Aufbau und Test der Auslese eines GaAs-Detektors

von

Oliver Mang

Diplomarbeit in Physik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

im August 1997

angefertigt im
I. Physikalischen Institut

Meinem Vater
... für das wahrscheinlich teuerste Buch in seinem Bücherschrank

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Bereits aus der Antike ist uns überliefert, daß der Mensch die Natur zu verstehen suchte und sich bemühte, den Lauf der Dinge vorherzusagen. Die griechischen Naturphilosophen glaubten, die Natur nur mit Hilfe von Beobachtungen und Anwendung des Verstandes und der Logik verstehen zu können. Schon in dieser Zeit entstanden Modelle wie z.B. die Idee von der Kugelgestalt der Erde oder die Atomtheorie des Demokrit, die sich im Laufe der Jahrhunderte bestätigt haben. Jedoch kannte diese Philosophie nicht das Prinzip, gewonnene Erkenntnis durch Experimente zu überprüfen.

Dieses Prinzip, die Natur nicht nur durch passive Beobachtung, sondern auch mit Hilfe von Versuchen zu erforschen, begründete im ausgehenden 16. und frühen 17. Jahrhundert den Aufstieg der modernen Naturwissenschaften. Man begann, aus den im Experiment gewonnenen Ergebnissen Modelle der Natur zu entwickeln, die diese Ergebnisse beschrieben und leitete aus dem Modell Vorhersagen ab, die experimentell geprüft werden konnten. Der Ausgang des Experimentes entschied letztlich über die Brauchbarkeit des Modells und gab Anstöße für Weiterentwicklungen und Verbesserungen. Diese gegenseitige Herausforderung zwischen Theorie und Experiment ist noch heute der Antrieb der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik, die unser Weltbild im letzten Jahrhundert so tiefgreifend verändert hat.

Eines der Modelle, mit denen wir heute die Natur erfolgreich beschreiben, ist das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Es beinhaltet die elementaren Bausteine der Materie, Quarks[1] und Leptonen[2], und beschreibt ihre Wechselwirkung untereinander durch Eichbosonen, die die Kräfte zwischen den Teilchen übermitteln. Allerdings hat das Standardmodell eine Anzahl freier Parameter, die experimentell bestimmt werden müssen. Dazu gehören die Massen der Teilchen und die Größe der Kopplungskonstanten, die die Stärke der Wechselwirkungen angeben. Man ist bestrebt, eine Theorie zu entwickeln, aus der sich diese Größen

[1] Der Begriff 'Quark' stammt aus dem Roman 'Finnegans Wake' von J. Joyce ("Three Quarks for Muster Mark").

[2] ursprünglich nach dem griechischen Wort *leptos* = leicht

zwanglos ergeben; auf der anderen Seite bemüht man sich, diese Größen mit höchster Präzision zu vermessen.

Zu diesem Zweck werden heute Teilchenbeschleuniger eingesetzt, die Energien bis in den TeV-Bereich liefern, sowie aufwendige Detektoren, die Produkte der Teilchenkollisionen nachweisen können. Um die Identifikation der Reaktionsprodukte zu ermöglichen und Informationen über den physikalischen Prozeß zu gewinnen, in dem sie entstanden sind, benötigt man eine hochpräzise Vermessung dieser Reaktionsprodukte. Entscheidend sind Angaben über Ort und Zeit des Teilchendurchfluges und über seine Energie. Dies stellt extrem hohe technische Anforderungen an die Detektoren, an die Materialien und die zugehörige Elektronik, und man versucht ständig, ihre Fähigkeiten zu verbessern. Hierzu gehören einmal neue Detektormaterialien, die in kürzerer Zeit ein möglichst noch höheres Signal liefern und dazu unempfindlich gegen den ständigen Teilchenbeschuß sein sollen, und zum anderen schnellere elektronische Komponenten, die ebenfalls in noch kürzerer Zeit mehr Daten verarbeiten können. Zum Beispiel soll in den Wechselwirkungszonen des im Bau befindliche e^+e^--Beschleuniger KEKB (KEK, Betriebsbeginn 1999) alle 2ns eine Kollision stattfinden; man vergleiche diese Zeit mit dem entsprechenden Wert von 22μs für LEP (CERN, Betriebsbeginn 1989)[3]. Bei neuen Beschleunigergenerationen mit Luminositäten im Bereich von $10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ und Energien im TeV-Bereich ist die Strahlenbelastung extrem hoch (z.B. erwartet man beim pp-Beschleuniger LHC Strahlungsdosen von 10 Mrad/Jahr für die inneren Spurkammern) und limitiert den Einsatz bisher üblicher Detektor-Technologien. Insbesondere bei Halbleiterdetektoren aus Silizium werden zukünftige Beschleuniger große Strahlenschäden verursachen, weshalb man zukünftig SI-GaAs[4] als Material für Halbleiterdetektoren verwenden möchte. Ziel dieser Arbeit ist es, einen GaAs-Streifendetektor mit einer z.T. bereits für das H1-Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron existierenden Auslese zu betreiben, die neu entwickelten Komponenten der Ausleseelektronik zu testen und die Tauglichkeit des komplett aufgebauten Systems für den Einsatz bei H1 zu überprüfen.

[3] Die Daten über Beschleuniger wurden [7] entnommen.
[4] semi-**i**solierendes **Ga**llium-**Ar**senid

Kapitel 2

Das H1-Experiment

2.1 Teilchenbeschleuniger

In der Teilchenphysik werden Beschleuniger zur Bestimmung der Eigenschaften von Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen eingesetzt.

Zum einen kann man über **Streuungen** durch Beschuß des zu untersuchenden Teilchens dessen innere Struktur vermessen. Die erreichbare Auflösung Δx wird vom Viererimpulsübertrag $\sqrt{Q^2}$ des Austauschteilchens über die Beziehung

$$\Delta x = \frac{\hbar}{\sqrt{Q^2}} \tag{2.1}$$

bestimmt. Der Viererimpulsübertrag ist durch die zur Verfügung stehende Schwerpunktsenergie begrenzt.

Zum anderen wird durch **Annihilation** von Teilchen und Antiteilchen eine definierte Schwerpunktsenergie erreicht, mit der neue Teilchen durch Resonanzen im Wirkungsquerschnitt nachgewiesen und untersucht werden können bzw. deren Masse und Lebensdauer bestimmt wird. Dazu muß jedoch die Stoßenergie in der Größenordnung der Masse des zu erzeugenden Teilchens sein.

Beim Bau eines Beschleunigers, mit dem Teilchenreaktionen mit hoher Genauigkeit vermessen werden sollen, müssen verschiedene Designparameter beachtet werden. Von großer Bedeutung sind hier die Teilchensorte der Stoßpartner, die maximale Energie und die Luminosität.

Eine möglichst hohe **Schwerpunktsenergie** erreicht man, indem zwei bewegte Partikel aneinander streuen bzw. annihilieren. Aus diesem Grunde sind sogenannte Fixed-Target-Experimente, d.h. Beschleuniger bei denen ein beschleunigtes Teilchen auf ein feststehendes, ruhendes Ziel geschossen wird, nur noch selten anzutreffen. Die Berechnung der Schwerpunktsenergie erfolgt unter Vernachlässigung der Teilchenmassen bewegter Teilchen durch[1]

$$E^2_{\text{Schwerpunkt}} = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \tag{2.2}$$

[1] Formel für Collider gilt nur für Kollisionen von Teilchen aus entgegengesetzten Richtungen.

$$E_{\text{Collider}} = \sqrt{4E_1E_2} \tag{2.3}$$

$$E_{\text{Fixed-Target}} = \sqrt{2E_1m_2} \tag{2.4}$$

Die verbreitetste Bauart von Beschleunigern ist die Kreisform, bei der beide Stoßpartner gegenläufig in Beschleuniger-Ringen umlaufen. Sind die Stoßpartner Teilchen und Antiteilchen, so können sie im selben Ring beschleunigt werden; dies bietet den Vorteil der gemeinsamen Synchronisation. Allerdings ist die Herstellung großer Ströme von Antiteilchen relativ schwierig. Der Nachteil der Kreisbeschleuniger liegt im Energieverlust durch Synchrotronstrahlung aufgrund der gekrümmten Bahn. Für die Zukunft sind jedoch auch einige Experimente geplant, bei denen die Stoßpartner durch zwei Linearbeschleuniger, die die Teilchen in einer geraden Röhre beschleunigen, aufeinander geschossen werden. Dazu muß jedoch die Stärke der beschleunigenden elektromagnetischen Felder vergrößert werden, da sonst die Beschleunigungsstrecken zu lang sind. Hier ist die Synchronisation der beiden Teilchenstrahlen kompliziert. Ein weiterer Nachteil ist, daß sich die Teilchenstrahlen nur einmal kreuzen und danach das Beschleunigersystem verlassen.

Neben der Schwerpunktsenergie ist die **Luminosität** L einer der grundlegenden Parameter. Zusammen mit der Maschinenlaufzeit t läßt sich die integrierte Luminosität

$$\mathcal{L} = \int_t L(t)dt$$

berechnen. Die zu erwartetende Ereigniszahl N für einen Prozeß mit gegebenen Wirkungsquerschnitt σ ergibt sich aus

$$N = \mathcal{L} \cdot \sigma.$$

Eine hohe Luminosität erreicht man durch kleine Strahlquerschnitte und hohe Teilchenströme.

Alle Colliderexperimente sind in eine der drei folgenden Kategorien nach Art der **Stoßpartner** einzuordnen. Die Vorteile bei der Beschleunigung von Elektronen entstehen aufgrund der geringen Masse. Schon bei einer Energie von 37 MeV erreichen die Elektronen eine Geschwindigkeit von 99.99% der Lichtgeschwindigkeit. Dadurch müssen bei der Beschleunigung im Ring nur kleine zeitliche Synchronisationen berücksichtigt werden. Die Probleme bei der Verwendung von Elektronen bestehen in den hohen Energieverlusten pro Umlauf durch Synchrotronstrahlung, die die maximale Strahlenergie begrenzen oder einen größeren Ringdurchmesser notwendig machen. Bei den schwereren Protonen hingegen ist ein Geschwindigkeitsbruchteil von 99.99% der Lichtgeschwindigkeit erst bei einer Teilchenenergie von 66.5 GeV erreicht, dadurch wird der Beschleunigungsvorgang komplizierter. Die erreichbaren Energien liegen höher, wobei berücksichtigt werden muß, daß bei tief-inelastischen Stößen nur ein Bruchteil x_B des Protonimpules (i.d.R. ist $x_B \approx \frac{1}{5} \ldots \frac{1}{3}$) im harten Prozeß zur Verfügung steht.

Bei e^+e^--*Beschleunigern* werden Elektronen mit Positronen mit entgegengesetzt gleichem Impuls zur Kollision gebracht. Die dabei freiwerdende Energie kann zur Erzeugung von Teilchen verwendet werden, die die Quantenzahlen des Photons oder des Z^0-Bosons haben. Die Vorteile liegen in der einfachen Reaktionskinematik, da das Laborsystem gleichzeitig Schwerpunktsystem ist und bei Annihilation eine immer konstante, durch die Strahlenergie gegebene Schwerpunktsenergie vorliegt.

Bei $p\bar{p}$-*Maschinen* streuen Protonen an deren Antiteilchen. Der Vorteil dieser Beschleuniger liegt in der höheren Energie der Strahlteilchen. Die Nachteile entstehen durch die innere Substruktur der Protonen, die bedingt, daß nur ein Teil des Protonimpules in der Reaktion zur Verfügung steht und die Reste der Protonen zusätzliche Energie im Detektor hinterlassen. Dadurch entstehen hohe Teilchenmultiplizitäten. Ein weiteres Problem entsteht dadurch, daß die Strahlteilchen durch die starke Wechselwirkung im Anfangszustand zusätzliche Hintergrundereignisse hervorrufen können. Für pp-Collider, wie z.B. den inzwischen genehmigten LHC, gelten die gleichen Vor- und Nachteile; hinzu kommt jedoch, daß Protonen sehr viel einfacher in großen Strömen erzeugt werden können als Antiprotonen. Zwar kann keine $q\bar{q}$-Annihilation stattfinden, aber bei Energien im TeV-Bereich spielt die Wechselwirkung der Gluonen eine weitaus größere Rolle, so daß dieser Nachteil nicht ins Gewicht fällt.

Schließlich existiert noch die Möglichkeit, Partikel unterschiedlicher Teilchensorten kollidieren zu lassen. Bei $e^{\pm}p$-*Beschleunigern* werden hochenergetische Protonen auf Elektronen oder Positronen geschossen. Die Vorteile liegen in der inneren Substruktur nur eines der Strahlteilchen, des Protons. Diese kann durch Beobachtung des gestreuten Elektrons und des hadronischen Endzustandes vermessen werden. Da der Energieübertrag von Ereignis zu Ereignis unterschiedlich ist, können die Untersuchungen mit verschiedenen Schwerpunktsenergien ohne Veränderung der Strahlenergien durchgeführt werden. Die Nachteile entstehen durch die Verschiedenheit von Labor- und Schwerpunktsystem.

In der Tabelle 2.1 sind die wichtigsten Beschleuniger aufgeführt.

2.2 HERA

Der Beschleuniger HERA (**H**adron **E**lektron **R**ing **A**nlage) ist der einzige $e^{\pm}p$ Beschleuniger und wurde nach siebenjähriger Bauzeit 1991 in Betrieb genommen.

Die Beschleuniger, die auf dem DESY-Gelände (**D**eutsches **E**lektronen **Sy**nchrotron) bereits vorhanden waren, werden hierbei als Vorbeschleuniger benutzt. Eine Übersicht über die einzelnen Geräte gibt die Abbildung 2.1.

Der Protonenring ist mit supraleitenden Magneten versehen. Bei der Injektion in HERA sind die Protonen bereits auf 40 GeV vorbeschleunigt. Die entgegengesetzt umlaufenden Elektronen haben eine Einschußenergie in HERA von 14 GeV. Dort werden herkömmliche Magnete verwendet, da die Energie der Elektronen

Name	Ort	Datennahme	Teilchensorte	max. Strahlenergie [GeV]	Luminosität $[10^{30}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}]$
PETRA	Hamburg	–1986	e^+e^-	23.4	24 (17.5GeV)
PEP	Stanford	–1990	e^+e^-	15	60
TRISTAN	Tsukuba	–1995	e^+e^-	32	40
SLC	Stanford	1989–	e^+e^-	50	0.8
LEP	Genf	1989–1996	e^+e^-	55	11
LEP 200	Genf	1997–	e^+e^-	174[a]	24 (bei Z^0)
$Sp\bar{p}S$	Genf	1981–1990	$p\bar{p}$	315	6
Tevatron	Chicago	1987–	$p\bar{p}$	1000	25
HERA	Hamburg	1992–	$e^{\pm}p$	30/820	16
LHC[b]	CERN	2004–	pp	7000	10000

[a] 1996, stufenweise Erhöhung der Energie von LEP auf eine Schwerpunktenergie von max. 194 GeV
[b] geplant, Fertigstellung voraussichtlich 2004

Tabelle 2.1: Liste der Beschleuniger. Daten, außer LEP200, entnommen [7]

wesentlich niedriger ist und so kleinere Magnetfelder benötigt werden. In diesem Ring können sowohl Elektronen als auch deren Antiteilchen, die Positronen, beschleunigt werden. Nachdem bis Mitte 1994 Elektronen verwendet wurden, werden nun Positronen als Stoßpartner der Protonen benutzt.

Die Strahlteilchen kollidieren in den Wechselwirkungspunkten unter einem Winkel von 180°. Die Protonen und Elektronen werden zu sogenannten *Bunches* zusammengefaßt, d.h. zu Paketen aus Teilchen, die aufgrund der Beschleunigung durch elektrische Wechselfelder in Strahlrichtung eine begrenzte Ausdehnung haben.

Es existieren vier Hallen, in denen Experimente aufgebaut werden können. Neben den beiden Vielzweckdetektoren H1 und ZEUS existiert seit 1995 mit HERMES ein drittes Experiment, das über ein Gastarget die Streuung an polarisierten Elektronen bzw. Positronen untersucht. Zur Zeit ist ein viertes Experiment HERA-B im Aufbau, das die CP-Verletzung an Hadronen mit der Quantenzahl *bottom* untersuchen soll, die bei Kollisionen des Protonenstrahls mit einem Drahttarget erzeugt werden.

Die technischen Daten von HERA sind in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

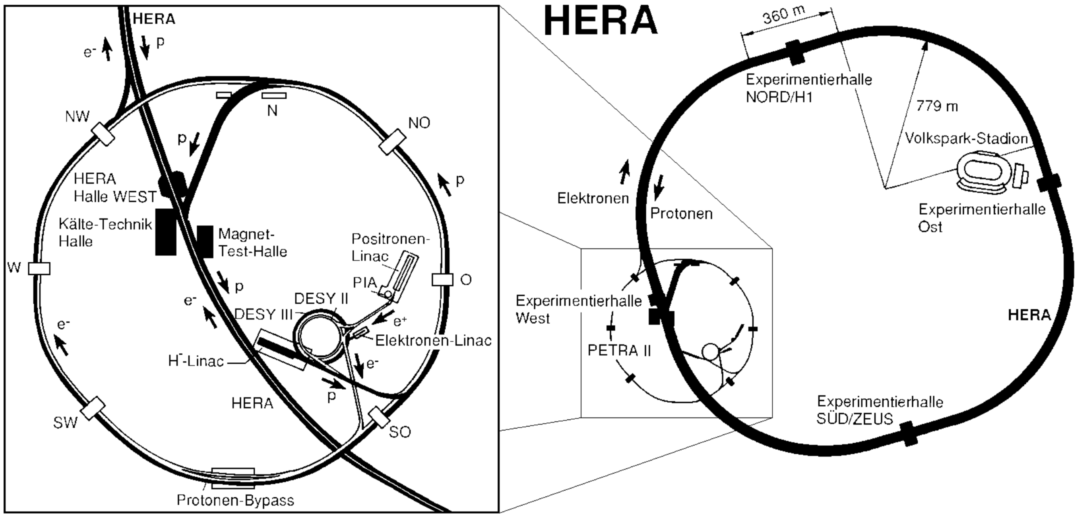

Abbildung 2.1: Der HERA Speicherring und die Vorbeschleuniger. [1]

2.3 Der H1 Detektor

Der H1 Detektor ist einer der beiden Vielzweck 4π Detektoren am HERA Speicherring. Seine Aufgaben sind die Detektierung und Bestimmung von Reaktionsprodukten bei Stößen von Protonen und Elektronen.

