APCs des Prototypen aufgetragen.

7.3.4 Spurberechnung

Um aus den Clustern der Trefferidentifikation eine Spur zu berechnen, ist es notwendig, die Position der Detektoren zu kennen. In Abbildung 7.14 sind alle Clusterpositionen x_i bzw. y_i für das schon vorher gezeigte Ereignis 214 gezeigt. Nimmt man als weitere Positionsinformation lediglich die z-Positionen der Detektoren aus Tabelle 7.1, so ergeben sich für die Parameter Steigung s_x, s_y und Ursprung u_x, u_y einer Spur aus diesen Formeln:

$$s_x = \frac{(\sum_i^n z_i)(\sum_i^n x_i) - n\sum_i^n z_i x_i}{(\sum_i^n z_i)^2 - n\sum_i^n z_i^2} \tag{7.1}$$

$$u_x = \frac{\sum_i^n x_i}{n} - s_x \frac{\sum_i^n z_i}{n} \tag{7.2}$$

$$s_y = \frac{(\sum_i^n z_i)(\sum_i^n y_i) - n\sum_i^n z_i y_i}{(\sum_i^n z_i)^2 - n\sum_i^n z_i^2} \tag{7.3}$$

$$u_y = \frac{\sum_i^n y_i}{n} - s_y \frac{\sum_i^n z_i}{n} \tag{7.4}$$

Der Wert n beschreibt dabei jeweils die Anzahl der gefundenen Cluster für diese Koordinate. Um eine Spur berechnen zu können, werden mindestens zwei Cluster pro Detektororientierung benötigt. Bei Ereignis 214 aus Messung 8102 ergibt sich für die Spurparameter:

$$s_x = 0.00261753 \tag{7.5}$$

$$u_x = 7.999 \text{ mm} \tag{7.6}$$

$$s_y = -1.43510^{-06} \tag{7.7}$$

$$u_y = 5.25847 \text{ mm} \tag{7.8}$$

$$Q = \sum_i^{N_{\text{Cluster}}} (\text{Pos}_i - (u_{x/y(i)} + s_{x/y(i)} \times z_i))^2 = 0.0457547 \text{ mm}^2 \tag{7.9}$$

Der Wert Q stellt ein Maß zur Beurteilung einer Spur zur Verfügung. Die Bezeichnung $x/y(i)$ wählt die zur Lage i des Clusters bei Pos_i passende Koordinate aus.

Die Verteilung des Wertes Q bei einer Messung mit 5001 getriggerten Ereignissen sieht bei der Berechnung der Spurparameter nach Gleichung 7.1 bis 7.4 aus wie in Abbildung 7.13 zu sehen.

7.4 Das Alignment der einzelnen Detektoren

Um mit einem Halbleiterspurdetektor eine Auflösung, die besser als die digitale Auflösung ist, zu erreichen, ist es notwendig, aus den Clustern mittels der Schwerpunktmethode eine möglichst genaue Trefferposition zu rekonstruieren. Zur Bestimmung der

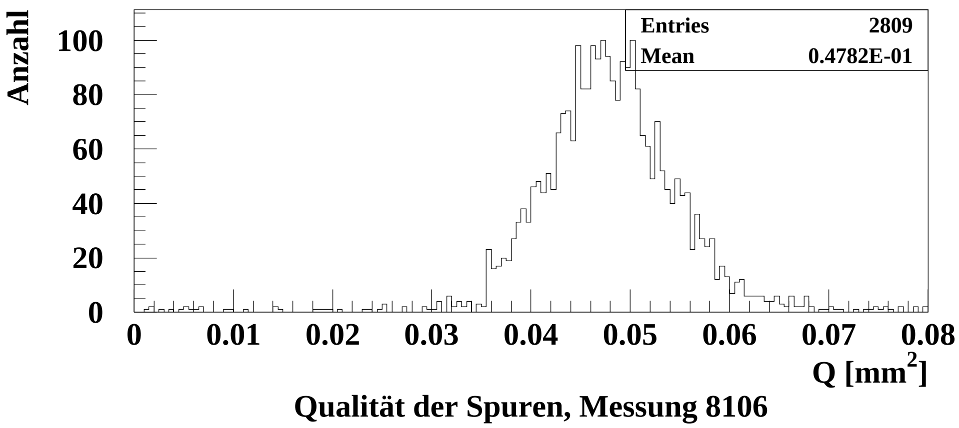

Abbildung 7.13: Spurqualitätswerte der nach Formel 7.1-7.4 berechneten Spuren. Es wurden nur Spuren mit genau acht Treffern berücksichtigt.

Spur durch mehrere Detektorlagen ist es notwendig die genaue Position der getroffenen Detektoren im Raum zu kennen.

Beim Bau eines Detektors ist es jedoch aus mechanischen Gründen nicht möglich, eine bessere Genauigkeit als einen Millimeter zu erreichen. Die Fertigungsgenauigkeit der mechanischen Bauteile des VLQ Spursystems ist ebenfalls in dieser Größenordnung. Um die intrinsische Auflösung der verwendeten Detektoren für die Spurberechnung nutzen zu können, muß die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Detektoren in der Größenordnung der Auflösung der Detektoren bestimmt sein. Dies ist nur mittels eines "Alignment" genannten Prozesses möglich. Dabei werden die Positionsinformationen der beteiligten Detektoren so lange variiert, bis die Summe vieler Q-Werte verschiedener Spuren minimal ist. Die Parameter, die für diesen Vorgang von Bedeutung sind, sind auf Abbildung 7.15 gezeigt.

Um die Testdaten möglichst genau auswerten zu können, wurde bei diesen Daten ein Alignment der 8 Detektoren des Teleskops durchgeführt. Dabei wurden die Detektoren um ihren Ursprung um ϕ gedreht und senkrecht zu den Streifen um "Offset" verschoben. Bei 8 Detektoren wurden für das Alignment 16 Parameter variiert. Für die Spurberechnung müssen aber zwei Detektoren fest stehen um das Koordinatensystem zu definieren. Daher wurden die ersten beiden Detektoren der x- und y-Koordinate (Detektoren x0 und y0 in Tabelle 7.1) in ϕ festgehalten.

Die weiteren Parameter aus Abbildung 7.15 zur Ortsbestimmung Δz, α und β konnten im Rahmen dieser Betrachtung für alle Detektoren festgehalten werden, da sich ihr Einfluß auf die Spurberechnung als vernachlässigbar herausgestellt hat. Insgesamt werden daher 14 Parameter im Rahmen des Alignment-Fits variiert.