Dazu ist der nahezu komplette Raumbereich um den Wechselwirkungspunkt mit Spurkammern und Kalorimetern ausgestattet. Spurkammern dienen zur Bestimmung der Bahn geladener Teilchen. An der Krümmung dieser Bahn in einem externen Magnetfeld läßt sich das Ladungsvorzeichen und, in Verbindung mit der Stärke der Ionisation, die Art des Teilchens bestimmen. Kalorimeter dienen zur Energiemessung, indem sie die Menge der Ionisationsladungen in den einzelnen Zellen bestimmen.

Aus diesen Informationen kann man die Flugbahnen der Reaktionsprodukte und die Vertexposition, d.i. der Ort der Kollision, rekonstruieren. Außerdem sind noch Informationen über die Zeitpunkte der Ereignisse hilfreich, um Untergrundereignisse unterdrücken zu können.

Da die Protonen eine höhere Strahlenergie haben als die Elektronen, entspricht das Laborsystem nicht dem Schwerpunktsystem der Reaktion. Aus diesem Grunde sind die Anforderungen an die Meßgeräte in Proton- und in Elektronrichtung unterschiedlich und der Detektor selber nicht symmetrisch aufgebaut.

Die Abbildung 2.2 zeigt den H1 Detektor in einer Rißzeichnung. Das H1-Koordinatensystem ist rechtshändig und liegt so, daß die z-Achse entlang des Strahlrohres in Richtung der Protonen weist. Die x-Achse zeigt zum Speicherringmittelpunkt und die y-Achse somit nach oben. Der Nullpunkt liegt im no-

	Designparameter		1997	
	p-Ring	$e^{\pm}$-Ring	p-Ring	$e^{\pm}$-Ring
Maximalenergie [GeV]	820	30	820	27.55
Anzahl Teilchenpakete	210	210	175+6[a]	175+14
Strahlstrom/Paket [μA]	760	290	241	101
Einschußenergie in HERA [GeV]	40	14		
magnetisches Ablenkfeld [T]	4.65	0.165		
Temperatur der Magnete	4.4 K	294 K		
Schwerpunktenergie [GeV]	314		300.6	
Luminosität [$10^{30}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$]	15		3.67[b]	
Umfang [m]	6336			
Kollisionsrate [MHz]	10.4			

[a] Die zweite Zahl gibt die Anzahl der Pilotbunche an, das sind die Strahlpakete, die nicht auf ein Paket des anderen Strahls treffen und so zur Messung des Strahl–Wand und Strahl–Gas Untergrundes dienen.

[b] Der Wert von 1997 entspricht der bei H1 gemessenen durchschnittlichen Luminosität. Der höchste Wert war $9.58 \cdot 10^{30}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ (Stand Juni 1997).

Tabelle 2.2: Technische Parameter von HERA. Die Designwerte wurden bei der Datennahme 1997 teilweise noch nicht erreicht.

minalen Wechselwirkungspunkt (WWP). Meist erfolgt die Beschreibung jedoch in Polarkoordinaten, wobei θ den Polarwinkel zur z-Achse darstellt. Die ungestreuten Protonen laufen unter dem Winkel $\theta = 0°$ aus. Der Azimutalwinkel φ beschreibt die Lage in der x-y-Ebene.

Die wichtigsten Komponenten werden hier nun näher erläutert, die Zahlen beziehen sich dabei auf Abbildung 2.2 [23, 24] :

Spule $\boxed{6}$: Die supraleitende Spule erzeugt ein Magnetfeld, das eine Krümmung der Flugbahnen geladener Teilchen bewirkt. Dadurch können das Ladungvorzeichen und der Impuls eines Teilchen bestimmt werden. Die Spule ist 5.16 m lang und hat einen Radius von 2.75 m. Bei den Spurkammern in der Mitte des Detektors erzeugt sie ein nahezu homogenes Magnetfeld von 1.2 T.

Spurkammern $\boxed{2}$ und $\boxed{3}$: Im Zentral- und Vorwärtsbereich des Detektors befinden sich möglichst nahe am WWP Drahtkammern, um die Spuren der bei der Teilchenkollision entstandenen Reaktionsprodukte mit hoher Genauigkeit zu vermessen. Diese geben im Magnetfeld Aufschluß über die Impulse der Teilchen und das jeweilige Verhältnis von Ladung zu Masse.

Flüssig-Argon-Kalorimeter $\boxed{4}$ und $\boxed{5}$: Das mit flüssigem Argon gefüllte Kalorimeter deckt den Winkelbereich von vier bis 153 Grad ab. Durch seine

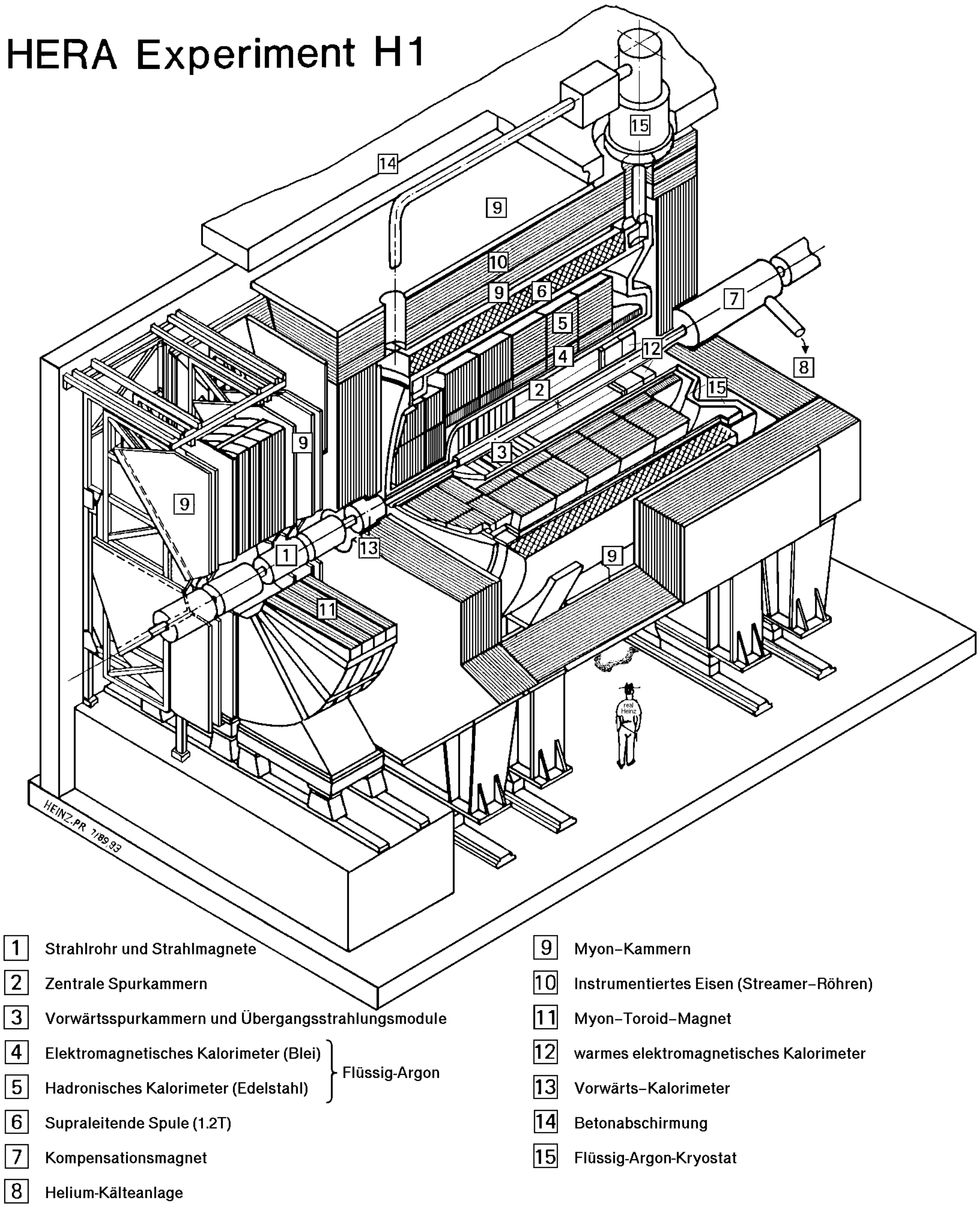

Abbildung 2.2: Der H1 Detektor. [1]

Zweiteilung in einen hadronischen äußeren Teil und ein elektromagnetisches inneres Kalorimeter ist es in der Lage, nicht nur die Energie der Teilchen zu messen, sondern auf Grund des Verhältnisses der Ladungsdepositionen in den beiden Komponenten einen Hinweis auf die Art des Teilchens zu geben. Dies ist für die Berechnung der Energie wesentlich, da der Energieverlust pro Weglänge bei Hadronen und Leptonen unterschiedlich ist.

Instrumentiertes Eisen $\boxed{\mathbf{10}}$: Zur Rückführung des magnetischen Flusses befindet sich außerhalb der Spule ein Eisenjoch. Zwischen den zehn Eisenplatten der Dicke 75mm sind Streamerrohrkammern eingeschoben. Diese sind zustzlich mit Pads bestückt, mit denen eine Energiemessung der nicht in den Kalorimetern absorbierten Teilchen möglich ist.

Rückwärtiges Detektorsystem (BDC, SpaCal) $\boxed{\mathbf{12}}$: Zwischen den Betriebsperioden 1994/95 wurde der rückwärtige Bereich des H1-Detektors verbessert. Das BEMC (**B**ackward **e**lectro**m**agnetic **C**alorimeter) wurde durch eine Kombination aus einem Kalorimeter mit szintillierenden Fasern, dem SpaCal (**Spa**ghetti **Cal**orimeter) [22], und einer Driftkammer, der BDC (**B**ackward **D**rift **C**hamber), ersetzt. Das SpaCal besteht wie das LAr-Kalorimeter aus einem elektromagnetischen und hadronischen Teil und überdeckt den Winkelbereich von 153 bis 177.5 Grad, der sog. rückwärtige *Plug*[2] schließt die Lücke zwischen Detektor und Strahlrohr und erweitert den Akzeptanzbereich bis 178.7 Grad. Das SpaCal ermöglicht so eine verbesserte Identifizierung der in den Rückwärtsbereich gestreuten Teilchen, insbesondere dient es der Elektronerkennung.

Silizium Vertexdetektoren: Ebenfalls zwischen den Betriebsperioden 1994/95 wurden zwei Silizium-Detektorsysteme zur Verbesserung der Spurrekonstruktion eingebaut [4]. Der CST (**C**entral **S**ilicon **T**racker) befindet sich zwischen dem WWP und dem CT unmittelbar am Strahlrohr und soll sekundäre Vertizes vom Zerfall kurzlebiger Teilchen auflösen. Im rückwärtigen Bereich befindet sich der BST (**B**ackward **S**ilicon **T**racker) [11], der die Spuren von unter kleinen[3] Winkeln (162–176 Grad) gestreuten Elektronen vermessen soll und so eine bessere Rekonstruktion des Vertex ermöglicht. Sowohl BST als auch CST benutzen Auslesesysteme, die auf dem APC (s. Kapitel 4.2.1) und dem OnSiRoC (s. Kapitel 4.3) basieren.

Nähere Informationen zum Detektor oder zum Beschleuniger können in der angegebenen Literatur gefunden werden ([22],[23],[24],[29],[33],[41]).

[2] engl.: Stöpsel

[3] „Klein“ bezieht sich hier auf die Einfallsrichtung der Elektronen. Der Azimuthwinkel θ ist jedoch auf die Protonrichtung bezogen.

2.4 Kinematik bei HERA

Die Kinematik der Reaktionen von Elektronen und Protonen bei HERA unterscheidet sich wesentlich von der bei Beschleunigern, in denen die Kollisionspartner gleichartig (d.h. identische Teilchen oder Teilchen-Antiteilchen) sind. Durch die stark unterschiedlichen Massen von $e^{\pm}$ und p ist das Laborsystem nicht mit dem Schwerpunktsystem identisch, außerdem erscheint das Proton bei tiefineleastischen Stößen als Verbund von Partonen, die variable Impulse besitzen können. Weil bei den $e^{\pm}p$ Kollisionen in HERA Streureaktionen stattfinden, sind Messungen über ein weites Energiespektrum möglich; dies ist ein wesentlicher Unterschied zu e^+e^- Annihilationen, bei denen die Reaktionsenergie fest ist (vgl. Kapitel 2.1).

Eine sehr wichtige Größe in der Reaktionskinematik ist das Quadrat des Viererimpulsübertrags $Q^2 = -q^2 = -(p_i - p_s)^2$ vom Elektron auf das Proton bzw. ein Parton. Bei sehr hohen Energien $E \gg m_0$ ist Q^2 im HERA-System gegeben durch

$$Q^2 = 2E_iE_s(1 + \cos\theta_e),$$

wobei E_i die Energie des einlaufenden Elektrons, E_s die Energie des gestreuten Elektrons und θ_e den Streuwinkel bezeichnet, entsprechend bezeichnen p_i und p_s die Viererimpulse des einlaufenden bzw. gestreuten Elektrons.

Bei Energien, wie sie bei HERA erreicht werden, erscheint das Proton, wie bereits erwähnt, als Verbund von quasi-freien Partonen. Der Impuls des Protons setzt sich also aus den Einzelimpulsen der Partonen zusammen. Der Impulsbruchteil des an der Streureaktion beteiligten Partons wird mit x bezeichnet und lässt sich aus anderen kinematischen Größen berechnen. Bezeichnet man den Viererimpuls des Partons vor der Streuung mit

$$p = xP$$

und danach mit

$$p' = q + p,$$

so erhält man bei Vernachlässigung der Massen (Hochenergienäherung)

$$0 = p'^2 = (q + p)^2 = q^2 + 2qp$$

und nach Ersetzen von $p = xP$ und Auflösen nach x

$$x = \frac{-q^2}{2qP} = \frac{Q^2}{W^2 + Q^2},$$

wobei W die invariante Masse des hadronischen Endzustandes bezeichnet.

Die dritte Variable zur Beschreibung der Reaktionskinematik ist die Inelastizität

$$y = \frac{pq}{pk}$$

mit p = Partonimpuls, k = Elektronimpuls. Im Ruhesystem des Protons gilt

$$y = \frac{E_e - E'_e}{E_e},$$

y bezeichnet dann den relativen Energieverlust des Elektrons.

Eine ausführlichere Diskussion der Kinematik der Lepton-Nukleon-Streuung findet sich u.a. bei [3] oder [25].

Kapitel 3

Der Very Low Q^2 Detektor

Zwischen den Runperioden 1997/98 wird der H1-Detektor im rückwärtigen Bereich ergänzt werden. Elektronen, die unter Winkeln $\theta > 178.7°$ gestreut werden, können mit den bisherigen Detektorkomponenten nicht mehr nachgewiesen werden. Um diesen Winkelbereich zu erschließen und damit die Akzeptanz des H1-Detektors im unteren Q^2-Bereich zu erweitern, wird z. Zt. der VLQ (**V**ery **L**ow **Q**^{2}-Detektor [5]) gebaut. Abbildung 3.1 zeigt einen Überblick des VLQ-Detektors, der seinen Platz unmittelbar vor dem Kompensationsmagneten ($\boxed{7}$ in Abbildung 2.2) hat. Um besonders kleine Winkel erreichen zu können, muß der Detektor sehr dicht an der Strahlachse sitzen, deshalb wird im Bereich des VLQ ein Strahlrohr eingesetzt werden, das in Abbildung 3.2 zu sehen ist. Der VLQ-Detektor besteht aus einem sog. Energie-Projektions-Kalorimeter (EPC) und einem GaAs-Tracker[1] in zwei Ebenen; ober- und unterhalb des Strahlrohrs wird jeweils ein System aus Kalorimeter und Tracker angebracht werden, um den Bereich starker Synchrotonstrahlung in der horizontalen Ebene zu vermeiden. Der VLQ überdeckt damit nicht den gesamten Bereich im Azimuthalwinkel φ, durch den großen ep-Wirkungsquerschnitt bei sehr kleinem Streuwinkel ist trotzdem eine ausreichende Statistik gewährleistet. Der VLQ wird den Winkelbereich von 177.3° bis 179.4° überdecken, sein Akzeptanzbereich überlappt also mit dem des SpaCal.

3.1 Motivation für den VLQ

Eines der Ziele des H1-Experiments ist die Bestimmung der **Protonstrukturfunktion** $F_2(x, Q^2)$. Der HERA-Beschleuniger ermöglicht dabei Messungen in kinematischen Regionen, die von bisherigen Experimenten nicht erreicht wurden. Die Untergrenze beim H1-Detektor beträgt in $Q^2 \approx 1.5$ GeV^2. Ein Einblick in die kinematische Region unterhalb dieser Grenze ist deshalb so interessant, weil hier

[1] Detektoren zur Spurvermessung werden üblicherweise auch mit dem engl. Begriff *Tracking Detectors* oder kurz *Tracker* bezeichnet.

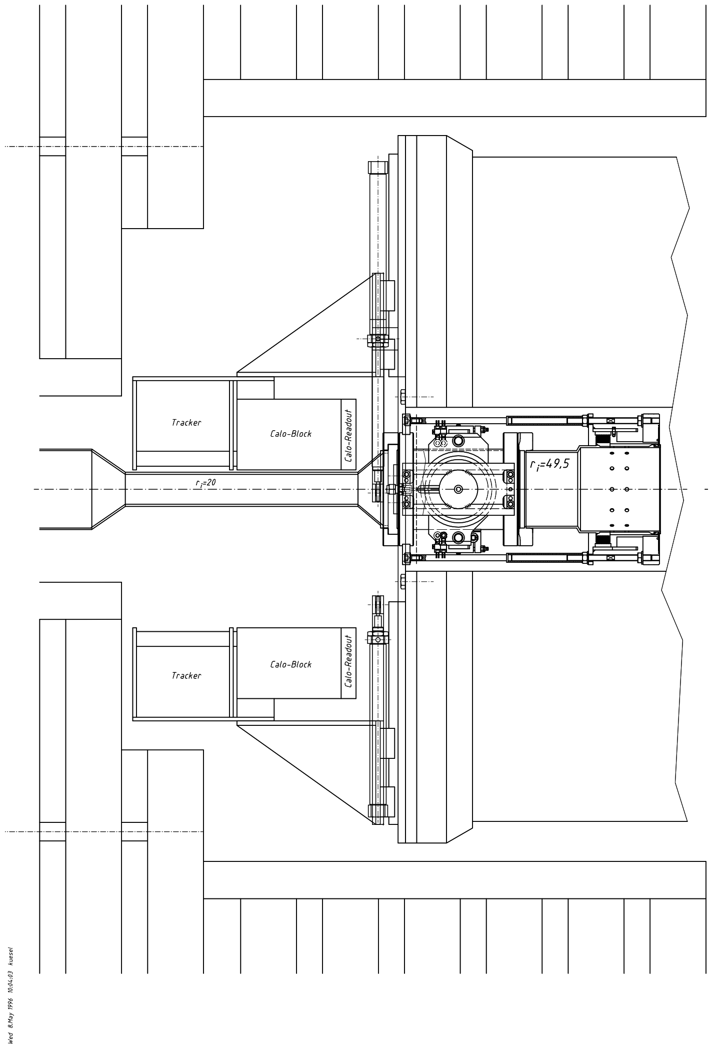

Abbildung 3.1: Überblick über den VLQ-Detektor. Oben und unten sind Teile des instrumentierten Eisens zu sehen, rechts der Kompensationsmagnet, an dem der VLQ-Detektor befestigt wird. Zur Verdeutlichung der Verfahr-Mechanik ist der obere Teil des Detektors in der Position zur Datennahme, der untere Teil in der Parkposition dargestellt. [5]

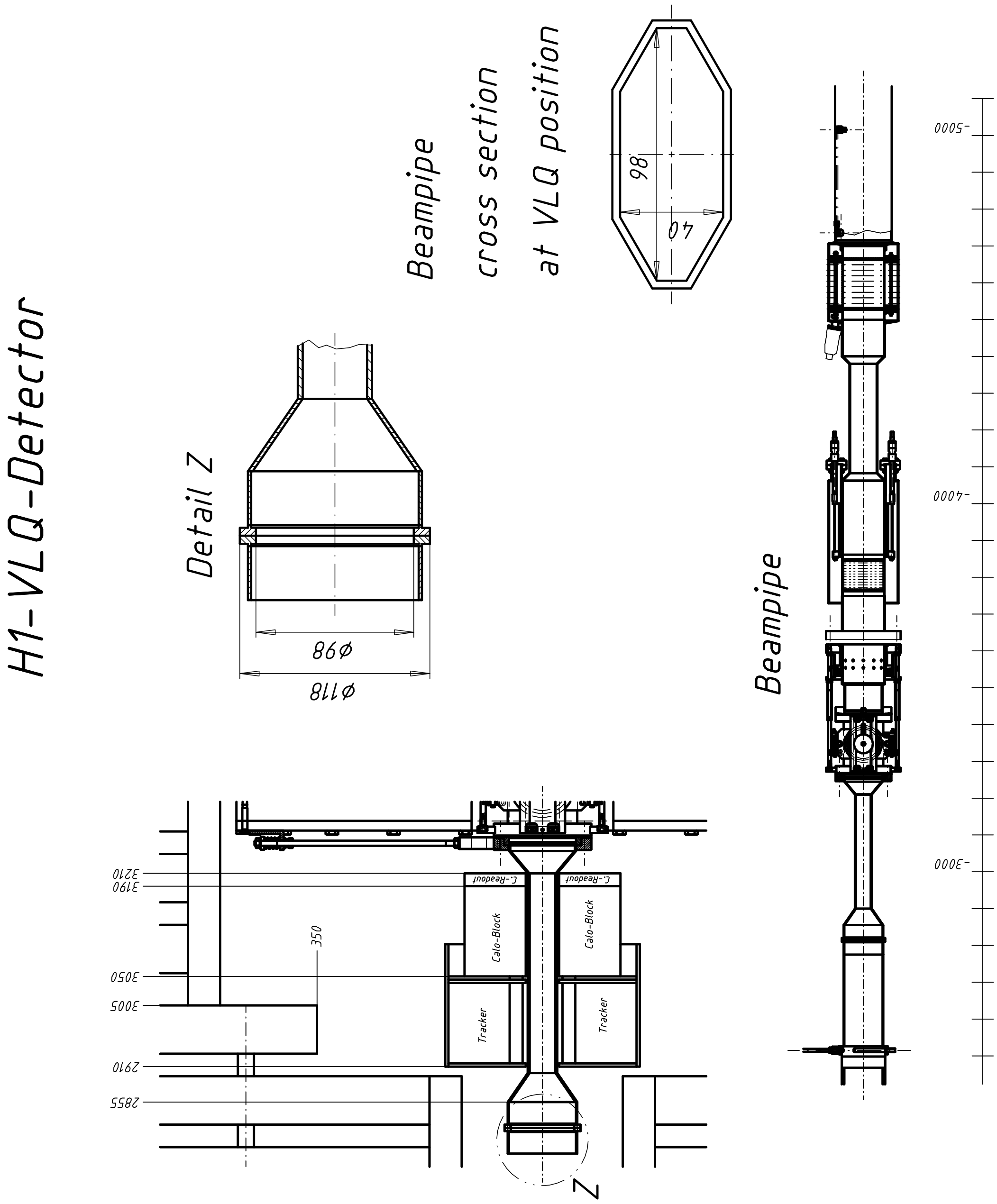

Abbildung 3.2: Das neue Strahlrohr im Bereich des VLQ-Detektors. [5]

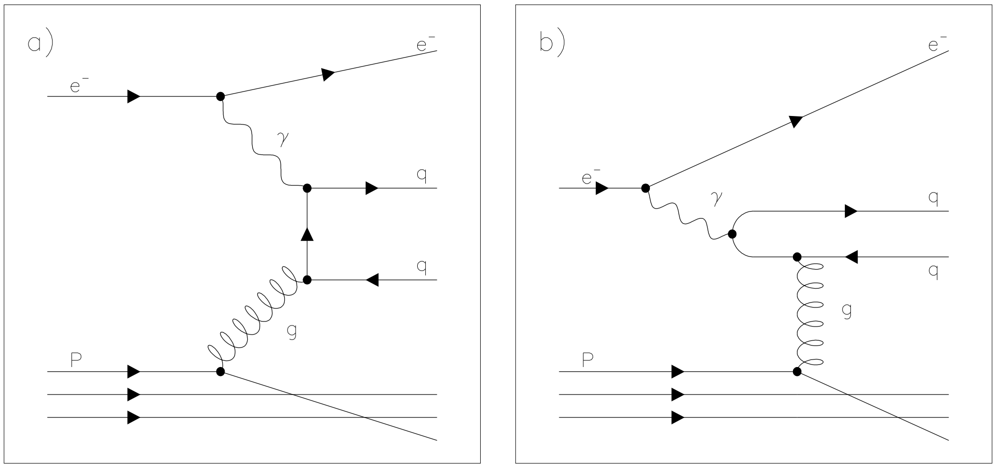

Abbildung 3.3: Feynmandiagramme für a) direkte und b) aufgelöste γ-Parton-Wechselwirkung.

der Übergang zwischen Photoproduktion und tief-inelastischer Streuung stattfindet.

Neben der Untersuchung der Strukturfunktion ist auch das Studium der **Vektormeson-Erzeugung** in diesem Q^2-Bereich von Interesse. Der Erzeugungsquerschnitt von ρ-Mesonen durch reelle ($Q^2 = 0$) Photonen ist etwa tausendmal größer als der von J/ψ-Mesonen. Für höhere Werte von Q^2 gleichen sich diese Erzeugungsquerschnitte einander an und sind bei $Q^2 = 17$ GeV^2 identisch und haben eine universelle Abhängigkeit von W^2. Dies kann qualitativ im Rahmen der perturbativen QCD (pQCD) erklärt werden. Der Übergangsbereich zwischen den verschiedenen Produktionsmechanismen kann durch den VLQ untersucht werden.

Bei der ep-Wechselwirkung kann das vom Elektron emittierte (virtuelle) Photon mit einem vom Proton bzw. einem Quark abgestrahlten Gluon wechselwirken. Dies kann auf verschieden Arten geschehen, die einfachsten sind die *Boson-Gluon-Fusion* (Abb. 3.3a) und der zugehörige *aufgelöste Prozeß*, bei dem das Photon in ein Quark-Antiquark-Paar fluktuiert (Abb. 3.3b). Bei diesen Prozessen entstehen Jets mit verschiedenen zugrunde liegenden Ereignisstrukturen. Aus diesen Jetereignissen kann man die Strukturfunktion F_2^γ des virtuellen Photons bestimmen. Auch hier erweitert der VLQ den kinematischen Bereich bis in die Übergangsregion zwischen (quasi-)reellen und virtuellen Photonen.

Abbildung 3.4 zeigt den totalen Photoabsorptionsquerschnitt aufgetragen gegen W^2. Man bemerkt im Bereich $0.02 < Q^2 < 0.5$ GeV^2 und $W^2 > 200$ GeV^2 ein Loch, in dem dieser Wirkungsquerschnitt noch nicht bestimmt ist. Dieser Bereich wird vom VLQ überdeckt (s. Abbildung 3.5).

Um Messungen in der bei H1 noch unerschlossenen Region

$$0.02 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 1.5 \text{ GeV}^2$$

machen zu können, bedarf es einer Erweiterung des Detektors im extremen Rückwärtsbereich nahe des Strahlrohrs. Diese Aufgabe soll der VLQ-Detektor erfüllen. Er vermißt die Spur des Elektrons in zwei xy-Doppellagen im Tracker und seine Energie in einem Kalorimeter, das außerdem eine weitere Ortsmessung liefert. Er ermöglicht eine Rekonstruktion des Vertex und liefert damit die für die Berechnung von Q^2 benötigte Information über den Winkel θ_e und die Energie E'_e (s. Kapitel 2.4).

3.2 Mikrostreifendetektoren aus SI-GaAs

Mikrostreifendetektoren werden in der Hochenergiephysik immer häufiger zur Vermessung der Spuren ionisierender Teilchen eingesetzt. Sie ermöglichen eine Bestimmung der Teilchenbahn mit einer Genauigkeit im 10μm-Bereich. Bislang wurde als Material in der Regel Silizium eingesetzt, das wegen seiner Verfügbarkeit, der problemlosen Bearbeitung, seiner kleinen Bandlücke[2] und hohen Ladungsausbeute ein idealer Kandidat für Detektoren ist. Allerdings nimmt Silizium bei hohen Strahlendosen Schaden, und seine Eigenschaften als Detektormaterial verschlechtern sich deutlich. Da die Strahlenbelastung der Detektoren bei zukünftigen Beschleunigern durch höhere Luminositäten und Energien noch erheblich steigen wird, sucht man nach neuen Materialien, die strahlenhart sind, d.h. bei gleicher Strahlenbelastung weniger Schaden nehmen. Hier hat sich GaAs bewährt [19, 13].

3.2.1 Funktionsweise von Halbleiterdetektoren

Die Funktionsweise von Halbleiterdetektoren ähnelt prinzipiell der von Ionisationskammern (Abb. 3.6), statt eines Zählgases wird jedoch ein dünner (einige hundert μm dicker) Halbleiterkristall verwendet. Die Rückseite des Halbleiters ist mit einem Metall beschichtet, das i.d.R. einen ohmschen Kontakt darstellt. Auf der Oberseite wird entweder ein Schottkykontakt oder ein pn-Übergang aufgebracht, so daß sich der Detektor wie eine Diode verhält. Beim Anlegen einer Spannung in Sperrichtung verarmt der Halbleiter an freien Ladungsträgern und wird zum Isolator. Analog zur Ionisationskammer werden beim Durchgang eines ionisierenden Teilchens Elektron-Loch-Paare erzeugt, die im elektrischen Feld zu den Kontakten zu driften beginnen. Die auf den Kontakten influenzierte Ladung wird von ladungsempfindlichen Verstärkern gemessen; ist die Lebensdauer

[2]Kleinere Bandlücken bedeuten ein größeres Signal. Der dadurch im Material fließende Strom darf aber gewisse Grenzen nicht überschreiten, darum soll auch die Bandlücke eine gewisse Größe nicht unterschreiten.

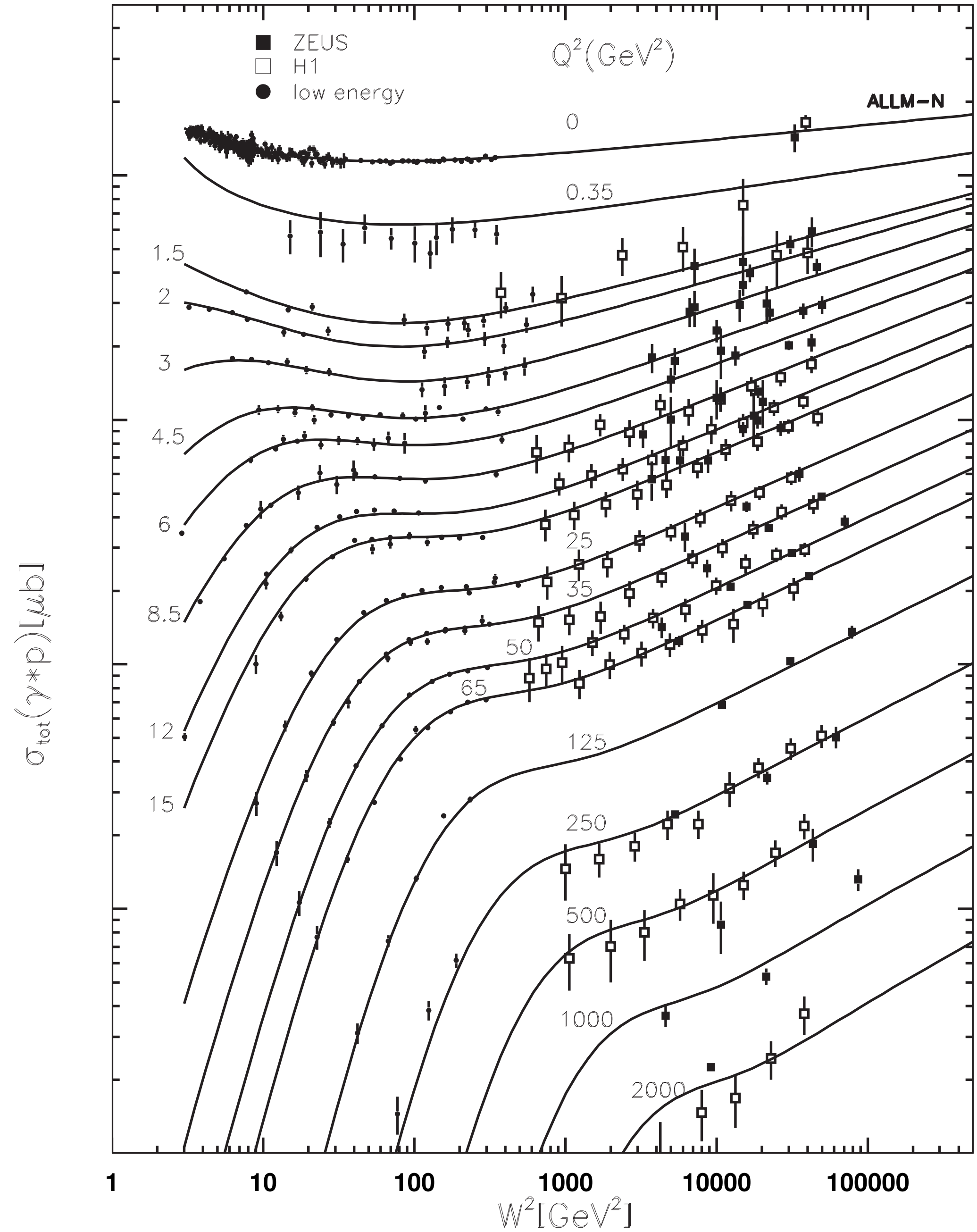

Abbildung 3.4: Totaler Photoabsorptionsquerschnitt für die γ^*p-Streuung. Im Bereich $0.02 < Q^2 < 0.5$ GeV^2, $W^2 > 200$ GeV^2 sind keine Daten vorhanden, dieser Bereich soll vom VLQ überdeckt werden. [5]

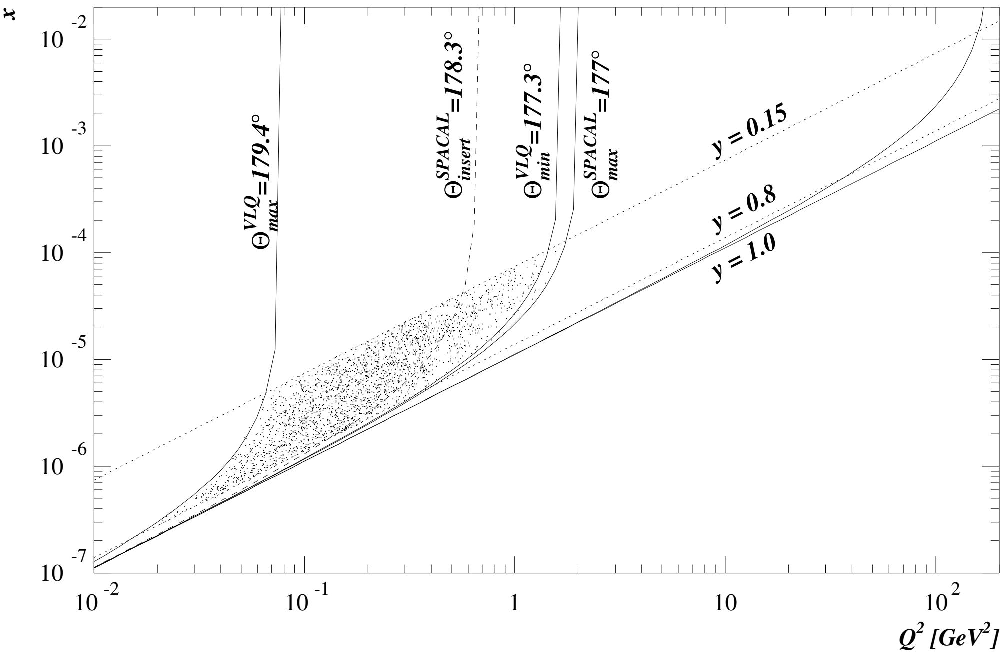

Abbildung 3.5: Akzeptanzbereich des VLQ in der log x – log Q^2 Ebene. [5]

der erzeugten Ladungsträger sehr viel größer als die Driftzeit, werden quasi alle erzeugten Ladungen gemessen.