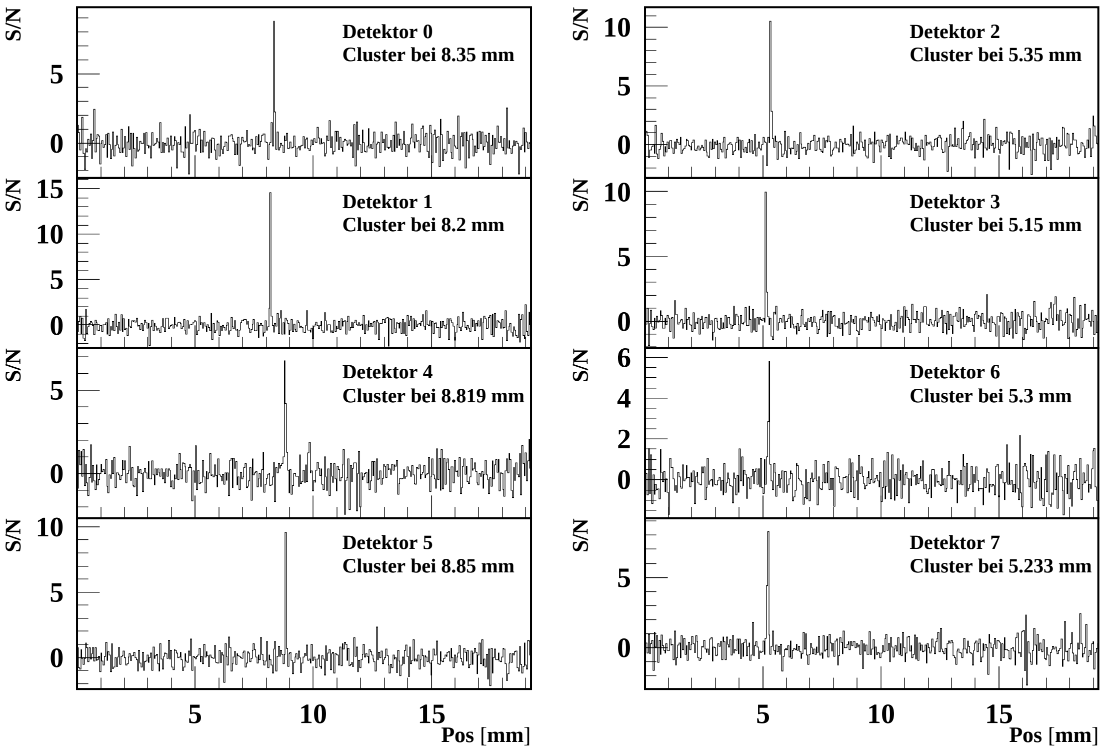

Abbildung 7.14: Alle 8 Detektoren des Teleskops, gezeigt ist jeweils Signal über Rauschen für Ereignis 214 aus Messung 8102. Die berechneten Clusterwerte sind für jeden Detektor oben links angegeben. In die Clusterberechnung gehen alle Streifen mit S/N über 4 ein.

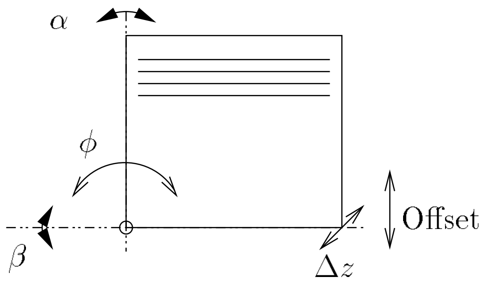

Abbildung 7.15: Die möglichen Alignmentparameter. α, β und Δz wurden beim Alignment der Teleskopebenen festgehalten.

Beim Alignment der Detektoren im VLQ Spursystem wird der Parameter β nicht vernachlässigt werden können, da die Spuren nicht unter sehr kleinen Winkeln einfallen. Bei der Spurberechnung im H1 Experiment kann darüberhinaus nicht mit einer geraden Spurparametrisierung gearbeitet werden, da das Magnetfeld des H1 Detektors eine Krümmung der Elektronenflugbahnen bewirkt.

Die Spuren sind mit je vier Clustern zur x- beziehungsweise y-Positionsbestimmung überbestimmt und werden mittels einer χ^2-Anpassung berechnet. Dabei werden die Spuren wie folgt parametrisiert,

$$\vec{x}(z) = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_2 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} p_1 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix}.$$

Der Vektor $\vec{x}(z)$ gibt die x- und y-Position der Spur an der Stelle z an. Die $\vec{p}$ werden aus dieser Beziehung bei minimalem χ^2ermittelt:

$$\chi^2 = \sum_{n=0}^{N} (\vec{c_n} - A\,\vec{p})^T V_{ij}^{-1} (\vec{x_n} - A\,\vec{p}). \tag{7.10}$$

In diese Berechnung gehen N Messungen des Teleskops mit Clusterpositionen $\vec{c_n}$ ein, $\vec{p}$ sind die gesuchten Parameter und V_{ij}^{-1} ist die Kovarianzmatrix. Das Ziel ist es, einen Satz von Parametern $\vec{p}$ zu finden, bei denen χ^2 minimal ist. Im Fall der Spurberechnung mit der obigen Parametrisierung läßt sich dieses Problem für $d\chi^2/d\vec{p} = 0$

allgemein lösen (Siehe dazu [8], [9]):

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = (A^T V_{ij}^{-1} A)^{-1} A^T V_{ij}^{-1}\ \vec{c_n} + \vec{o} = (A^T V_{ij}^{-1} A)^{-1} A^T V_{ij}^{-1} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{pmatrix} + \vec{o}$$

Die Matrix $(A^T V_{ij}^{-1} A)$ bezeichnet man als Hessematrix. Die Kovarianzmatrix V_{ij} ist in dem hier betrachteten Fall unabhängiger Messungen gleich der Einheitsmatrix. Der Vektor $\vec{o}$ enthält die Offsets der acht Teleskopdetektoren. Weiterhin ist:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\phi_0) & \cos(\phi_0)z_0 & \sin(\phi_0) & \sin(\phi_0)z_0 \\ \sin(\phi_1) & \sin(\phi_1)z_1 & \cos(\phi_1) & \cos(\phi_1)z_1 \\ \cos(\phi_2) & \cos(\phi_2)z_2 & \sin(\phi_2) & \sin(\phi_2)z_2 \\ \sin(\phi_3) & \sin(\phi_3)z_3 & \cos(\phi_3) & \cos(\phi_3)z_3 \\ \cos(\phi_4) & \cos(\phi_4)z_4 & \sin(\phi_4) & \sin(\phi_4)z_4 \\ \sin(\phi_5) & \sin(\phi_5)z_5 & \cos(\phi_5) & \cos(\phi_5)z_5 \\ \cos(\phi_6) & \cos(\phi_6)z_6 & \sin(\phi_6) & \sin(\phi_6)z_6 \\ \sin(\phi_7) & \sin(\phi_7)z_7 & \cos(\phi_7) & \cos(\phi_7)z_7 \end{pmatrix}$$

Hierbei beschreiben die z_n die z-Position der 8 Detektorlagen und ϕ_n die Alignmentwinkel für diese Lagen. Die Alignmentwinkel α und β sind hier nicht mehr aufgeführt, da sie bei der Betrachtung des Teleskops keinen Einfluß auf das Ergebnis haben. Diese Form der Matrix A kann nur bei Ereignissen, bei denen alle acht Lagen einen Treffer haben, verwendet werden. Ereignisse mit weniger als acht Treffern wurden bei der weiteren Betrachtung des VLQ Detektors mitberücksichtigt, für das Alignment des Teleskops selbst wurden sie aus Rechenzeitgründen verworfen.