Die im Detektor erzeugte Ladung ist proportional zum Energieverlust des ionisierenden Teilchens im Halbleiter. Der Zusammenhang zwischen Energiverlust des Teilchens und seiner Energie ist durch die Bethe-Bloch-Gleichung

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi\alpha^2 \frac{(\hbar c)^2}{m_e c^2} n_0 \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)\, I} \right) - \beta^2 \right] \tag{3.1}$$

mit

α	Feinstrukturkonstante
$m_e c^2$	Ruheenergie des Elektrons
n_0	Elektronendichte im Material
$z \cdot e$	Ladung des Teilchens
β	normierte Geschwindigkeit

gegeben (vgl. z.B. [28]); das ermöglicht prinzipiell eine Bestimmung der Teilchenenergie aus der deponierten Ladung (siehe oben). Die Vorteile von Halbleiterdetektoren sind:

- Die zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares benötigte Energie ist etwa eine Größenordnung niedriger als die, die zur Erzeugung eines Elektron-

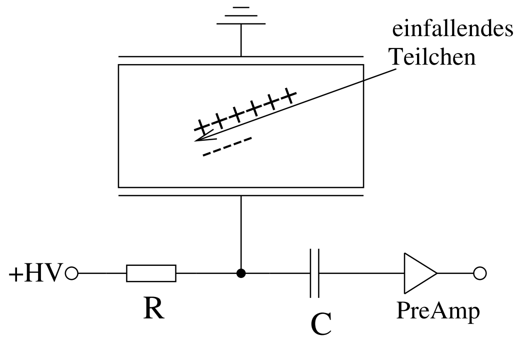

Abbildung 3.6: Funktionsweise eines Halbleiterdetektors

Ion-Paares in einem Gas benötigt wird. Das führt zu einem höheren Signal mit relativ kleinen Fluktuationen.

- Die größere Dichte und höhere Ordnungszahl führen zu höherem Energieverlust pro Wegstrecke. Deswegen können Halbleiterdetektoren mit sehr viel kleinerer Dicke gebaut werden als Ionisationskammern; die Dicke der Detektoren wird durch die Vielfachstreuung begrenzt.

- Die Mobilität der Ladungsträger ist in Halbleitern sehr viel höher als in Gasen. Das Signal von Halbleiterdetektoren hat deshalb eine vergleichsweise kurze Anstiegszeit [49].

- Die Technologien zur Bearbeitung von Halbleiterstrukturen in der Größenordnung von 10μm werden gut beherrscht und ermöglichen den Bau von Detektoren mit Ortsauflösungen um 3μm [16].

Wegen dieser Eigenschaften eignen sich Halbleiterdetektoren sehr gut für den Einsatz bei Experimenten in der Hochenergiephysik.

3.2.2 Eigenschaften von Detektoren aus SI-GaAs

Wegen seiner Nähe zum Strahlrohr (Abstand ça. 5 cm) ist der VLQ besonders der Synchrotronstrahlung des $e^{\pm}$-Strahls ausgesetzt. Hinzu kommt, daß der *ep*-Wirkungsquerschnitt für große Winkel θ sehr groß ist. Das führt zu einer hohen Strahlenbelastung des Detektors, weswegen man sich entschieden hat, Detektoren aus SI-GaAs im Tracker einzusetzen. Als Material wurden $250\,\mu$m dicke $4''$-Wafer der Firma Freiberger Elektronik Werkstoffe mit einem geringen Kohlenstoffgehalt von $2 - -4 \cdot 10^{14}\mathrm{cm}^2$ gewählt. Der Querschnitt eines solchen Detektors und eine Aufsicht sind in den Abbildungen 3.7 und 3.8 zu sehen.

SI-GaAs hat sich in zahlreichen Versuchen als strahlenhartes Material erwiesen [13, 18, 19, 20]. So liefert ein GaAs-Streifendetektor, wie er im VLQ-Detektor eingesetzt werden wird, nach Bestrahlung mit 8.2×10^{13} Protonen/cm^2 noch ein

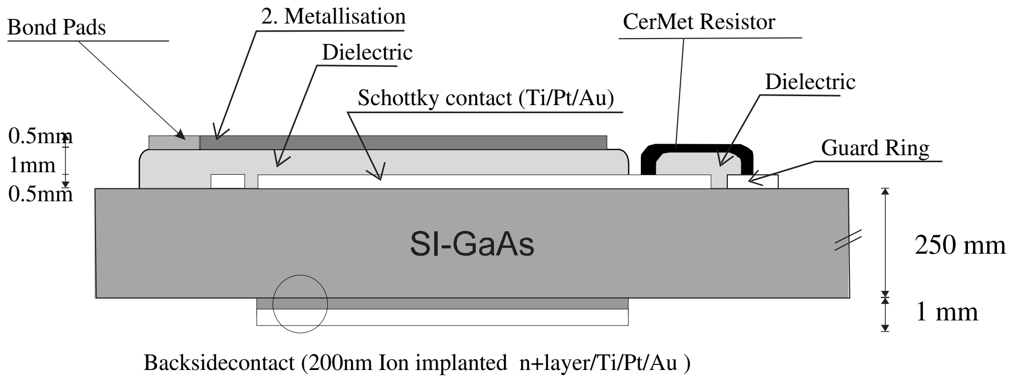

Abbildung 3.7: Querschnitt durch einen GaAs-Detektor mit integrierten Kapazitäten und Biasing-Struktur. [45]

Signal von 6000 e^- für ein minimal ionisierendes Teilchen, im Vergleich zu 15700 e^- im unbestrahlten Zustand [19]. Eine Strahlungsdosis von 100 Mrad ($\gamma, {}^{60}$Co) hatte bis auf ein geringfügiges (10%) Abfallen des Signals keinen meßbaren Einfluß auf die Parameter eines GaAs-Detektors [18].

Ein Nachteil von Detektoren aus SI-GaAs liegt in der geringen Ladungsausbeute (typisch 50%), z.B. werden in einem 250μm dicken GaAs-Detektor 32500 e^- erzeugt, es werden aber bei 200 V Sperrspannung nur ça. 15700 e^- gemessen. Trotzdem läßt sich noch ein Signal/Rausch-Verhältnis[3] von 13 erreichen [15]. Inzwischen wurden bei höheren Spannungen sogar Signalhöhen bis zu 30000 e^- gemessen [50].

[3] Siehe hierzu auch Kapitel 5.3.

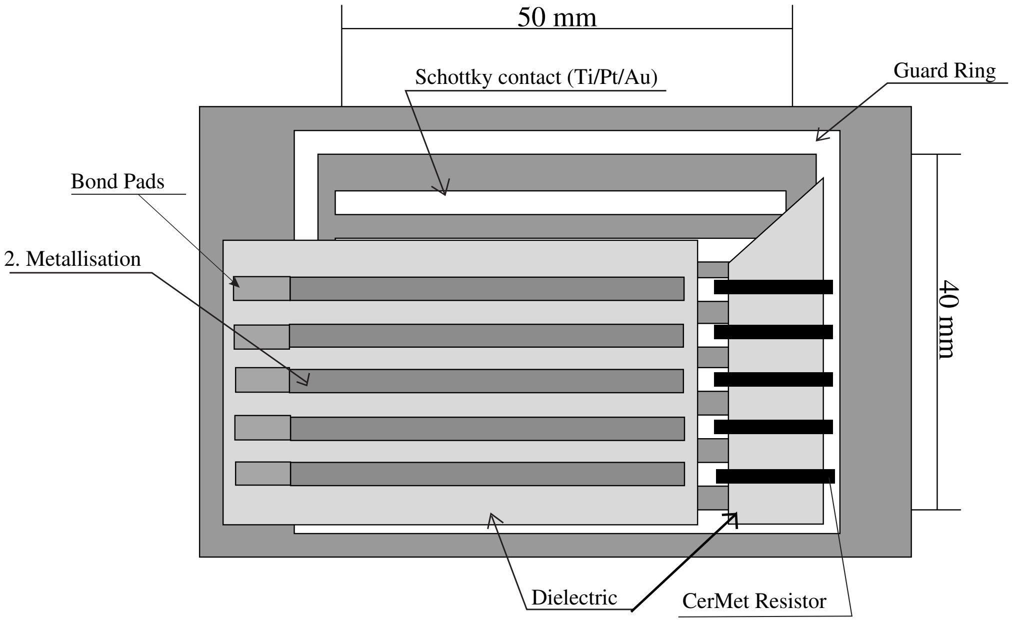

Abbildung 3.8: Abmessungen eines GaAs-Detektors für den VLQ-Tracker. Die Schattierungen der einzelnen Elemente entsprechen Abbildung 3.7. Die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu. [45]

Kapitel 4

Auslese

4.1 Das Auslesesystem bei H1

In den Wechselwirkungszonen von HERA durchkreuzen sich Pakete von Protonen und Elektronen (*bunch-crossing*) alle 96ns. Während jedes bunch-crossings kann eine Wechselwirkung stattfinden, deren Produkte dann im Detektor Signale hinterlassen. Um ein solches Ereignis zeitlich von vorhergehenden und nachfolgenden zu trennen, muss der Detektor also mit einer Frequenz von 10.4 MHz ausgelesen werden. Diese Geschwindigkeit muss von der *FrontEnd*-Elektronik[1] erreicht werden. Die Daten können mit heutigen Mitteln nicht in dieser Geschwindigkeit auf Massenspeicher geschrieben werden, denn mit einem Datenvolumen von 3 MB Rohdaten pro Ereignis ergäbe sich eine Rate von ungefähr 30 TB/s, die von der heutzutage verfügbaren Hardware nicht bewältigt werden kann. Man muss also die Datenrate drastisch reduzieren, ohne dabei physikalisch relevante Information zu verlieren.

Der erste Schritt zur Verringerung des Datenaufkommens ist die Reduktion der *Ereignisrate*, also die Auswahl von Ereignissen. Da nicht unbedingt bei jedem bunch-crossing ein physikalisch interessanter Prozeß stattfindet, brauchen die Detektordaten auch nicht für jedes bunch-crossing gespeichert zu werden. Um diese Auswahl zu treffen, benötigt man ein Triggersytem. Das Triggersystem (kurz: 'der Trigger') sollte ebenfalls Ereignisse, die zum Untergrund[2] gehören, unterdrücken. Die Entscheidung des Triggers sollte zwei Kriterien erfüllen: Sie sollte schnell und differenziert sein. Offenbar sind diese Anforderungen an die Triggerentscheidung gegenläufig; eine differenzierte Entscheidung benötigt mehr Daten

[1] Das *FrontEnd* (wörtlich: vorderes Ende) befindet sich unmittelbar an den einzelnen Komponenten des Detektors und dient dazu, die schwachen elektrischen oder optischen Signale der Detektorkomponenten zu verstärken und zwischenzuspeichern.

[2] Mit Untergrund bezeichnet man Ereignisse, die ihren Ursprung nicht in einer Teilchekollision haben. Dazu gehören Wechselwirkungen der Protonen mit dem Restgas im Strahlrohr, Kollisionen von defokussierten Protonen mit dem Strahlrohr selbst, der sog. Beam-Halo und die Synchrotonstrahlung der Elektronen.

und mehr Rechenzeit als eine ungenaue. Dieses Problem wird in der Hochenergiephysik heute durch *mehrstufige Trigger* gelöst, deren unterste Stufe (Level) eine schnelle Entscheidung bereitstellt, die später von den übergeordneten Stufen durch genauere Rechnungen bestätigt oder annuliert werden kann. Der Trigger des H1-Experimentes wird in Kapitel 4.1.1 beschrieben.

Ein weiterer Schritt ist die Verringerung des *Datenvolumens*. Bei einem Ereignis werden nicht alle Kanäle des Detektors ansprechen, man kann sich also darauf beschränken, nur die Daten der tatsächlich getroffenen Kanäle und deren Adresse zu speichern. Zusätzlich können diese verbleibenden Daten noch weiter gefiltert und komprimiert werden. Diese Prozeduren nehmen allerdings Zeit in Anspruch; um die Bearbeitung der Daten zu beschleunigen, wird diese Arbeit so weit wie möglich parallelisiert. Eine Beschreibung des Datennahmesystems (DAQ, engl.: **D**ata **Acq**uisition) ist in Kapitel 4.1.2 zu finden.

Ein wesentliches Problem bei Experimenten dieser Art stellt die Entscheidungszeit der ersten Triggerstufe dar. Bis zum Eintreffen der Entscheidung, was in der Regel einige μs dauert[3], dürfen die Daten der FrontEnd-Elektronik nicht überschrieben werden; andererseits soll der Detektor aber weiterhin sensitiv sein. Würde man das FrontEnd während dieser Zeit anhalten, würde die Information über nachfolgende Ereignisse verloren gehen; man spricht dann von *Totzeit*. Man benutzt deshalb Pipelines, die nachfolgende Daten in der Art eines Schieberegisters puffern. Auf diese Weise kann der Detektor ohne Totzeit betrieben werden, bis für ein Ereignis eine positive Triggerentscheidung vorliegt. Erst dann muß das FrontEnd angehalten werden, und die Pipelines werden gezielt ausgelesen. Pipelines können auf verschieden Arten realisiert werden, bei H1 werden die folgenden eingesetzt [23, 24, 27]:

- Fast Random Acces Memory (Fast RAM) wird zum Speichern digitalisierter Analogdaten aus Driftkammern und dem LAr-Kalorimeter benutzt. Die Analog-Digital-Wandler (ADC, **A**nalog **D**igital **C**onverter) sind mit der HERA-Clock[4] synchronisiert, die einen 8-bit Adresszähler inkrementiert, so daß das RAM einen Ringspeicher bildet.

- Für Detektoren, die rein digitale Signale liefern (z.B. Diskriminator-Output), verwendet man digitale Schieberegister, die ebenfalls mit der HERA-Clock getaktet werden.

- Analoge Verzögerungsleitungen werden bei Signalen eingesetzt, die erst während der primären Totzeit[5] mit Beginn der Auslese digitalisiert wer-

[3] Bei H1 beträgt die Zeit bis zur Level 1 Entscheidung 2.2μs, das entspricht 23 Strahlkreuzungen.

[4] Die HERA-Clock ist ein mit den Protonpaketen im Beschleuniger synchronisiertes Taktsignal

[5] Man unterscheidet primäre und sekundäre Totzeit nach ihren Ursachen: Während der primären Totzeit ist das FrontEnd für die Auslese angehalten und der Detektor nicht sensitiv.

den sollen. Das L1KEEP[6]-Signal hält eine sample-and-hold Schaltung an, aus der das Signal zwecks Digitalisierung ausgelesen werden kann.

- Die Anstiegszeiten der analogen Ausleseverstärker sind so eingestellt, daß die volle Signalhöhe mit Eintreffen des L1KEEP-Signals erreicht wird. Hier wird gleichfalls eine sample-and-hold Schaltung benutzt.

- Der Ausgang des analogen Vorverstärkers wird mit jedem bunch-crossing auf einen neuen Kondensator geschaltet, der die Ladung speichert. Diese Kapazitäten bilden einen analogen Ringspeicher, der überschreibbar ist. Die sog. *switched capacitor* Technik wird in den Auslesechips von CST und BST eingesetzt [4].

Eine Pipeline im H1-Experiment ist typischerweise 27-35 bc[7] tief. Das ermöglicht bis zum Eintreffen von L1KEEP einen Betrieb des Detektors ohne Totzeit.

Bei der Auslese des FrontEnd ergibt sich ein weiteres Problem: Um die Menge toten Materials im Detektor zu minimieren, muß die Anzahl der Kabel zum FrontEnd möglichst gering gehalten werden. Deshalb wird das FrontEnd seriell ausgelesen. Da der Detektor während der FrontEnd-Auslese nicht sensitiv ist, sollte diese nicht zuviel Zeit beanspruchen, damit während der Totzeit so wenig Ereignisse wie möglich verloren gehen. Zur Auslese stehen deshalb speziell entwickelte Elektronik-Module (*ReadOut Controller*) zur Verfügung, die auf eine schnelle Auslese optimiert sind; ein Beispiel hierfür ist der in Kapitel 4.3 beschriebene *Online Silicon ReadOut Controller* OnSiRoC.

4.1.1 Das H1-Triggersystem

Der bei H1 verwendete Trigger [23, 24] ist vierstufig: Stufe 1 und 2 sind Hardware-Trigger, deren Entscheidungen z.B. in LookUp-Tables[8] festgelegt sind, Stufe 3 und 4 sind Software-Entscheidungen, die von Prozessoren nach bestimmten Algorithmen gefällt werden. Erst Stufe 4 hat die gesamte Detektorinfomation zur Verfügung.

Die positive Entscheidung einer Triggerstufe wird der Auslese über das entsprechende KEEP-Signal (z.B. L1KEEP)[9] mitgeteilt. Bei den Triggerstufen L2-L4 kann es auch zu einer negativen Entscheidung kommen (REJECT)[10]. In diesem Fall wird das Auslesesystem mit dem Signal 'FastClear' (FCl) zurückgesetzt

---

Sekundäre Totzeit entsteht, wenn das FrontEnd angehalten ist, sich die Auslese aber z.B. wegen Speichermangel bei den übergeordneten Auslesestufen verzögert.

[6] Die positive Entscheidung der ersten Triggerstufe bei H1, s.a. Kapitel 4.1.1.

[7] **b**unch **c**rossing

[8] Tabelle, in der für jeden möglichen Eingangszustand ein Ausgangszustand definiert ist (von engl.: to look up – nachsehen, nachschlagen)

[9] Im folgenden werden die Triggerstufen (Level) mit den Abkürzungen L1-L4 bezeichnet.

[10] Bei L1 ist eine negative Entscheidung gleichbedeutend mit dem Ausbleiben von L1KEEP. In diesem Fall läuft die Datennahme ohne Unterbrechung weiter.

und meldet dem CentralTrigger (CT) seine Bereitschaft zur erneuten Datennahme mit dem Signal FER (FrontEndsReady). Der Detektor ist nun wieder sensitiv.

Die Bedeutung der vier Triggerstufen ist wie folgt:

L1 Die Entscheidung der ersten Stufe ist nach einer festen Zeit (ça. 2.2μs) verfügbar. Diese Zeit legt die Tiefe der Pipelines fest; sie setzt sich zusammen aus der Zeit, bis Triggerinformation verfügbar sind und den Signallaufzeiten. Dazu tragen insbesondere die Driftkammern (die längste Driftzeit liegt bei 1μs) und das LAr-Kalorimeter (das Signal hat sein Maximum erst nach 1.5μs erreicht) bei. Durch das L1KEEP-Signal werden die Pipelines angehalten, und die primäre Totzeit beginnt. Bei einigen Subsystemen beginnt die Auslese des FrontEnd.

L2 Ebenfalls nach einer festen Zeit (ça. 20μs) trifft die L2-Entscheidung ein. Mit dem Signal L2KEEP wird die Auslese des FrontEnd gestartet, sofern das nicht schon bei Eintreffen von L1KEEP geschehen ist. Dem Ereignis wird eine eindeutige L2KEEP-Nummer zugeordnet, anhand derer später Daten aus verschiedenen Subsystemem zum kompletten Ereignis zusammengesetzt werden. Die Entscheidung richtet sich hauptsächlich nach topologischen Kriterien, mit denen sich Untergrundereignisse unterdrücken lassen (z.B. Vertexerkennung, Prüfung ob zwei Spuren entgegengesetzt aus dem Vertex laufen, etc.) und wird von einem topologischen Trigger (L2TT) und einem neuronalen Netzwerk (L2NN) getroffen.

L3 Während der Auslese wird die Triggerinformation nochmals von einem RISC-Prozessor[11] bearbeitet. Der wesentliche Unterschied zu den vorherigen Stufen ist, daß die Entscheidung von einer Software getroffen wird. Ist diese Entscheidung positiv, wird die Auslese ordungsgemäß beendet und die vollständigen[12] Daten werden an die CDAQ[13] weitergegeben.
Die Triggerstufe 3 wird zur Zeit bei H1 nicht benutzt, da die vorhergehenden Triggerstufen die Ereignisrate schon soweit reduzieren, daß sie von der Stufe 4 verarbeitet werden kann.

L4 Die L4-Prozessorfarm besteht aus 32 RISC-Prozessorboards, die je ein Ereignis solange prüfen, bis eine Entscheidung erreicht ist. Hier steht erstmals die gesamte Detektorinformation zur Verfügung. Dadurch werden eine bessere Spurerkennung und das Verbinden von Spuren in verschiedenen Subdetektoren möglich, was wiederum eine effektivere Unterdrückung von Ereignissen aus dem Untergrund erlaubt. Da Ereignisse hier auch z.T. rekonstruiert werden, können sie bereits grob klassifiziert werden.

[11] Abkürzung für **R**educed **I**nstruction **S**et **C**ode

[12] „vollständig" in dem Sinne, daß alle Subsysteme ausgelesen worden sind. Während der Auslese findet i.d.R. eine Datenkompression statt.

[13] Abkürzung für **C**entral **D**ata **Acq**uisition, dt.: zentrale Datennahme

Weitere Aufgaben der Filterfarm sind das Füllen von Histogrammen, die für Monitoring-Zwecke benötigt werden und bei einer schnellen Fehlererkennung helfen, die Kalibration des Detektors im laufenden Betrieb und das Feststellen von möglichen Störungen des Auslesebetriebes.

4.1.2 Die H1-Datennahme

Das Datennahmesystem ist wie das Triggersystem hierarchisch aufgebaut, um durch Parallelisierung eine möglichst hohe Geschwindigkeit bei der Auslese zu erreichen. Es besteht aus mehreren Ebenen:

- *FrontEnd*
  Das FrontEnd befindet sich unmittelbar an den (Sub-)Detektoren und liest diese permanent aus. Es enthält die Pipeline und führt z.T. während der Auslese eine erste Verarbeitung der Rohdaten durch[14]. Das FrontEnd wird seriell ausgelesen, um die Anzahl der Leitungen und damit die Menge toten Materials gering zu halten.

- *Readout Controller* (RoC)
  Ein Readout Controller steuert mehrere Einheiten des FrontEnd und liest sie hintereinander aus. Der RoC liefert alle nötigen Kontrollsignale wie die Pipeline-Clock (identisch mit der HERA-Clock) und spezifische Signale zur Steuerung der Auslesechips, und kommuniziert mit dem zentralen Trigger. Er initiiert auf die Triggersignale hin die Auslese und sammelt die Daten mehrerer Auslesechips.

- *Subsystem Master Crate* (SMC)
  Das Subsystem Master Crate koordiniert und kontrolliert die Auslese des Subsystems. Hierzu dienen im wesentlichen Prozessoren, die die RoCs auslesen und die Daten für die CDAQ aufbereiten (komprimieren und formatieren) und sie in MultiEventBuffern (MEB) speichern. Nach dem Abschluß der Auslese oder nach einem L3REJECT setzen sie die gesamte Ausleseelektronik zurück (Ende der primären Totzeit). Die Prozessoren führen außerdem eine Analyse der Daten durch und füllen Histogramme, die von einem an das SMC angeschlossenen Rechner aus abgerufen werden können. Hierdurch wird eine Kontrolle des Subsystems bei laufender Datennahme ermöglicht.

- *Eventbuilder*
  Der Eventbuilder sammelt die Daten aller Subsysteme und setzt das vollständige Ereignis zusammen. Wegen der asynchronen Bearbeitung treffen die Daten nicht zwangsläufig in der Reihenfolge der zugehörigen Ereignisse

[14]Dazu gehören z.B. eine einfache Digitalisierung durch Komparatoren (getroffen/nicht getroffen), Nullpunktsanpassung o.ä.

ein. Der Eventbuilder identifiziert Daten anhand der eindeutigen L2KEEP-Nummer und sortiert sie in den zugehörigen MEB. Das vollständige Ereignis ist die Grundlage für die L4-Triggerentscheidung.

- Speicherung
  Fällt der L4-Trigger eine positive Entscheidug (KEEP), so wird das Ereignis per Glasfaserleitung zum DESY-Rechenzentrum übertragen und auf Band geschrieben. Die gespeicherten Ereignisdaten werden direkt rekonstruiert und klassifiziert und stehen nun für Offline-Analysen zur Verfügung.

4.1.3 Zusammenfassung der Anforderungen an die H1-Auslese

Aus dem oben beschriebenen Aufbau des H1-Auslesesystems ergeben sich im Interesse geringer Totzeiten und der Minimierung des Datenaufkommens für die Ausleseelektronik eines Subsystems die folgenden Anforderungen:

- schnelles samplen der Detektordaten mit 10.4MHz
- Zwischenspeicherung der Daten in einer Pipeline mit einer Tiefe von mindestens $2.2\mu s$
- schnelle, unkomplizierte Datenaufbereitung (Nullpunktsanpassung u.ä.) zu einem möglichst frühen Zeitpunkt
- schnelle, möglichst parallele Auslese des FrontEnd durch den RoC
- direkte und effektive Datenkompression
- unmittelbare Reaktion des RoC auf Triggersignale
- sofortige Weitergabe der Daten an das SMC

Für die Silizium-Vertexdetektoren [4] wurden deshalb ein neues FrontEnd, der Analog Pipeline Chip (APC) [27], und das zugehörige Auslesemodul OnSiRoC[15] [42, 17, 14] entwickelt, die in den Kapiteln 4.2.1 und 4.3 beschrieben werden.

4.2 Das FrontEnd-System

In diesem Abschnitt wird das Auslesesystem des VLQ-Trackers beschrieben. Es basiert auf Komponenten, die bereits für die Silizium-Detektoren CST und BST bei H1 entwickelt wurden [42, 17, 14]. Der Hybrid (Kapitel 4.2.3), der u.a. die Auslesechips enthält, wurde für den VLQ neu entworfen [9]. Abbildung 4.1 gibt

[15] **On**line **Si**licon **R**eadout **C**ontroller

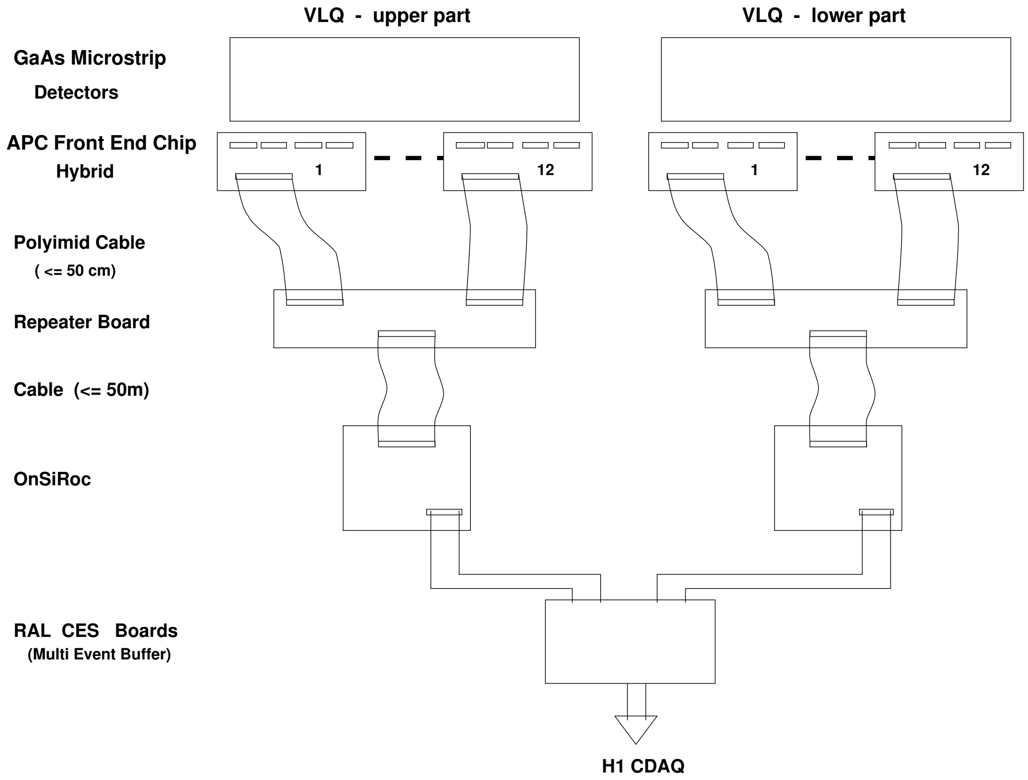

Abbildung 4.1: Übersicht über das Auslesesytem des VLQ-Trackers. Die Prinzipskizze entspricht nur qualitativ der endgültigen Anordnung. [5]

einen Überblick des Auslesesystems für den VLQ-Tracker wieder. Die Prinzipskizze zeigt den Aufbau mit den Detektoren, dem FrontEnd auf den Hybriden, den Repeatern, den OnSiRoCs und den MultiEventBuffern (MEB). Die Abbildung entspricht jedoch nur qualitativ der endgültigen Anordnung.

4.2.1 Der Analog Pipeline Chip (APC)

Der APC ist ein Auslesechip für Silizium-Halbleiterdetektoren, der speziell an die Bedingungen des H1-Experimentes angepasst ist. Abbildung 4.2 verdeutlicht die Funktionsweise des APC.

Wegen der hohen Bunchcrossing-Frequenz von 10.4MHz ist eine Frontend-Elektronik erforderlich, die Daten bis zum Eintreffen der Triggerentscheidung zwischenspeichern kann. Dies wird durch eine Pipeline realisiert, die das vorverstärkte Signal vom Detektor in sog. *switched capacitors* speichert. Bei Eintreffen einer positiven Triggerentscheidung wird das FrontEnd gestoppt, und die auf den betreffenden Kapazitäten gespeicherte Ladung wird ausgelesen. Der APC ist darauf ausgelegt, 128 Streifen parallel auszulesen. Für jeden Streifen ist ein ladungsempfindlicher Vorverstärker vorhanden, der sich durch geringes Rauschen,

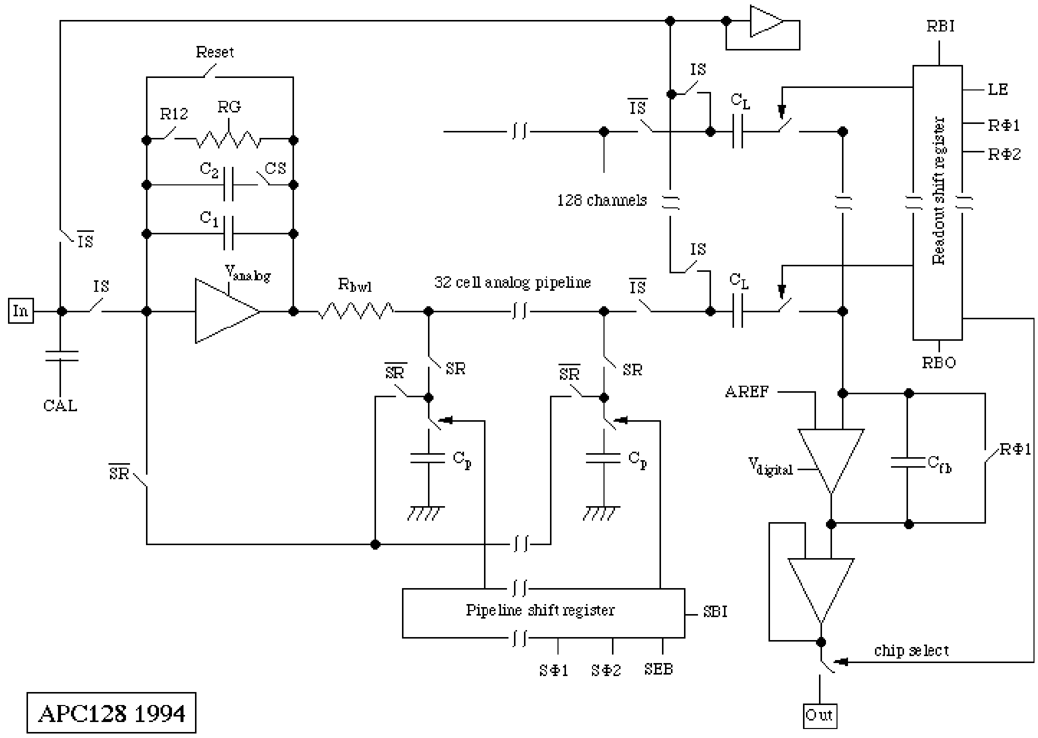

Abbildung 4.2: Prinzipschaltbild des APC128. [2]

geringe Leistungsaufnahme und eine auf die HERA-Bunchcrossing-Frequenz angepaßte Anstiegszeit des Ausgangssignals von etwa 100ns auszeichnet. Dieser Vorverstärker arbeitet als Integrator, so daß eine im Detektor deponierte Ladung einen Spannungssprung am Ausgang des Verstärkers verursacht. Da wegen dieser Arbeitsweise die auf den Kapazitäten der Pipeline deponierte Ladung kein direktes Maß für die im Detektor deponierte Ladung ist, bedarf es der Subtraktion eines Buffers[16], der unmittelbar vor dem triggerauslösenden Ereignis geschrieben wurde. Die Ladungsdifferenz zwischen diesen Buffern ist der Größe des Detektorsignals proportional. Bei der Auslese der gespeicherten Ladungen wird die Aufbereitung des Signals wieder vom Eingangsverstärker übernommen. Dies bietet die Vorteile der automatischen Arbeitspunktanpassung (kein DC-Matching[17] nötig), geringerer Verlustleistung und der digital kontrollierten Signalprozessierung[18]. Nach der Subtraktion der Buffer werden die Signale der 128 Streifen seriell über einen Ausgangsverstärker ausgelesen und an das Auslesemodul *OnSiRoC* (s. Kapitel 4.3) weitergegeben.

[16] Eine Kapazität in der Pipeline wird auch als Pipeline-Buffer bezeichnet

[17] engl. Begriff für die Anpassung der Gleichspannungarbeitspunkte zwischen Ausgang und Eingang.

[18] Durch die Selbstlesearchitektur ist es möglich, Signale mehrfach zu prozessieren; das Design der Pipeline ermöglicht zusätzlich die Addition mehrerer Buffer.

IS	verbindet die Vorverstärker mit dem Detektor
SR	verbindet die Pipeline mit dem Ausgang des Vorverstärkers
RESET	setzt die Vorverstärker zurück
CS	Schaltet die zweite Kapazität am Vorverstärker zu
R_{12}	schaltet den Rückkopplungswiderstand am Vorverstärker zu
R_G	beeinflusst die Größe des Rückkopplungswiderstandes
Rϕ1, Rϕ2	zweiphasiger Takt, bedient das Ausleseschieberegister
RBI	wird in das Ausleseschieberegister hineingetaktet
LE	schaltet das Ausleseschieberegister zu
Sϕ1, Sϕ2	zweiphasiger Takt, bedient das Pipelineschieberegister
SBI	wird in das Pipelineschieberegister hineingetaktet
SEB (=$\overline{SE}$)	schaltet das Pipelineschieberegister ab

Tabelle 4.1: Liste der APC-Kontrollsignale und ihrer Funktionen

Der APC benötigt zum Betrieb 14 Kontrollsignale, die vom Decoder (Kapitel 4.2.2) bereitgestellt werden. Eine Auflistung der Signale und ihrer Funktion findet sich in Tab. 4.1. Diese Signale steuern die Funktionsweisen des Eingangsverstärkers (Rücksetzen, Beeinflussen der Verstärkung und der Signalform, Wahl der Signalquelle) und der Pipeline sowie die sequentielle Auslese.