Die Werte für die variierten Parameter sind in Tabelle 7.3 eingetragen. Die angegebenen Fehler sind die Werte, die das Fitprogramm als Unsicherheit angibt. Es ist typisch für die Lösung eines Alignment-Problems, daß die Fehler in der gleichen Größenordnung wie die Alignmentparameter sind [10]. Die Rechtfertigung für die Benutzung der auf diese Weise erhaltenen Alignmentparameter liegt in der eindrucksvollen Verbesserung der Ergebnisse.

Für das bisher gezeigte Ereignis 214 aus Messung 8102 ergeben sich nach dem Ali-

Messung 8102 Fit über alle Teleskopebenen				
Ebene	ϕ [rad]	σ_ϕ [rad]	Offset [mm]	σ_{Offset} [mm]
0	fest	-	0.125801	0.333863
1	fest	-	0.0967511	0.33579
2	-0.00272993	0.00665065	-0.11323	0.297574
3	0.00194433	0.0061563	-0.0835793	0.296247
4	-0.0288175	0.0316531	0.0115596	0.297941
5	0.0300567	0.0283545	-0.000160183	0.296413
6	-0.0367232	0.0350341	0.00270477	0.332983
7	0.0293569	0.0317517	0.00913328	0.335268

Tabelle 7.3: Die Alignmentparameter aus einer Messung. Die Werte sind die Ausgaben des Fitprogrammes.

gnment die folgenden Spurparameter:

$$
\begin{aligned}
s_x &= 0.00345753 \\
u_x &= 7.90171 \text{ mm} \\
s_y &= -0.0012711 \\
u_y &= 5.38654 \text{ mm} \\
Q &= 0.00118567 \text{ mm}^2
\end{aligned}
$$

Vergleicht man die Qualität dieser Spurparametrisierung mit der aus Formel 7.9, so ist der Wert nach dem Alignment um den Faktor 38.6 kleiner als vorher.

In Abbildung 7.16 ist die Verteilung der Spurqualitätswerte nach der Alignmentprozedur zu sehen. In diese Verteilung sind ebenfalls nur die Spuren mit acht Treffern eingetragen. Es sind 607 Ereignisse mehr in dieser Verteilung als in Abbildung 7.13, da es nach dem Alignment mehr Ereignisse gibt, die unter Berücksichtigung aller acht Lagen eine bestmögliche Spur ergeben. In Bild 7.13 liegt der Mittelwert der Verteilung bei 0.047, nach dem Alignment hat sich der Mittelwert der Spurqualität auf 0.00076 verbessert.

Der lange "Schwanz" von Spuren mit einer Qualität von mehr als 0.0015 läßt sich durch die Vielfachstreuung innerhalb des Testaufbaus erklären. Allerdings werden auch die Spuren innerhalb dieses Ausläufers durch das Alignment besser, wie an Beispielereignis 214 zu sehen ist.

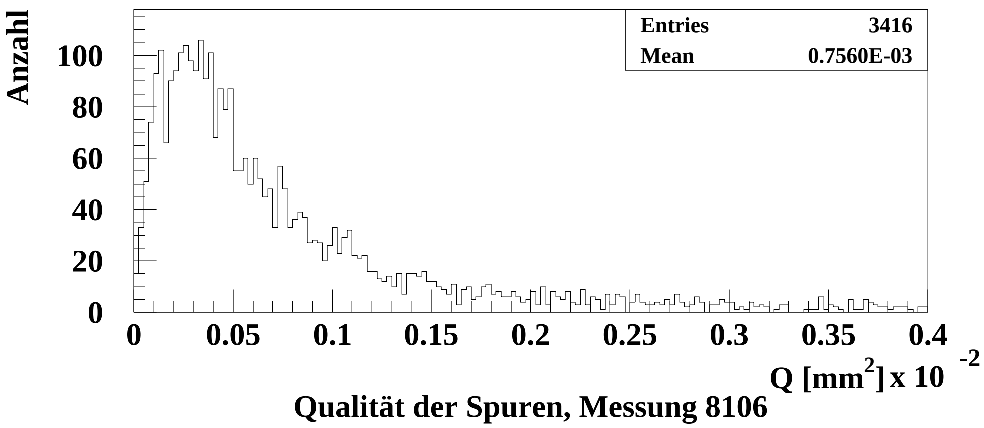

Abbildung 7.16: Spurqualitätswerte nach dem Alignment. Es wurden die gleichen Meßdaten wie in Abbildung 7.13 zugrundegelegt und ebenfalls nur Spuren mit genau acht Treffern eingetragen.

Parameter	Einheit	Wert	σ_{Wert}
ϕ	rad	-0.0174278	0.0035267
Offset	mm	6.9217	0.0371023
z-Position	mm	233.544	14.2105

Tabelle 7.4: Ergebnis des Alignments des VLQ Detektors

7.5 Ortsauflösung

Um die Ortsauflösung des VLQ Detektors angeben zu können, wird der Abstand der Treffer des VLQ Detektors von den Spuren des Teleskops aufgetragen. Die Verteilung, die sich ergibt, das Residuum, ermöglicht die Bestimmung der Auflösung.

Das Ziel beim Bau jedes Detektors ist es, die digitale Auflösung zu erreichen oder zu übertreffen.

Mit den durch das Alignment verbesserten Spuren kann die Ortsauflösung des VLQ Detektors bestimmt werden. Zuvor muß ein Fit über die Alignment-Parameter z-Position, Offset und ϕ durchgeführt werden. Die Resultate dieser Berechnung sind in Tabelle 7.4 angegeben.

Das Residuum vor der Berücksichtigung der Werte aus Tabelle 7.4 ist in Abbildung 7.17 links zu sehen. Nach der Drehung und Verschiebung des VLQ Prototyps ergibt sich das rechte Residuum in der gleichen Abbildung. Aus dieser Verteilung kann die Auflösung bestimmt werden, wenn die Breite der Verteilung (P_6) von 15.10 μm aufgefaßt wird als Überlagerung der Auflösungen des Teleskops und des VLQ Detektors:

$$\sigma_{\mathrm{tot}} = \sqrt{\sigma^2_{\mathrm{VLQ}} + \sigma^2_{\mathrm{Tel}}}.$$

Wird die in [31] bestimmte Ortsauflösung des Teleskops von $\sigma_{\mathrm{tel}} = 11.20\mu$m eingesetzt, ergibt sich ein Wert für die Auflösung des VLQ Detektors von

$$\boxed{\sigma_{\mathrm{VLQ}} = 10.12\ \mu\mathrm{m}.}$$

Die Bestimmung der Breite von σ_{tot} wurde durch eine Anpassung zweier überlagerter Gaußfunktionen durchgeführt. Die zweite Funktion ist dabei notwendig, da der durch Vielfachstreuung und Bremsstrahlung entstandene Untergrund auf diese Weise Parametrisiert werden kann ohne einen Einfluß auf die Bestimmung der Ortsauflösung zu haben. Durch den Untergrund ergibt sich eine Verteilung mit einer Breite von 39 μm (P_3 in Abb. 7.17).

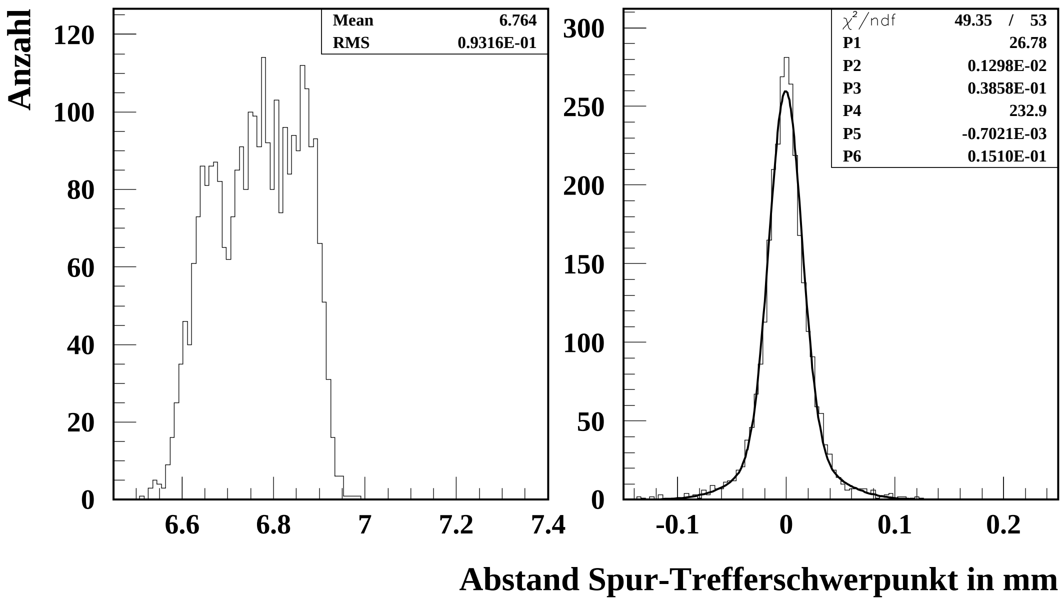

Abbildung 7.17: Die Residuen des VLQ Detektors aus Messung 8106 im Teststrahl. Links vor und rechts nach dem Alignment. Bei dem linken Diagramm wurde die z-Position des Detektors aus dem Alignmentfit angenommen. Die z-Position wurde in den Koordinaten von Tabelle 7.1 zu 233.54 mm bestimmt.

7.6 Spurberechnung aus den Daten der VLQ Detektorkomponenten

Die Erfahrung und die Programme, die für die Spurberechnung innerhalb der Testmessungen mit dem Silizium Teleskop gesammelt wurden, werden auch in der Spurberechnung im VLQ Detektor weiterverwendet. Da im H1 Experiment keine Überbestimmung der Spurdaten vorhanden ist und keine Daten aus anderen Detektorkomponenten für den Fit herangezogen werden können, muß die Strategie zur Spurbestimmung geändert werden.

Folgende Unterschiede im Gegensatz zu den Testmessungen müssen beachtet werden:

- Das VLQ Spursystem stellt nur zwei Detektorlagen zur Verfügung. Eine eigenständige Spurbestimmung ist aufgrund dieser Meßwerte nicht möglich.

- Der VLQ Detektor ist in einem Magnetfeld eingebaut, bzw. die Elektronen sind auf ihrem Weg in den VLQ Detektor einem Magnetfeld ausgesetzt. Es ist daher nicht mehr möglich die Spuren der Teilchen durch eine Gerade zu parametrisieren. Der Krümmungsradius der Teilchenspur muß mindestens mitberücksichtigt werden.

- Die beiden Probleme Spurbestimmung und Alignment sind nicht mehr unabhängig voneinander: Erst mit gültigen Spuren aus QED Compton Ereignissen ist das Alignment möglich, durch die Änderung der Alignmentparameter verändert sich auch die Spurberechnung.

- Durch die Abhängigkeit von der HERA Kinematik (Elektronenenergie) und den Messungen des Kalorimeters (Energiekalibration) ergeben sich auch für das Alignment des Spursystems systematische Fehler, die nur schwer korrigierbar sind.

Es gibt zwei Klassen von Ereignissen, mit denen ein Alignment der Detektoren des VLQ Spursystems möglich ist. Die erste umfaßt die QED-Compton Ereignisse, die ausschließlich im VLQ Spektrometer gemessen werden, die zweite wird von Ereignissen gestellt, in denen der Vertex des Ereignisses durch hadronische Aktivität bestimmt ist und das Elektron den VLQ Detektor trifft.

Die QED Compton Ereignisse zeichnen sich durch die Überbestimmtheit der kinematischen Größen aus. Gemessen werden von jedem Modul des VLQ ein elektromagnetisches Cluster im Kalorimeter und in einem Modul eine Spur im Spursystem. Diese Ereignisgeometrie ermöglicht es die relative Lage der Module des Spektrometers zueinander zu bestimmen, und so die Fahrmechanik zu kalibrieren.

Da es bei QED Compton Ereignissen aus den Kalorimeterdaten allein möglich ist das Ereignis zu rekonstruieren, können danach die Alignmentparameter der getroffenen Detektoren des Spursystems angepaßt werden.

Tiefinelastische Ereignisse (DIS-Ereignisse), bei denen der Ereignisvertex unabhängig von VLQ bestimmt werden kann und die das Elektron im VLQ nachgewiesen haben, ermöglichen einen gemeinsamen Fit der Spuren und der Alignmentparameter, da durch Festlegung an insgesamt vier Punkten die Spur ebenfalls überbestimmt ist.

Alle Methoden zur Bestimmung der Alignmentparameter basieren auf einer χ^2 Formel entsprechend Gleichung 7.10. Da das Problem grundsätzlich durch die Einführung weiterer Spurparameter nicht verändert wird, kann man auch das Alignment des VLQ Spursystems mit der in Abschnitt 7.4 vorgestellten Matrixmethode behandeln. Es bietet sich für die Methode mit DIS-Ereignissen an, die Alignmentparameter gleichzeitig mit den Spurparametern vieler Ereignisse anzupassen. Zu diesem Zweck wird eine Matrix erstellt, an die nicht nur die Meßwerte der Detektoren, sondern auch die Alignmentparameter multipliziert wird. Die benötigte Matrix ist

$$d = (N \cdot S \cdot N_{par})^2$$

-Dimensional. Dabei ist S die Anzahl der betrachteten Stützpunkte, N die der betrachteten Ereignisse und N_{par} die Anzahl der zu bestimmenden Alignmentparameter.