Ein Auslesezyklus des APC läuft prinzipiell wie folgt ab: Zunächst werden alle Verstärker zurückgesetzt und die Schieberegister gelöscht. Das Ausleseschieberegister wird mit einem einzelnen Bit geladen (es soll genau *ein* Pipelinebuffer an den Vorverstärker angeschlossen werden), und der Vorverstärker wird mit dem Signaleingang, d.h. mit dem Detektor, verbunden. Damit ist die Initialisierungsphase beendet. Die Pipeline des APC läuft nun in einer Endlosschleife bis zum Eintreffen einer Triggerentscheidung. Daraufhin wird die Pipeline angehalten, und die Eingangsverstärker werden vom Detektor getrennt. Die Pipeline wird bis zum triggerauslösenden Ereignis zurückgestellt, und die entsprechenden Buffer vor und nach dem Ereignis werden voneinander subtrahiert. Das Ausleseschieberegister wird mit einem einzelnen Bit geladen (es soll nur ein Streifen auf einmal am Ausleseverstärker anliegen), und alle Streifen werden über einen einzigen Verstärker sequentiell ausgelesen. Ausführlichere Beschreibungen der APC-Auslesesequenz finden sich in [27], [32, S. 14ff] und [42].

Die elektronischen Eigenschaften des APC128 bestimmen die Qualität der Signale und damit die Qualität der Messung. Der wesentlichste Punkt dabei ist das vom APC erzeugte Rauschen, das zu einem großen Teil vom Ausgangsverstärker stammt [32]. Weitere Rauschquellen sind der Eingangsverstärker, die Schalter der Pipelinekapazitäten und der Subtraktionsvorgang. Einen kleinen Beitrag liefert zusätzlich die Latchkapazität C_L. Für einen Auslesevorgang mit einfacher Subtraktion wurde bei offenem APC-Eingang eine ENC[19] von $539.3 \pm 6.1 \pm 28.0$ Elektronen bestimmt ([32, S. 37]). Beim Betrieb eines Detektors am APC erhöht sich das Rauschen jedoch durch die Kapazität der Streifen, die bei GaAs-Detektoren i.d.R. bei ça. 20pF liegt. Die Zunahme des Rauschens mit der Streifenkapazität ist linear, als bisher beste Parametrisierung gilt die Angabe aus [11] von $\mathrm{ENC} = 650e^- + 55e^-/\mathrm{pF} \cdot C_{Det}$, was in dieser Arbeit für Abschätzungen verwendet werden wird [39]. Das erwartete Rauschen des APC mit einem GaAs-Detektor liegt damit also bei etwa 1750 Elektronen ENC.

4.2.2 Der Decoderchip

Der Decoder ist ein speziell für die Ansteuerung des APC entwickelter Demultiplexer mit einigen Zusatzfunktionen. Seine Hauptaufgabe besteht darin, alle Steuersignale für den APC aus den vier vom OnSiRoC kommenden Signalleitungen zu dekodieren. Dazu besitzt der Decoder ein 64 Bit tiefes Schieberegister, in dem die ersten 16 Bits die APC-Signale kontrollieren. Die genaue Belegung ist in Tabelle 4.2 aufgeführt, Abbildung 4.3 zeigt ein Prinzipschaltbild des Chips.

Die sog. 'langsamen' APC-Signale sind als Schalter im Schieberegister ausgeführt, die 'schnellen' Signale (Sϕ, Rϕ, SBI und RBI) werden aus den Clocksignalen $\phi 1$, $\phi 2$ und BIN des OnSiRoC direkt abgeleitet (s. Kapitel 4.2.2). Ausser den Signalen zur APC-Steuerung bietet der Decoder noch weitere Funktionen:

- **Kalibrationsregister**
  Ein 32 Bit breites Register, in dem jedes Bit den CAL-Ausgang des Decoders eine Zeitscheibe lang ansteuert. Es wird mit der ShiftClk [20] betrieben, so daß jedes Bit einem Pipelinebuffer entspricht. Damit läßt sich gezielt in einen festen Buffer ein Testpuls einkoppeln.

- **Monitorregister / Schalter**
  Diese Schalter bedienen zwei 4-auf-1 Multiplexer, die es ermöglichen, eine von acht Monitorspannungen (z.B. Spannungsabfall über einen NTC[21]-Widerstand zur Temperaturmessung) auf einen Ausgang zu legen, der i.d.R. mit der Ausleseleitung verbunden ist.

- **Digital-Analog-Wandler**
  Sieben Feldeffekt-Transistoren (FET), die sich jeweils um den Faktor 2 in der Verstärkung unterscheiden, realisieren einen 7 Bit DAC, mit dem z.B. die Stromversorgung der APC (V_{Ana}) über eine regelbare Stromquelle gesteuert werden kann.

[19] Für die Rauschamplitude wird gewöhnlich das Äquivalent in Einheiten der Elemtarladung angegeben, man bezeichnet dies als Äquivalentrauschen oder **E***quivalent* **N***oise* **C***harge* (s.a. Kapitel 5.3.

[20] Die ShiftClk ist ein zweiphasiges Signal (Sϕ1S, $\phi 2$), das im OnSiRoC von der HERA-Clock abgeleitet wird. Vgl. dazu auch Tabelle 4.1

[21] Negative Temperature Coefficient

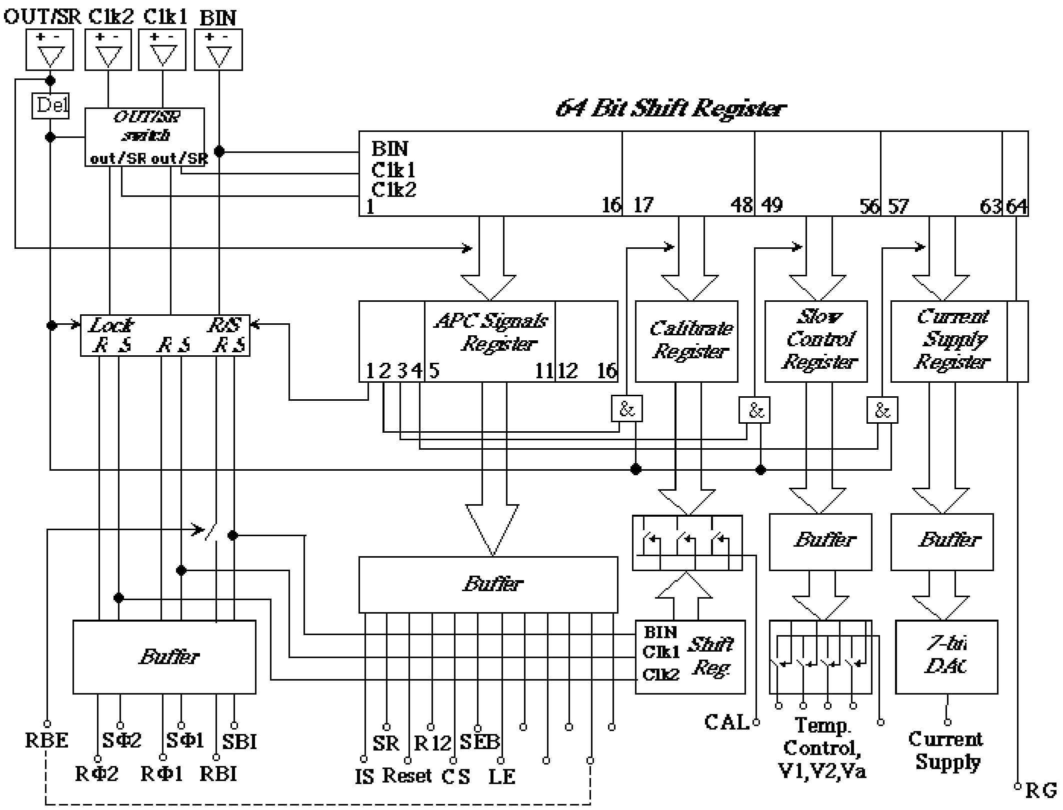

Abbildung 4.3: Prinzipschaltbild des Decoderchips. Die Signale Clk1 und Clk2 entsprechen $\phi1$ und $\phi2$; die unterschiedliche Nomenklatur ist historisch bedingt. [2]

Bit	*Funktion*	
1	ShiftClk/$\overline{\text{ReadClk}}$	
2	Setze Kalibrations-Register	
3	Setze Monitor-Register	bei Übergang SR $\rightarrow$ $\overline{\text{OUT}}$
4	Setze DAC-Register	
5	IS	
6	SR	
7	RESET	
8	R_{12}	langsame APC-Signale
9	CS	
10	SEB	
11	LE	
12-15	frei verfügbar	
16	FET-Schalter	
17-48	Kalibration für Pipelinebuffer 1-32	
49-56	Schalter 1-8 (Monitor)	
57-63	DAC Bit 0-6	
64	Variation des Rückkopplungswiderstandes R_G der APC-Vorverstärker	

Tabelle 4.2: Belegung des Decoder-Schieberegisters

- **Frei verfügbare Steuerleitungen**
  Diese Signale stellen wie die APC-Steuersignale einen High-/Low-Pegel zur Verfügung, mit denen beliebige Funktionen ausserhalb des Decoders kontrolliert werden können. Sie werden i.d.R. zur Auswahl eines Decoders aus mehreren verwendet.

- **FET-Schalter**
  Dieser Schalter verbindet zwei frei verfügbare Anschlüsse des Decoders.

Da die Funktionen Kalibration, Monitor und DAC im Vergleich zu den langsamen APC-Signalen eher selten benutzt werden, ist es nicht immer nötig, das Schieberegister komplett neu zu laden, sondern nur die ersten 16 Bits. Um das zu ermöglichen, kann das Laden der entsprechenden Subregister bei einem SR $\rightarrow \overline{\mathrm{OUT}}$ Übergang mit den Bits 2-4 des Schieberegisters verhindert werden (s.a. Tabelle 4.2).

Die Steuersignale $\phi 1$, $\phi 2$, BIN und SR/$\overline{\mathrm{OUT}}$

Der Decoder ermöglicht die Ansteuerung des APC durch vier Signale: $\phi 1$ und $\phi 2$ bilden einen zweiphasigen Takt, mit dem Informationen auf BIN weitergegeben werden. Der Zustand von SR/$\overline{\mathrm{OUT}}$ bestimmt dabei, ob diese Information unmittelbar an den APC weitergegeben wird (OUT) oder in das Decoder-Schieberegister getaktet werden (SR). Ein Übergang von SR nach OUT sorgt außerdem dafür, daß die Subregister des Decoders mit dem Inhalt des Schieberegisters geladen werden, erst dann ändern die Ausgänge ihren Zustand.

Bei der Weitergabe der Signale an den APC ('schnelle APC-Signale') entscheidet der Zustand von Bit 1 des Schieberegisters, ob $\phi 1$, $\phi 2$ und BIN als R$\phi 1$, R$\phi 2$ und RBI oder als S$\phi 1$, S$\phi 2$ und SBI zum APC gelangen.

4.2.3 Der VLQ-Hybrid

Der Hybrid ist ein Modul, das die FrontEnd-Elektronik für den VLQ vereinigt (s. Abbildung 4.4). Er enthält neben 5 APCs für die Auslese von 640 Streifen eines Mikrostreifendetektors einen Decoderchip, der die Steuersignale vom OnSiRoC decodiert und die APCs kontrolliert, sowie für jeden APC einen Operationsverstärker, der zur Anpassung des Ausgangswiderstandes dient. Zur Versorgung der Eingangsverstärker ist für jeden APC eine Konstantstromquelle vorhanden, deren Strom über den Decoder regelbar ist. Die Signale der Operationsverstärker werden schließlich auf einen bipolaren Leitungstreiber gegeben, der die Verbindung zum Repeater (Kapitel 4.2.4) treibt; dort wird das Signal nochmals für den Weg zum OnSiRoC verstärkt. Die Ausleseverstärker neben den APCs erfüllen neben der Signalverstärkung noch die Aufgabe der Pegelanpassung. Das Ausgangssignal des APC besitzt einen Offset, der vor der Konversion in ein bipolares Signal wieder abgezogen werden muß. Zusätzlich befindet sich auf dem Hybrid ein

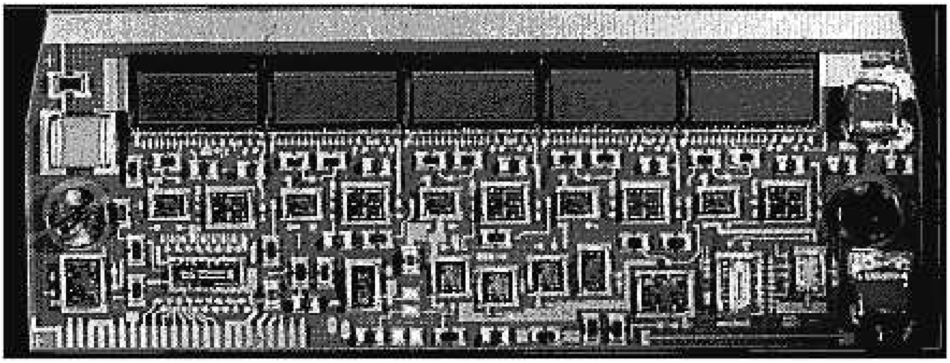

Abbildung 4.4: Das VLQ-FrontEnd auf einem Keramik-Prototypen des Hybrid. Oben sind die fünf relativ großen Auslesechips (APCs) zu erkennen, links unten der Decoderchip. Am linken unteren Rand sind die Anschlüsse herausgeführt, die auf dem neuen Dycostrate^R-Hybrid auf einer verlängerten Anschlußfolie enden. [8]

Temperatursensor, der eine Temperaturmessung über den normalen Ausleseweg gestattet.

Der Hybrid ist als *Multi-Chip-Module ausgeführt*; die Bauelemente befinden sich auf einem organischen Mehrlagenträger auf Polymidfolienbasis (Dycostrate^R), der auf einen Aluminiumträger laminiert ist [30]. Die technischen Details sind in Tabelle 4.3 zusammengefaßt.

Um die Verlustleistung im Betrieb gering zu halten, wird nur der zum gerade ausgelesenen APC gehörige Verstärker eingeschaltet, alle anderen sind im StandBy-Betrieb. Der Verstärker wird durch das Signal RBI am entsprechenden APC ein- und durch RBO wieder abgeschaltet[22]. Durch die Konstruktion des APC-Ausleseschieberegisters bedingt, wird RBO aber bereits **während** der Auslese des letzten Auslesekanals des APC aktiv, so daß der Ausleseverstärker vorzeitig abschaltet und das Signal dieses Kanals verlorengeht. Dieses Problem kann zwar z.B. dadurch umgangen werden, daß dieser letzte Auslesekanal beim Anschluß eines Detektors übergangen wird; dies wird beim VLQ aber nicht der Fall sein, so daß die entsprechenden Streifen nicht ausgelesen werden können.

4.2.4 Repeater

Der für diese Arbeit benutzte Repeater stammt aus der Auslese des H1 Backward Silicon Tracker. Er ist zu dem für den VLQ entwickelten Hybriden kompatibel und stand bereits getestet zur Verfügung. Der BST-Repeater ist ein PCB[23], das mehrere Aufgaben erfüllt. Es dient in erster Linie dazu, die von den Hybriden

[22] Die Signalbezeichnungen und ihre Funktionen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

[23] **P**rinted **C**ircuit **B**oard

Träger	Dycostrate^R 3-lagig
Leiterbahnen	Kupfer 90μm $\times$ 25μm
Anschlüsse	24
Abmessungen (B$\times$T)	42mm $\times$ 16mm
Anschlußfolie	18mm
Auslesechips	5
Auslesekanäle	640
Decoderchips	1
Ausleseverstärker	5 (1 pro Auslesechip)
Konstantstromquellen	5 (1 pro Auslesechip)
Temperaturfühler	1 LM35
Spannungsversorgung (Digitalteil)	$\pm$5V
Spannungsversorgung (Analogteil)	3V
Auslesesignal	0...1 V, bipolar

Tabelle 4.3: Technische Daten des VLQ-Hybriden [30, 9]

kommenden Signale so zu verstärken, daß sie auf dem Weg[24] zum OnSiRoC keine nennenswerten Verluste haben. Diese Verstärker befinden sich auf Daughterboards, den sog. Subrepeatern. Sie enthalten ebenfalls die Stabilisierung für die digitalen Versorgungsspannungen; der Subrepeater erzeugt aus der vom OnSiRoC gelieferten Spannung V_{Dig} die beiden Spannungen V_{D+} und V_{D-} mit $\pm$5V. Die analoge Spannungsversorgung ist durchgeschliffen, da sich auf dem Hybrid Konstantstromquellen für die Auslesechips befinden. Ebenfalls durchgeschliffen sind die Steuersignale des OnSiRoC.

Für den VLQ-Tracker wird ein eigenes Repeatermotherboard zur Zeit entwickelt; es enthält zusätzlich Elemente für die externe Detektorspannung[25] und für eine von der Auslese unabhängige Temperaturmessung. Es wird 4 Subrepeater enthalten und 8 Hybriden mit jeweils 5 APCs bedienen; das entspricht einer Doppellage (horizontale und vertikale Streifen) des VLQ-Trackers.