Kapitel 8

Effizienz des Spursystems im H1-Experiment

Der Anfang der Messungen mit dem VLQ-Spektrometer wurde mit einem Oszilloskop neben der Elektronik durchgeführt. Eine solche Messung ermöglicht es die Struktur der Daten genau zu beobachten. So konnte innerhalb kürzerer Zeit eine grobe Einstellung der Konverterkarten vorgenommen werden.

Gleichzeitig konnten die Auswirkungen verschiedener Steuersignalsequenzen getestet werden. Bei einer Messung unter Luminositätsbedingungen konnte die Steuersequenz und damit die Einstellung des Zeitfensters der Auslese nach einer zentralen Triggerentscheidung so eingestellt werden, daß während der Messung im Datenstrom Treffersignale am Oszilloskop beobachtet werden konnten. Mit ein wenig Geschick und Ausdauer konnte die Datenaquisition des Gerätes angehalten werden und ein solches Signal gespeichert werden. In Abbildung 8.1 ist das Resultat dieser Messung zu sehen.

Es konnten bisher keine regulären Messungen mit dem VLQ Spektrometer unter Luminositätsbedingungen durchgeführt werden. Daten aus diesem Grund sind noch keine systematischen Analysen der Effizienz und der Leistungsfähigkeit der Detektoren unter H1 Bedingungen möglich.

Es soll hier daher nur kurz über den Zustand des Spursystems vor der endgültigen Integration in reguläre H1 Messung berichtet werden.

In Abbildung 8.2 ist die Verteilung der Cluster von Detektor 20, die nach dem in Kapitel 7 vorgestellten Algorithmus berechnet wurden, nach Pipeline Buffern aufgetragen. In einer solchen Darstellung sollten die Ereignisse gleichmäßig auf alle Pipeline Buffer und alle Streifen verteilt sein.

Es ist deutlich zu sehen, daß sich die Trefferpositionen an den APC Grenzen häufen. Der Bereich der Pipeline Buffer zwei bis vier, enthält keine Treffer. Einige APCs zeigen deutliche Häufungen von Treffern, ein solches Verhalten eines Detektors kann

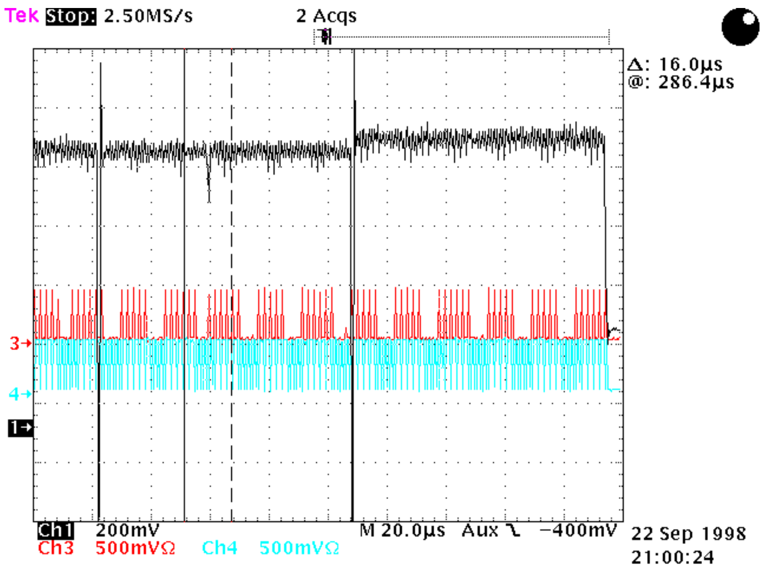

Abbildung 8.1: Die Signale vom oberen Modul, innere Lage sind an Kanal 1 zu sehen. Die Messung wurde während eines Luminositätsruns durchgeführt. Zu sehen sind die APCs 4 und 5. Zwischen den beiden horizontalen Marken ist das Signal eines Elektrons zu erkennen.

insgesamt nur als pathologisch bezeichnet werden.

In Abbildung 8.3 ist dagegen eine Verteilung zu sehen, die dem Erwarteten entspricht. Da diese Daten aus der gleichen Messung stammen, wie in Abbildung 8.2 ist es wahrscheinlich, daß die Werte von Detektor 20 aufgrund der schlechten Einstellungen der Konverterkarte und der Sequenz keine sinnvollen Daten enthalten. Dabei gibt es keine schüssige Erklärung, warum Detektor 18 ein anderes Bild als Detektor 20 liefert.

8.1 Messungen mit Kalibrationspulsen in der H1 Umgebung

Um festzustellen, ob alle Detektoren arbeiten und um die Kalibration der Detektoren vornehmen zu können, wurde am 22.10. eine Messung mit Kalibrationspulsen durchgeführt. Auf Abbildung 8.4 sind die Ergebnisse der Messung für das untere Modul und den ersten APC jedes Hybriden zu sehen. Die Darstellung folgt der aus Abbildung 7.12 rechts.

Die Detektoren 23 und 31 zeigen eine Struktur, die nichts mit der erwarteten zu tun hat. Detektor Nummer 24 zeigt ein noch nicht verstandenes Verhalten am Anfang des

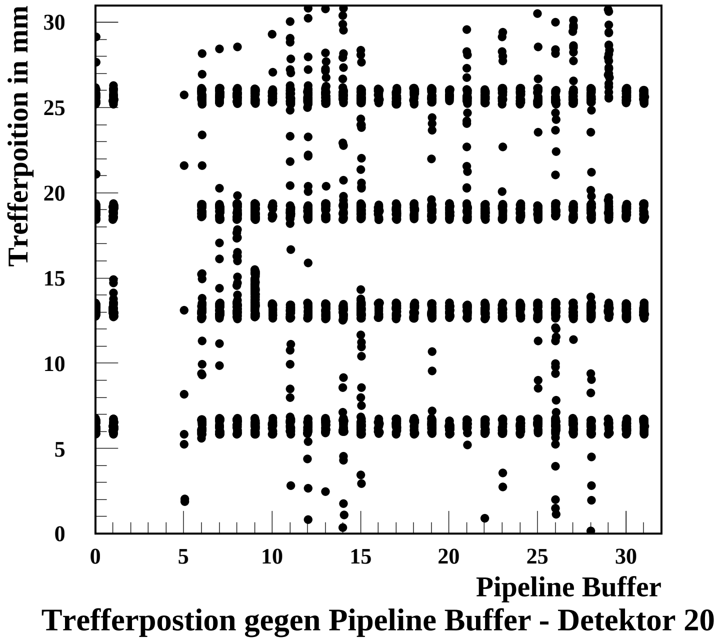

Abbildung 8.2: Verteilung der "Treffer" in Detektor 20. Diese Daten stammen aus Runnummer 225786.