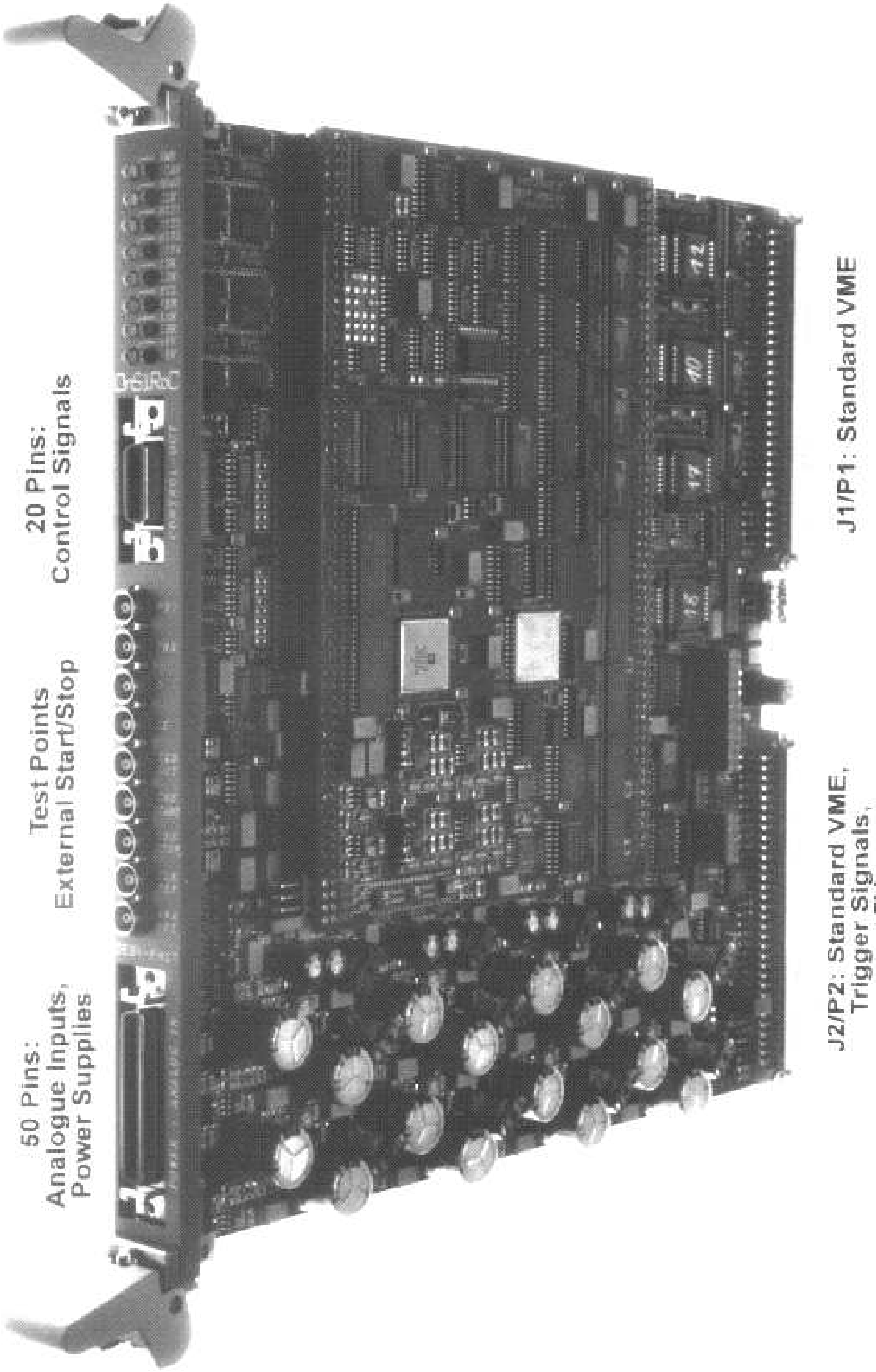

Abbildung 4.5: Das Auslesemodul OnSiRoC. Man erkennt im unteren Teil die Spannungsversorgungen, und in der unteren Hälfte des PiggyBack-Moduls zwei FADCs (als helle quadratische Chips). [8]

4.3 Das Auslesemodul OnSiRoC

Der *Online Silicon Readout Controller* (OnSiRoC) ist ein vielseitiges VME-Modul[26] , das speziell für die Auslese der Siliziumstreifendetektoren bei H1 entwickelt wurde (s. Abbildung 4.5) [42, 17, 14]. Neben der Steuerung und Auslese des FrontEnd führt der OnSiRoC während der Auslese eine Datenreduktion sowie eine Nullpunktssubtraktion (Pedestalsubtraktion) durch und kann ebenfalls Aufgaben der SlowControl wie Temperaturüberwachung u.ä. übernehmen. Die ausgelesenen Signale werden werden von schnellen Analog-Digital-Wandlern (FADC) mit einer Auflösung von 12 Bit digitalisiert. Das Modul reagiert direkt auf Triggersignale der Stufen 2 & 3 und kann über den VME-Bus per Interrupt[27] oder durch das Setzen von Statusbits im OnSiRoC-Statusregister mit dem Auslesesystem kommunizieren. Das ermöglicht schnelle Reaktionen des Systems während der Auslese und trägt zur Minimierung der Totzeit bei. Zur Beschleunigung der Auslese kann der OnSiRoC vier Ausleseketten mit jeweils bis zu 2048 Streifen parallel steuern und auslesen.

Der OnSiRoC ist im wesentlichen in vier funktionelle Blöcke aufgeteilt, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

4.3.1 Der Sequenzer

Der OnSiRoC stellt alle Signale bereit, die zur Steuerung des Systems Decoder/APC (s. Kapitel 4.2) notwendig sind. Um die Auslese flexibel den jeweiligen Bedürfnissen anzupassen, werden die Signale von einem programmierbaren Sequenzer gesteuert, der auch interne Funktionen des OnSiRoC kontrolliert und über den VME-Bus geladen werden kann. Ein Sequenzer-Kommando besteht aus 16 Steuerbits und einer 16-bit Adresse, die auf den nächsten Befehl zeigt. Die 16 Steuerbits kontrollieren folgende Funktionen:

- Vier Steuersignale für das FrontEnd (Decoder und APC): $\phi 1$, $\phi 2$, BIN, SR/$\overline{\mathrm{OUT}}$ (vgl. Kapitel 4.2.2, S. 35 sowie Abbildung 4.3, S. 33).
- Interne Ablaufsteuerung (Ende der Initialisierung und Ende der Auslese)
- Interne Zähler für Streifen und Pipelinebuffer
- Von außen zugängliche Kontrollsignale zu Testzwecken

[24]Bei H1 beträgt die Kabellänge zwischen FrontEnd und Ausleseelektronik typischerweise 50m.

[25]Da Detektoren aus SI-GaAs zum Betrieb eine deutlich höhere Spannung benötigt als Silizium (ça. 200V vgl. mit 40V), ist der OnSiRoC nicht in der Lage, einen GaAs-Detektor zu betreiben. Die Maximalleistung des OnSiRoC auf V_{Bias} beträgt etwa 1.4mW.

[26]Der VME-Bus ist eine genormte Schnittstelle, die sehr schnelle Datentransfers und ein flexibles Handshaking gestattet [51].

[27]Unterbrechungssignal für den Prozessor/Busmaster

- Ein zusätzliches (17.) Adressbit
- Steuerung der Sequenzergeschwindigkeit

Der Sequenzerspeicher faßt $2 * 64k$ Anweisungen, das entspricht bei 32 Bit pro Anweisung einer Größe von $512KB$. Um die Programmierung zu vereinfachen, wurde am DESY das Programm OSCA [40] entwickelt, das Befehle einer Metasprache übersetzt und die einfache Verwendung von Macros, Endlosschleifen und Wiederholungen ermöglicht und die Speicherverwaltung übernimmt. Das Sequenzerprogramm besteht aus mindestens zwei Teilen: Der erste initialisiert das FrontEnd und führt in einer Endlosschleife die Datennahme (*Sample Mode*) durch — die Pipeline läuft bis zum Eintreffen von L1KEEP. Zu diesem Zeitpunkt wird PiEn[28] inaktiv, und die Pipeline wird vom OnSiRoC durch Anhalten der Sequenzer-Clock gestoppt. Bei Eintreffen von L2KEEP wird der zweite Teil des Sequenzer-Programms gestartet, der zunächst eine eventuelle Prozessierung des analogen Signals auf dem APC durchführt, i.d.R. die Subtraktion zweier Buffer, und dieses Signal anschließend ausliest. Nach Beendigung dieses Programmteils wartet der OnSiRoC auf das Signal FClr vom zentralen Trigger[29]. Wird das Ereignis vom Trigger verworfen (L2REJECT), wird wieder der erste Teil des Sequenzercodes gestartet und das FrontEnd zurückgesetzt. Weitere Programme im Sequenzerspeicher können durch VME-Befehle gestartet werden.

4.3.2 Die analoge Pedestalsubtraktion

Das analoge Signal der APCs ist i.a. mit einem Offset behaftet, der mit der Streifennummer und der Position in der Pipeline variieren kann. Der OnSiRoC ist in der Lage, vor der Digitalisierung des Analogsignals diese sog. *Pedestals*[30] zu subtrahieren und so einen gemeinsamen Nullpunkt für alle Streifen zu gewährleisten. Andernfalls ist eine effiziente Treffererkennung nicht möglich. Die Pedestalkorrektur ist aufgeteilt in die Grobpedestals und Feinpedestals:

Grobpedestals Die grobe Pedestalkorrektur besteht aus vier 8-Bit-Werten, die jeweils für eine der vier Ausleseketten benutzt werden. Dieser 8-Bit-Wert wird von einem DA-Wandler in eine Spannung umgesetzt, die von den analogen Signalen der entsprechenden Auslesekette abgezogen wird. Ein Grobpedestalwert gilt also für 2048 Kanäle. Dabei entspricht ein LSB[31] im Grobpedestal 16 FADC-Kanälen, dieses Verhältnis kann jedoch durch die Ände-

[28] **Pi**peline **En**able ist ein Signal vom Central Trigger. Nur wenn es aktiv ist, laufen die Pipelines der FrontEnds und nehmen Daten.

[29] Im StandAlone-Betrieb werden statt FClr und L2KEEP die Signale CosmicPreStart (VME) bzw. CosmicStop (FrontPanel-LEMO) benutzt.

[30] Für nähere Erläuterungen zum Begriff *Pedestal* s. Kapitel 5.3.

[31] **L**east **S**ignificant **B**it, kleinste Einheit eines DA/AD-Wandlers. Oft auch als *Kanal* bezeichnet (z.B. ein FADC-Kanal).

rung eines Widerstandsverhältnisses auf der OnSiRoC-Platine geändert werden.

Feinpedestal Die Feinpedestals erlauben eine individuelle Korrektur für jeden Streifen und jeden Pipelinebuffer. Die Auflösung beträgt ebenfalls 8 Bit, allerdings entspricht hier ein LSB des Digital-Analog-Wandlers i.d.R. einem FADC-Kanal. Auch hier läßt sich das Verhältnis durch das Auswechseln von Widerständen beeinflussen. Die Pedestals werden vor der Datennahme in Runs ohne Detektorsignal ermittelt und sollten während der Datennahme laufend aktualisiert werden. Da für jeden Streifen 32 × 8 Bit benötigt werden, belegt die Pedestalinformation $2048 \times 32 \times 4Byte = 256KB$.

4.3.3 Der Treffer- und Clusterdetektor

Um zu einem möglichst frühen Zeitpunkt eine Datenreduktion zu gewährleisten, werden die Rohdaten unmittelbar nach der Digitalisierung mit einstellbaren Schwellwerten verglichen. Ist die Schwelle überschritten, wird die Streifennummer des Treffers im Trefferspeicher abgelegt. Werden Treffer auf benachbarten Streifen gefunden, so wird ein Clusterzähler erhöht; bei Überschreiten eines einstellbaren Grenzwertes wird dieser Cluster in einem separaten Speicher abgelegt. Durch das Auslesen der Treffer- bzw. Clusteradressen und gezieltes Auslesen der zugehörigen Rohdaten können das Datenvolumen und damit die Auslesezeit deutlich verringert werden.

4.3.4 Die Spannungsversorgungen

Der OnSiRoC stellt neben den für die Bedienung des FrontEnd nötigen Signalen auch die nötigen Spannungsversorgungen bereit, die für jede Kette separat vorhanden sind. Dies ermöglicht eine unabhängige Versorgung der einzelnen Ketten und verringert so die Folgen eines Ausfalls einer einzelnen Spannungsquelle. Für jede Kette stehen folgende Spannungen zur Verfügung:

V_{Bias} Sperrspannung für den Detektor (0–110 V, regelbar über VME-Register). Diese Spannung ist für Detektoren aus SI-GaAs nicht ausreichend, da sie bei typisch 200V betrieben werden.

V_{Ana} Versorgungsspannung für den Eingangsverstärker des APC (5–10 V, regelbar über Potentiometer auf der OnSiRoC-Platine)

V_{Dig} Versorgungsspannung für den Ausgangsverstärker des APC und die Schieberegister (5–10 V, regelbar über Potentiometer auf der OnSiRoC-Platine)

Alle Spannungsversorgungen sind geglättet und schalten bei einer Überlastung (1.9 W) selbständig ab. Der Zustand der Spannungsversorgungen V_{Ana} und V_{Dig} ist für jede Auslesekette über ein entsprechendes Bit im Statusregister abfragbar.

4.4 Software

Im Rahmen dieser Arbeit wurden bei Tests des Auslesesystems Daten mit dem OnSiRoC genommen (vgl. Kapitel 5) und aufgezeichnet. Für diese Aufgaben standen bisher die Programme `SiTest` [38, Kap. 5] , `SiRun` [37] und `Zaradann` [35] auf Macintosh Computern zur Verfügung. Um den Umgang mit dem Auslesesytem im StandAlone-Betrieb zu vereinfachen, wurde während dieser Arbeit das Programm `OnSiRoCRun` (Kapitel 4.4.1) entwickelt. Die Auswertung erfolgte mit dem Analyseprogramm PAW des europäischen Kernforschungszentrums CERN. Diese Software kann das von `SiRun` und `OnSiRoCRun` benutzte Format für Rohdaten nicht lesen; deshlab musste zusätzlich das Programm `si2rz` (s. Kapitel 4.4.4) entwickelt werden.

4.4.1 Das Programm `OnSiRoCRun`

Zur Ansteuerung des OnSiRoC und zur Datennahme wurde auf einem Apple Macintosh Rechner[32] eine neue Software entwickelt, die eine grafische Oberfläche[33] zur Verfügung stellt, mit der alle Aufgaben von der Initialisierung des OnSiRoC über das Laden von Sequenzercode und Pedestalinformation bis zur Auslese des OnSiRoC und der Datenspeicherung bequem und flexibel erledigt werden können. Als Entwicklungsumgebung wurde das Programmpaket LabVIEW^R [6] benutzt. LabVIEW^R ist eine grafisch orientierte Programmiersprache, deren Sprachelemente grafische Symbole sind, die bestimmte Funktionen repräsentieren. Der Datenfluß wird durch Verbinden der Symbole mit "Drähten" geregelt. Abbildung 4.6 zeigt einen Ausschnitt aus einem LabVIEW^R-Programm. LabVIEW^R bietet neben den vorhandenen Symbolen die Möglichkeit, Programme, die in anderen Programmiersprachen geschrieben wurden, über einen sog. *Code Interface Node* (CIN) einzubinden. Dies empfiehlt sich besonders für die Bearbeitung umfangreicher Datenmengen, da durch die bequeme Art der Programmierung in LabVIEW^R z.T. erhebliche Geschwindigkeitseinbußen entstehen.

Für die Bedienung des OnSiRoC existierte am DESY bereits eine umfangreiche Funktionsbibliothek [38, Kap. 4], die folgende Bereiche abdeckt:

- Initialisierung
- Setzen der wichtigsten Register
- Statusabfrage
- Laden & Prüfen der Inhalte von Sequenzer- und Pedestalspeicher
- Auslese der OnSiRoC-Daten in verschiedenen Formaten

[32] Die Software wurde entwickelt und getestet auf Rechnern der Serien II und Quadra.
[33] Diese wird auch als Bedienkonsole oder engl.: *FrontPanel* bezeichnet.

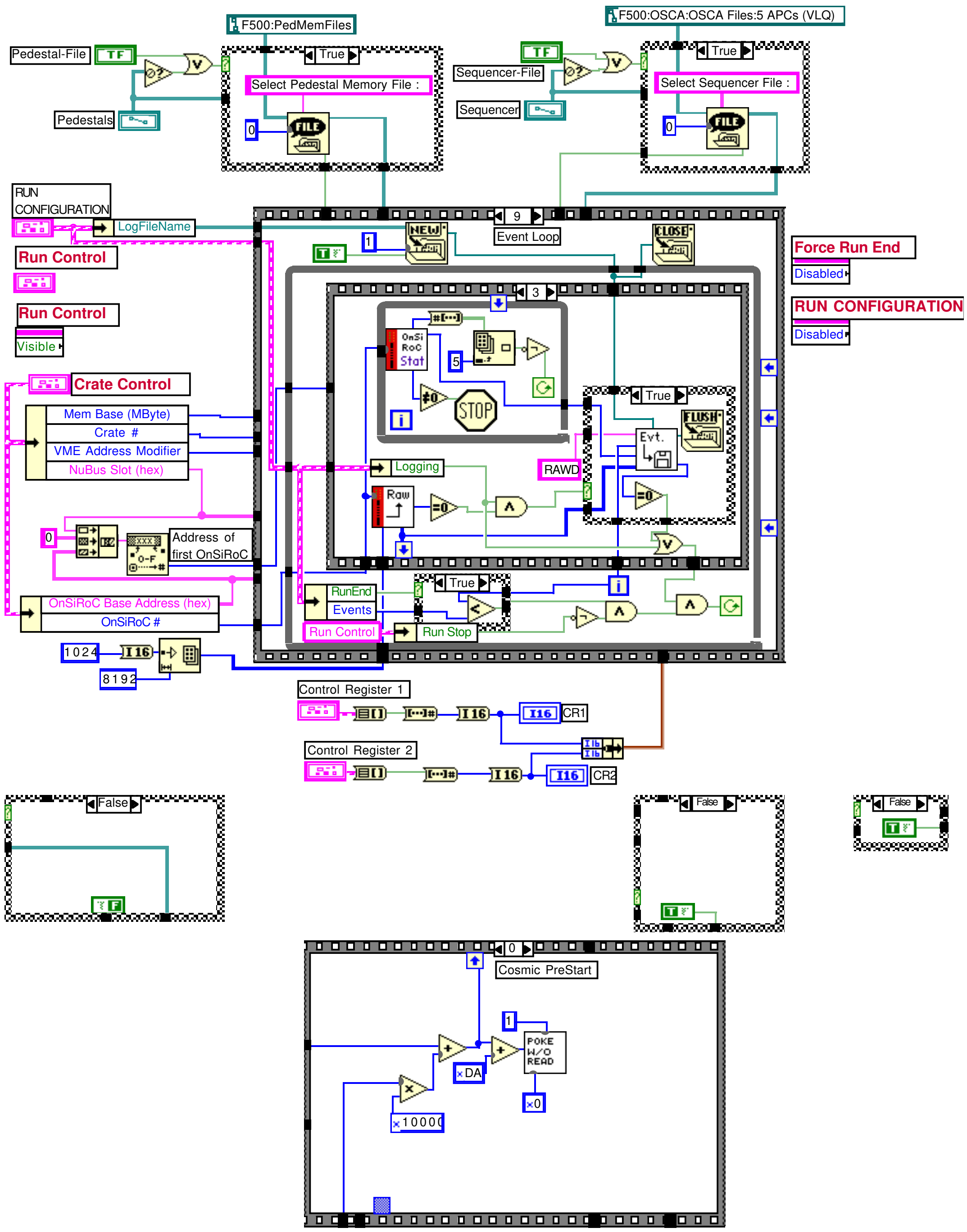

Abbildung 4.6: Ausschnitt aus dem LabVIEW^R-Programm *OnSiRoCRun*. Variablen bzw. Eingabeparameter (links oben im Bild, z.B. *Pedestal*) werden von Sub-VIs (z.B. *OnSiRoCStat*) verarbeitet. Der Datenfluß wird durch Drähte geregelt, wobei der Datentyp durch Farbe und Dicke des Drahtes repräsentiert wird.