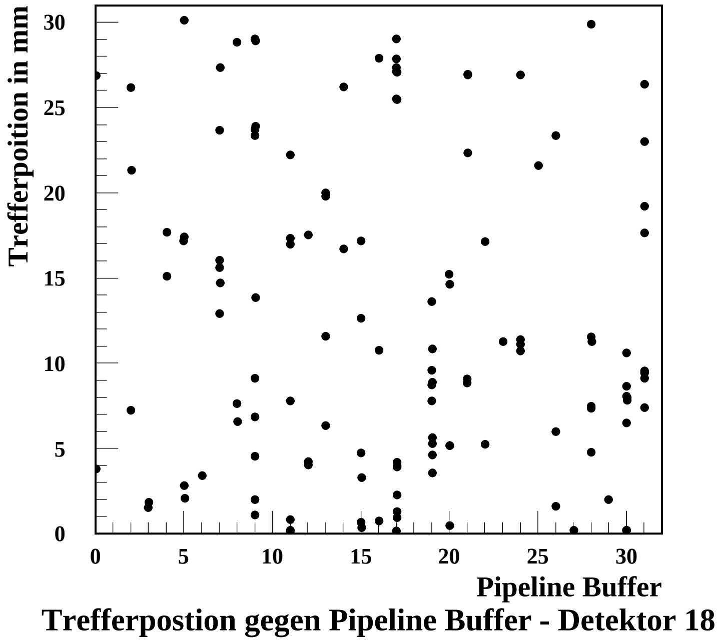

Abbildung 8.3: Verteilung der "Treffer" in Detektor 18. Diese Daten stammen aus Runnummer 225786.

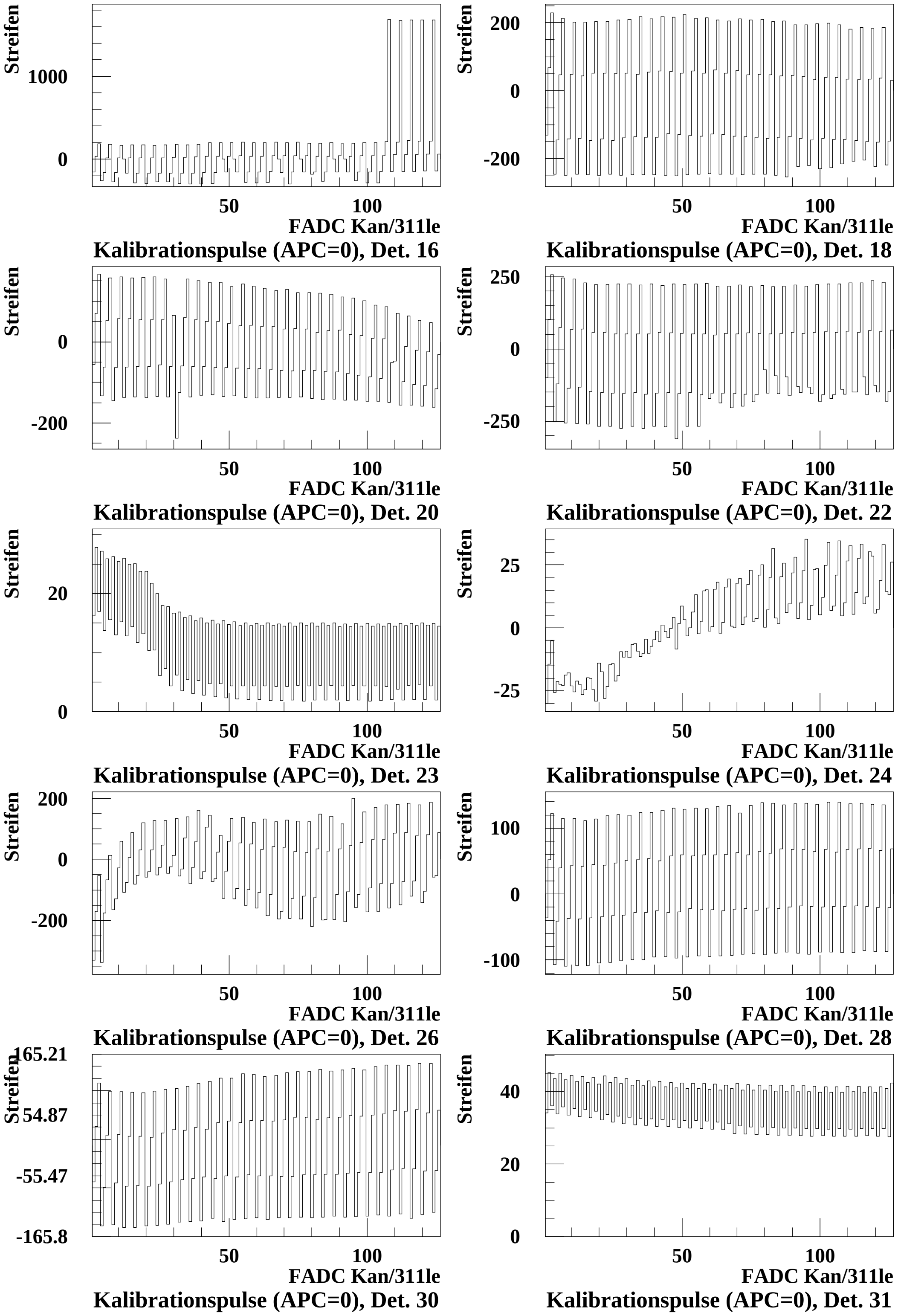

Abbildung 8.4: Kalibrationspulse der Detektoren in unteren Modul. Es ist jeweils der 1. bis 126. Streifen des ersten APCs gezeigt.

APCs. Die anderen haben in den Streifen am Anfang und am Ende eines APCs jeweils starke Sprünge in den Verläufen, zeigen sonst jedoch ein Verhalten, wie es erwartet wird.

Kapitel 9

Zusammenfassung, Ausblick

Das VLQ Spektrometer eröffnet für das H1 Experiment einen neuen, nur noch kurze Zeit zugänglichen Meßbereich. Da mit dem Luminositätsupgrade der gesamte Bereich sehr kleiner und sehr großer Winkel durch zusätzlich eingebaute Fokussierungs-Magnete unzugäglich wird, muß bis zu diesem Umbau des Experiments das gesamte Meßprogramm des VLQ abgeschlossen sein. In der Zeit seit dem Einbau konnte noch keine volle Funktionalität des VLQ Detektors erreicht werden.

Der momentane Stand der Dinge deutet aber daraufhin, daß nach der Neuentwicklung des VLQ Kalorimeterriggers im Jahr 1999 die gesamte Luminosität auch für den VLQ Detektor zur Verfügung stehen wird.

Der endgültige Funktionsbeweis für das Spursystem konnte, hauptsächlich durch den Ausfall des Triggers und den häufigen Störungen des HERA-Betriebes, bisher nicht erbracht werden. Es konnte jedoch gezeigt werden, daß alle zwanzig Detektoren des VLQ Spursystems elektronisch funktionsfähig sind und nach Verbesserungen in der Auslesesequenz eine volle Funktionsfähigkeit zu erwarten ist.

Die Auswertung der Testmessungen hat für die Ortsauflösung der Kombination aus CST Detektor und VLQ Hybrid einen Wert von 10.12 μm bei einer angenommenen Auflösung von 11.21 μm der Referenzspuren ergeben. Die Bestimmung der Anzahl der Elektronen pro MIP war durch unsaubere Strahlbedingungen des Elektronenstrahls erschwert. Es hat sich für die vereinfachte Datennahme des Teststandes ein wahrscheinlichster Wert für Rauschabstand eines Cluster zwischen 9.96 und 10.45 ergeben. Mit einer dreifachen Datennahme, wie sie im H1 Experiment durchgeführt wird, kann ein deutlich besserer Wert erreicht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Slow Control Programm für das Spursystem des VLQ Detektors entwickelt. Dieses Programm ermöglicht es, den Detektor zu bedienen und ist daher eine wichtige Grundlage für den Betrieb dieser neuen Komponente in H1.

Anhang A

Anhang

A.1 Shiftinstruction für das VLQ Spursystem

Lumi & VLQ in measuring position:

- switch on HV
- switch on low voltage
- check if low voltage "light" becomes green. If not, retry (switch off – then on again).
- wait for "HV o.k." message and note time in log-book.

Before VLQ is moved out again:

- switch off HV

- switch off low voltage
- write down eventual error messages and time from “Error Log” to log-book.

In case of errors:
note everything in the logbook, the experts will look after the problem.

Questions - Problems? Call:
Carsten Krauss,
Peer-Oliver Meyer,
Stephan Hurling,

A.2 Auslese der Positionsanzeigegeräte ND 221

Da die Initiierung der Auslesesequenz der Geräte nicht intuitiv ist, wird hier der zentrale Teil des Programms zur Datenübertragung aufgelistet. Das Programm bedient sich der Visual Basic Objekte `MSCOMM` und `LABEL`.

```
Private Sub get_pos1()
    Dim i As Integer
    i = 0
    Output1.Caption = " "
    ND221_1.CommPort = 2               ' Serieller Anschluss COM2
    ND221_1.DTREnable = True           ' Kommunikation über
    ND221_1.RTSEnable = True           ' RTS und DTS Leitungen
    ND221_1.NullDiscard = False
    ND221_1.Handshaking = comRTSXOnXOff ' Handshaking mit XOnXOff
    ND221_1.InputMode = comInputModeText
    ND221_1.Settings = "9600,E,7,2"     ' 9600 baud, gerade Parität
                                       ' 7 Datenbits und 2 Stoppbits
```

```
    ND221_1.InputLen = 0
    ND221_1.PortOpen = True              ' Schnittstelle öffnen
    Dummy = DoEvents()
    ND221_1.Output = Chr$(17)            ' Übertragung fortsetzen
    While ND221_1.InBufferCount > 0      ' Ergebnis abholen
        textdummy = ND221_1.Input
        Dummy = DoEvents()
    Wend
    ND221_1.Output = Chr$(5) + Chr$(17) ' Fehlermeldung anfordern und
                                         ' Übertragung starten
    Do                                   ' Warteschleife, bis die
        i = i + 1                        ' Daten da sind ...
        Dummy = DoEvents()
    Loop Until ND221_1.InBufferCount >= 1 Or i = 500
    textdummy = ND221_1.Input            ' Wert speichern
    i = 0
    ND221_1.Output = Chr$(2) + Chr$(17) ' Messwert anfordern und
                                         ' Übertragung starten
    Do                                   ' Schleife, bis 18 Zeichen
        i = i + 1                        ' übertragen oder Zeit
        Dummy = DoEvents()               ' abgelaufen
    Loop Until ND221_1.InBufferCount >= 18 Or i = 200
    Dummy = DoEvents()
    Output1.Caption = ND221_1.Input      ' Wert abzeigen
    If i = 200 Then                      ' Wenn Zeit abgelaufen,
                                         ' Fehler abfragen
        i = 0
        ND221_1.Output = Chr$(17)
        ND221_1.Output = Chr$(5) + Chr$(17)
        Do
            i = i + 1
            Dummy = DoEvents()
        Loop Until ND221_1.InBufferCount >= 1 Or i = 500
        Error.Caption = ND221_1.Input    ' und anzeigen
    End If
    ND221_1.PortOpen = False             ' Schnittstelle schliessen
End Sub
```

Analog ist die Auslese des Zweiten Moduls implementiert, die Datei-, Zeit- und Anzeigefunktionen sind problemlos zu programmieren.

Anhang B

Übersicht der Testmessungen

Si-Teleskop-Messungen im e^- Teststrahl vom 09.12.97 und 10.12.97:

Uhrzeit	Runnummer	Sequenzerfile	E_{el}	Anzahl Events	I_{Bias}
14^{00}	**8100**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**2000**	$0.94\mu A$
14^{20}	**8101**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**1000**	$1.08\mu A$
14^{30}	**8102**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**4000**	$1.13\mu A$
14^{50}	8100n	640+Vana test5.SQLM	$NOISE$	1000	$1.15\mu A$
14^{55}	8100c	Hyb1.SQLM	$Calib.$	1000	
15^{04}	**8103**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**6000**	$1.18\mu A$
16^{05}	8101c	Hyb1.SQLM	$Calib.$	1000	$1.20\mu A$
16^{11}	8101n	640+Vana test5.SQLM	$NOISE$	1000	$1.23\mu A$
16^{19}	**8104**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**4000**	$1.22\mu A$
16^{58}	8102c	Hyb1.SQLM	$Calib.$	1000	$1.23\mu A$
17^{02}?	8102n	640+Vana test5.SQLM	$NOISE$	1000	$1.25\mu A$
17^{10}?	**8105**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**5269**	$1.20\mu A$ $-1.27\mu A$
19^{45}	**8106**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**5000**	$1.18\mu A$
11^{17}	**8107**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**1000**	$0.88\mu A$
11^{24}	**8108**	640+Vana test5.SQLM	$5GeV$	**5000**	$0.95\mu A$ $-1.04\mu A$
11^{50}	8107n	640+Vana test5.SQLM	$NOISE$	1000	$1.04\mu A$
11^{56}	8107c	Hyb1.SQLM	$Calib.$	1000	$1.08\mu A$

Die 810xn und 810xc Runs sind Messungen, die nur mit der OnSiRoc-Auslese genommen wurden. Bei den Rausch- und Kalibrationsmessungen 8100, 8101 und 8102 war der Strahlverschluß offen, bei 8107 war der Strahlverschluß geschlossen.

Bei allen Messungen war eine Verarmungsspannung von $V_{\rm depl}$ von 45 Volt an dem Si-Detektor, der mit dem VLQ-Hybriden ausgelesen wurde, angelegt. Nach dem Run

8100 wurde das Teleskop bewegt um einen geraden Strahlendurchgang zu erreichen.

Einstellung der Konverterkarte:

- Vor 8101c wurde die Verstärkung erhöht und der Offset erniedrigt.
- Vor 8102c wurde der Offset erhöht und die Verstärkung erniedrigt.
- Die Runs am 10.12.97 wurden mit der gleichen Einstellung der Konverterkarte wie bei den Runs 8102c, 8102n, 8105 und 8106 durchgeführt.

Literaturverzeichnis

[1] H1 Collaboration, Technical Proposal to build a Special Spectrometer covering Very Small Momentum Transfers, H1 Internal Report TP-VLQ, revised Version May 31, 1996

[2] R. Horisberger et al, A silicon vertex detector for H1 at HERA, IEEE Nulclear Science Symposium Orlando, Florida, Oct. 1992, PSI-PR-92-35

[3] Carlo Duprel, Untersuchungen an Halbleiterstreifendetektoren für das VLQ-Spektrometer im Rahmen des H1-Experimentes mit einem Diodenlaser, Diplomarbeit, III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen, August 1998

[4] H1 Collaboration, The H1 detector at HERA, Nuclear Instuments & Methods in Physics Research Section A, 1997 310-347

[5] H1 Collaboration, The H1 detector at HERA, DESY 93-103, July 1993, ISSN 0418-9833

[6] Achim Stellberger, Entwicklung und Bau eines kompakten elektromagnetischen Kalorimeters, Dissertation, Universität Heidelberg, 1998

[7] Bernd Surrow, Measurement of the Proton Structure Function F_2 at Low Q^2 and Very Low x with the ZEUS Beam Pipe Calorimeter at HERA, Universität Hamburg, DESY-THESIS-1998-004, März 1998

[8] W. T. Eadie, D. Drygrad F. E. James, M. Roos B. Sadoulet, Statistical Methods in Experimental Physics, North Holland Publishing, 1971

[9] Volker Blobel, Erich Lohrmann, Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse, B. G. Teubner Stuttgart Leipzig 1998, ISBN 3-519-03243-0

[10] S. Burke, R. C. W. Henderson, S. J. Maxfield, et al., Track Finding and Fitting in the H1 Forward Track Detector, H1 Note - 03/95-434

[11] Peer-Oliver Meyer, Dissertation, III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen, in Vorbereitung, 1999

[12] Patrik Kandel, Monte-Carlo Untersuchungen zur Weitwinkelbremsstrahlung im H1-Detektor, Diplomarbeit, I. Physikalisches Institut RWTH Aachen, Mai 1998

[13] Christoph Berger, Teilchenphysik – Eine Einführung, Springer Verlag, Berlin, 1992, ISBN3-540-54218-3

[14] Donald H. Perkins, Hochenergiephysik, Addison-Wesley 1991, ISBN 3-89319-236-0

[15] Francis Halzen, Alan D. Martin, Quarks & Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics, John Wiley & Sons 1984, ISBN 0-471-81187-4

[16] H1 Collaboration, A Measurement of the Proton Structure Function $F_2(x, Q^2)$ at low x and low Q^2 at HERA, März 1997, DESY 97-042

[17] Network Working Group, J. Postel, J. Reynolds, RFC 959 File Transfer Protocol (FTP), October 1985, zum Beispiel: `http://sunsite.auc.dk/RFC/`

[18] National Instuments Corp., LabVIEW 3.0 Software Manual, Dezember 1993

[19] Microsoft Corporation, Microsoft Visual Basic Version 5.0, Programming System for Windows 95 and Windows NT, 1997

[20] Heidenhain GmbH, Arbeiten mit der Positionsanzeige ND221, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, 8/96

[21] VME Microsystems International Corporation, VMIVME-3113A Scanning 12-bit Analog-to-Digital Converter Board with built-in-test, Instruction Manual, VME Microsystems International Corporation, Huntsville, AL, Revised November 2, 1994

[22] Sören Prell, Entwicklung des Steuer- und Auslesemoduls für die Siliziumstreifendetektoren des H1-Detektors, Dissertation, Universität Hamburg, 1996, DESY FH1-96-02

[23] J. Bürger, K. Hansen, W. Lange, T. Nowak, S. Prell, W. Zimmermann, Online Readout and Control Unit for High-speed/ High Resolution Readout of Silicon Tracking Detectors, DESY 96-200, September 1996

[24] G. W. Noyes, H1 Silicon Tracker DAQ – A Guide to Front-End Hardware Configuration and Mac-based Software Utilities, Version 1.5, 9th March 1995, z. B.: `http://www-h1.desy.de/h1det/tracker/sitracker/sidaq/FrontEndHardware/SiDAQ_Gareth.html`

[25] Markus Kausch-Blecken v. Schmeling, The Silicon Microvertex Detector of the H1 Experiment: Readout, Event Reconstruction, and Studies on Heavy Quark Decays, Dissertation, Universität Hamburg, 1998

[26] Persönliche Mitteilung Daniel Pitzel, 10. November 1998

[27] Johannes Gassner, Messung der Ortsauflösung des H1 Siliziumvertexdetektors, Diplomarbeit, Institut für Teilchenphysik ETH Zürich, 1996

[28] Monika Wagner, Scale Dependance of the Charm Production Cross Section in the Photoproduction and Performance of the Central Silicon Tracker at the H1 Experiment, Dissertation ETH Zürich, July 1997

[29] W. Eick et al., Development of the H1 Backward Silicon Strip Detector, DESY Zeuthen, Oktober 1996, DESY 96-217

[30] Oliver Mang, Aufbau und Test der Auslese eines GaAs-Detektors,Diplomarbeit I. Physikalisches Institut RWTH Aachen, unveröffentlicht, August 1997

[31] GaAs Strip and Pixel Detectors for Applications in High Energy Physics, Dissertation Olaf Syben, I. Physikalisches Institut RWTH Aachen, 1999

[32] Konrad Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstahlung, B. G. Teubner Stuttgart 1992, ISBN 3-519-23058-5

[33] Claus Grupen, Teilchendetektoren, BI-Wissenschaftsverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1993, ISBN 3-411-16571-5

[34] The European Physical Journal C, Review of Particle Physics, Volume 3, Number 1-4, 1998, Abschnitt 25.5, Seite 157

Danksagung

Ich danke Herrn Professor Berger für die Betreuung und für die Möglichkeit mit ihm zusammen an diesem Projekt zu arbeiten. Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Professor Braunschweig, der durch seine Erfahrung immer wieder hilfreich war.

Besonders möchte ich mich bei Peer-Oliver Meyer bedanken, der stets kompetenter Ansprechpartner in allen physikalischen Fragen war.

Die VLQ-Tracker Gruppe namentlich Carlo Duprel und Stephan Hurling haben ebenfalls durch Ihre Hilfe zu dieser Arbeit beigetragen. Nicht vergessen möchte ich die zahlreichen Experten und Kollegen, die durch wichtige Tips und Diskussionen eine Hilfe waren: Thomas Hadig, Olaf Syben, Markus Wobisch, Jürgen Scheins, Sascha Caron, Thorsten Wengler, Phillip Sievers, Klaus Rabbertz, Markus Kausch, Daniel Pitzl und Olaf Behnke

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die stets Rückhalt war und ist und mich auf meinem Weg immer unterstützt hat.