- Test von Sequenzer- und Pedestalspeicher

Diese Bibliothek wurde über ein in C programmiertes Interface per CIN in die LabVIEW^R-Umgebung eingebunden (s. Abschnitt 4.4.3). Durch diese Einbindung vorcompilierten Codes wurde insbesondere beim Laden von Sequenzer- und Pedestalspeicher sowie bei der Auslese des OnSiRoC ein erheblicher Geschwindigkeitsvorteil erzielt.

Die grafische Oberfläche erlaubt eine einfache Bedienung des implementierten Datennahmesystems für den StandAlone-Betrieb, sie ist in den Abbildung 4.7 und 4.8 dargestellt. Sie bietet die folgenden Möglichkeiten:

- Initialisierung des OnSiRoC
  Das Programm initialisiert zunächst das VME-Interface (s. Kapitel 4.4.2) und den OnSiRoC. Letzteres wird von einer entsprechenden Funktion der SiMacLib ausgeführt.

- Setzen der Kontrollregister
  Auf dem FrontPanel ist jedes Bit der beiden OnSiRoC-Kontrollregister mit Namen aufgeführt und einzeln schaltbar. Die Kontrollregister werden beim Start mit den vom Benutzer eingestellten Werten geschrieben.

- Laden des Sequenzers und der Pedestalspeicher
  Anschliessend werden der Pedestalspeicher und das Sequenzerprogramm geladen. Beide werden nach dem Laden überprüft, um Fehler bei der Übertragung der jeweils 256 KB großen Blöcke auszuschließen. Sollten beim Schreiben oder Lesen Fehler auftreten, werden diese durch Warnsymbole mit dem entsprechenden Fehlercode angezeigt, und das Programm wird angehalten.
  Für die Auswahl der entsprechenden Dateien sind zwei Modi implementiert:

  - Default-Files
    Der Benutzer kann auf dem FrontPanel sowohl für das Pedestal-File als auch für das Sequenzer-Programm Standardangaben (*defaults*) machen, die automatisch geladen werden, wenn der Auswahlmodus nicht vor dem Programmstart geändert wurde.

  - Auswahl über File-Requester
    Stellt der Benutzer vor dem Start des Programms den Auswahlmodus um, so kann er über eine sog. *File-Requester* selbst eine Datei auswählen.

  Der Auswahlmodus ist für Sequenzer und Pedestalspeicher getrennt einstellbar.

- StandAlone-Betrieb
  Das Programm ist für den StandAlone-Betrieb eines einzelnen OnSiRoC

ausgelegt. Dies war für die Tests im Rahmen dieser Arbeit völlig ausreichend, da nur einzelne Hybriden untersucht wurden, der OnSiRoC mit dem verwendeten Aufbau (s. Kapitel 5.1) aber bis zu 8 Hybriden steuern und auslesen kann.

- Run-Ende manuell oder nach vorgegebener Ereignisanzahl
  Das Beenden eines laufenden Runs ist auf zwei Arten möglich: Der Run kann sich nach einer voreingestellten Anzahl von Ereignissen selbst beenden oder auf einen Befehl des Benutzers warten.

- Online-Eventdisplay
  Die Rohdaten einer Auslesekette können nach der Auslese des OnSiRoC sofort auf einem Online-Display dargestellt werden. Dies ermöglicht ein schnelles Erkennen eventueller Funktions- oder Auslesefehler. Die Größe des Displays ist variabel und kann einfach den jeweiligen Bedürfnissen angepaßt werden. Wenn das Display nicht benötigt wird, kann es zur Beschleunigung der Auslese abgeschaltet werden.

- Wahlweises Abspeichern (Logging) der Rundaten
  Während eines Runs können die Daten wahlweise im Si-Rohdatenformat [26, Appendix I] in eine vom Benutzer angegebenes Datei abgespeichert werden.

- Freie Wahl der VME-Adressen
  Auf dem FrontPanel sind alle zur VME-Adressierung nötigen Parameter wie die Nummer des VME-Crates, die Basisadresse des OnSiRoC und die OnSiRoC-Nummer[34] frei einstellbar, so daß ohne Änderung einer bestehenden Hardware-Konfiguration mit jedem beliebigen OnSiRoC gearbeitet werden kann.

4.4.2 Das VME-Interface

Um vom Ausleserechner auf den OnSiRoC zugreifen zu können, wird eine Verbindung vom Macintosh zum VME-Crate benötigt. Hier hat sich bei H1 die Kombination aus den Interfacekarten MacVEE [48] und Micron [47] durchgesetzt.

Die MacVEE-Karte stellt die Verbindung zwischen dem VME-Crate und dem *Vertical Bus* (VMV, [43]) dar. Sie arbeitet als VME-Master und VMV-Slave und setzt die Buszyklen von VME und VMV ineinander um. Auf der anderen Seite des VMV-Busses befindet sich der Ausleserechner mit der Micron-Karte, die als VMV-Master und NuBus-Slave arbeitet. Sie übersetzt VMV-Zyklen in NuBus-Zyklen und umgekehrt. Durch diese Kombination kann der Speicherbereich des

[34] Die OnSiRoC-Nummer bestimmt per Konvention die Adresse des OnSiRoC mit.

Abbildung 4.7: Das FrontPanel der Steuersoftware. In diesem Abschnitt befindet sich das Online-Display. Man erkennt darauf die Grenzen zwischen den APCs als Stufen, und rechts das Ende der Auslese als Plateau.

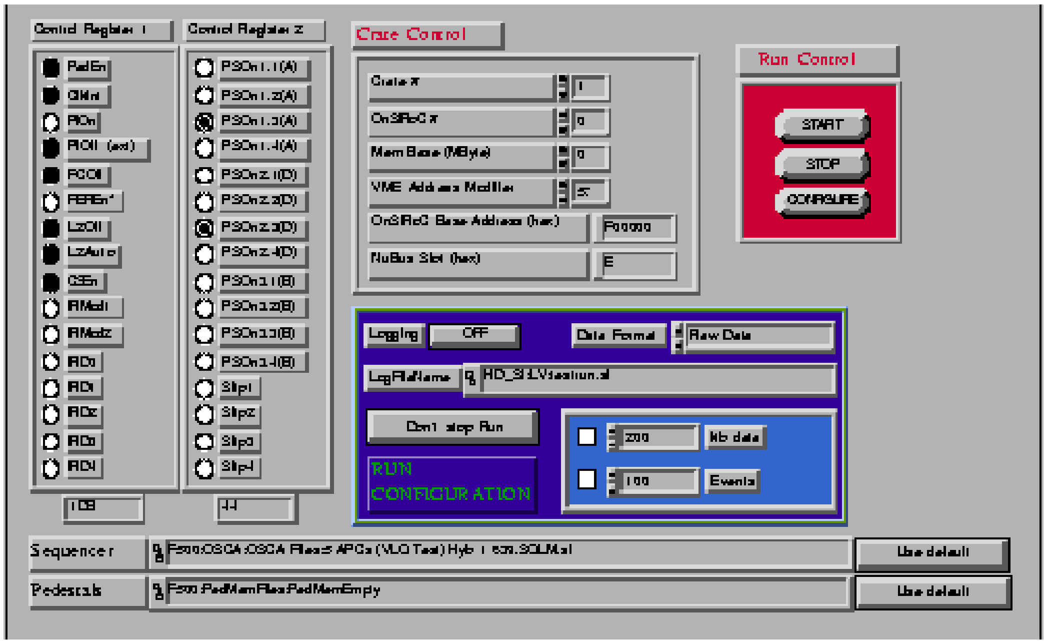

Abbildung 4.8: Das FrontPanel der Steuersoftware. In diesem Teil befinden sich die Schaltflächen für die Kontrollregister des OnSiRoC, die Auswahl von Sequenzercode und Pedestalfile.

VME-Crate in den Adressraum des Macintosh abgebildet werden, das bedeutet, daß Adressen im VME-Crate als Adressen im Rechner erscheinen. Dadurch ist ein direkter und unkomplizierter Zugriff ohne spezielle Treibersoftware möglich. Ähnlich funktioniert die Kombination aus MAC7212 [44] und VIC8212 [43] der Firma CES[35], die inzwischen als Nachfolgemodell ebenfalls bei H1 eingesetzt wird.

Für beide Systeme existieren VIs innerhalb einer Bibliothek [46], die Initialisierung, *MemoryMapping* und Adresskodierung[36] übernehmen. Damit ist eine unkomplizierte Umstellung der Software von einer Interface-Kombination auf die andere möglich. Die Software existiert jeweils in einer Version für das Micron/MacVEE-Interface und für die Kombination von MAC7212 und VIC8212.

4.4.3 Implementierung der Funktionsbibliothek SiMacLib

Die SiMacLib [38, Kap.4] enthält alle Funktionen, die für den Betrieb des OnSiRoC in der Auslese benötigt werden. Diese Bibliothek lag als vorcompilierter Object-Code vor, der von LabVIEW^R nicht ohne weiteres benutzt werden kann. Für die Einbindung dieses Codes über einen CIN gab es zwei Möglichkeiten:

1. Man erstellt für jede Funktion der Bibliothek ein VI[37], das einen CIN enthält. Dieser CIN enthält ein C-Programm, das diese Funktion in der Bibliothek aufruft.
   Vorteile: Direkter Aufruf von C-Code und damit schnell; wenig C-Code, in dem nur der Name der aufzurufenden Funktion geändert werden muß.
   Nachteile: Die VIs werden groß, weil jedes eine komplette Kopie der Bibliothek enthält, obwohl nur eine Funktion gebraucht wird; die VIs besitzen unabhängige Datensegmente, dadurch ist die Basisadresse des OnSiRoC unbekannt — sie wird durch die Bibliotheksfunktion `SetOnSiRoCBaseAddress` einmalig gesetzt und ist damit nur den Funktionen bekannt, die das gleiche Datensegment wie `SetOnSiRoCBaseAddress` besitzen, also keiner anderen.

2. Man erstellt ein VI mit einem CIN, der ein C-Programm aufruft, das die gesamte Bibliothek enthält und einzelne Funktionen mittels eines Übergabeparameters (z.B. einer Zahl) auswählt.
   Vorteile: Alle Funktionen teilen das gleiche Datensegment, die Basisadresse des OnSiRoC ist bekannt, solange sich das VI im Speicher befindet, und die Bibliothek wird nur einmal geladen.

[35]Creative Electronic Systems S.A., Route du Pont-Butin 70, CH-1213 Petit-Lancy 1, Genf, Schweiz

[36]Die MAC7212 kann den Speicher in Blöcken von 1 MB jeweils einem entsprechenden Block in einem beliebigen Crate zuorden. Die VIs ermöglichen die Adressierung über die Crate-Nummer.

[37]Ein *Virtual Instrument* (VI) entspricht einem Unterprogramm bzw. einer Funktion in anderen Programmiersprachen.

Nachteil: Der Aufruf von Funktionen wird umständlich, weil die Funktion nicht mehr durch ihren Namen, sondern durch eine Zahl repräsentiert wird und weil die Argumente ebenfalls nur noch allgemeine Namen haben können.

Die erste Möglichkeit muß wegen der Trennung der Datensegmente verworfen werden. Um den Nachteil der zweiten Lösung zu beheben, wurde für jede Funktion ein Ober-VI erstellt, das das Bibliotheks-VI mit dem entsprechenden Zahlencode aufruft und die Parameter korrekt übergibt. In diesem Ober-VI haben die Parameter wieder ihre ursprünglichen, aussagekräftigen Namen.

Das Bibliotheks-VI und die Ober-VIs sind mit Hilfe-Texten in der VI-Bibliothek `simaclib.llb` zusammengefaßt.

4.4.4 Das Konvertierungsprogramm `si2rz`

Die Auswertung der Daten erfolgt mit dem Analysepaket PAW [10]. Dazu müssen die Daten als Ntuple[38] vorliegen. Um die Konvertierung von Rohdaten in Ntuple vorzunehmen, wurde das Programm `si2rz` geschrieben. Aus jedem Kanal können beliebige Anzahlen von APC-Streifendaten in das Ntuple übertragen werden, zusätzlich wird für jeden APC[39] der *common mode*[40] berechnet und mit anderen ereignisspezifischen Daten wie Ereignisnummer und Pipelinezähler abgelegt. Um mehrdimensionale Felder im Ntuple zu vermeiden, wird für jeden OnSiRoC-Kanal ein eigenes „Event“ geschrieben. Der Aufbau eines Events ist in Tabelle 4.4 gezeigt.

[38] Ein Ntuple ist ein Datenobjekt, das Sätze von Variablen (Ereignisdaten) über viele Ereignisse (Events) enthält.

[39] Ein APC entspricht einem Block von 128 aufeinanderfolgenden Streifen.

[40] Als *common mode* bezeichnet man globale Schwankungen der Nullage, s. Kapitel 5.3, S. 58.

Variable	Typ	Wertebereich	Erläuterung
evttyp	CHAR	4 Zeichen	Ereignistyp
evtnum	INT	unbeschränkt	Ereignisnummer
pic	INT	0–31	Pipeline Zähler
chnum	INT	1–4	OnSiRoC Kanalnummer
fstr	INT	0–2048	Nummer des ersten Streifens
lstr	INT	0–2048	Nummer des letzten Streifens
numstr	INT	0–2048	Anzahl der Streifen
numapc	INT	0–16	Anzahl der APCs (aufgerundet)
cmod	REAL	unbeschränkt	Common Mode (alle Streifen)
commod(numapc)	REAL	unbeschränkt	Common Mode (einzelner APC)
dat(numstr)	INT	-2–4095	Streifendaten

Tabelle 4.4: Aufbau des Ntuples für OnSiRoC-Daten.

Kapitel 5

Test der Ausleseelektronik

Bei Abschluß der Messungen zu dieser Arbeit standen leider die GaAs-Detektoren für den VLQ noch nicht zur Verfügung. Die Auslese wurde deshalb mit einem Silizium-Detektor aus der CST-Serie aufgebaut und getestet.

5.1 Der Aufbau

Der Meßaufbau besteht aus einem doppelseitigen Si-Detektor mit 640 Streifen auf der p-Seite, die an den VLQ-Hybriden[1] gebondet ist. Die n-Seite wurde nicht benutzt. Detektor und Hybrid befinden sich in einer Aluminium-Box (s. Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2), die beide vor Licht schützen und gegen elektromagnetische Einflüsse abschirmen soll. Außerhalb der Box befindet sich der Repeater, der die Verbindung zum OnSiRoC herstellt. Der Hybrid ist über ein 24-poliges Kaptonkabel von etwa 45 cm Länge mit dem Repeater verbunden; die Verbindung zum OnSiRoC stellen ein 20-poliges und ein 50-poliges Kabel von jeweils 30 m Länge her. Der OnSiRoC wird im StandAlone-Modus betrieben und befindet sich in einem VME-Crate, das von einem Apple Macintosh Quadra 650 mit Micron-Karte [47] über eine MacVEE-Karte [48] gesteuert wird. Die Auslese des OnSiRoC erfolgt ebenfalls über den Quadra 650; als Auslesesoftware wurde das Programm `OnSiRoCRun` (s. Kapitel 4.4) benutzt. Der Hybrid wird vom OnSiRoC mit der Spannung V_{Ana} versorgt, der Repeater erzeugt aus der ebenfalls vom OnSiRoC kommenden V_{Dig} die Spannungen V_{D+} und V_{D-} für den Hybriden. Die Sperrspannung von 50 V für den Detektor liefert ein externes Netzteil, da eine Kontrolle des Dunkelstromes mit dem OnSiRoC nicht möglich ist.

Das benötigte Triggersignal wurde für die Tests ohne bzw. mit Detektor auf unterschiedliche Arten gewonnen. Für die Tests ohne Detektor war ein einfacher Zufallstrigger ausreichend. Der Aufbau ist in Abbildung 5.3 zu sehen: Die

[1]Bei den Testmessungen kamen zwei Hybriden zum Einsatz. Die Messungen ohne Detektor wurden mit dem Hybriden #1 durchgeführt, der aus einer Vorserie stammt. Der Detektor wurde an den Serien-Hybriden #24 gebondet.

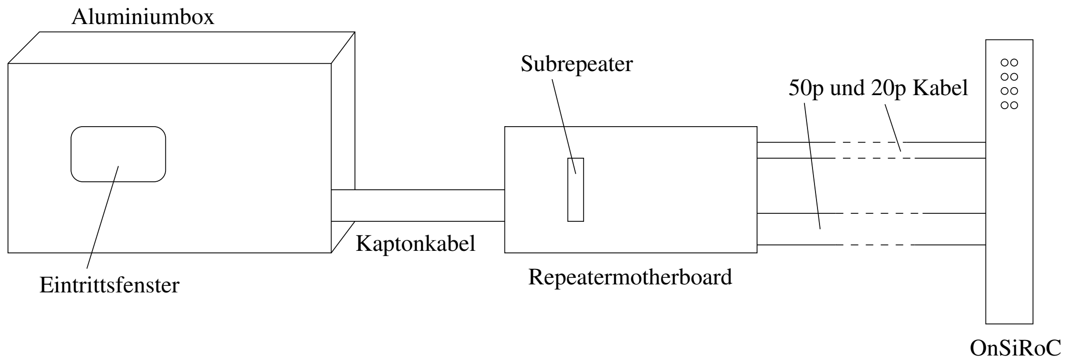

Abbildung 5.1: Skizze des Meßaufbaus. Detektor und Hybrid befinden sich in einer Aluminiumbox; das Kaptonkabel wird seitlich zum Repeaterboard weggeführt. Von dort führen ein 50poliges und ein 20poliges Kabel zum OnSiRoC.

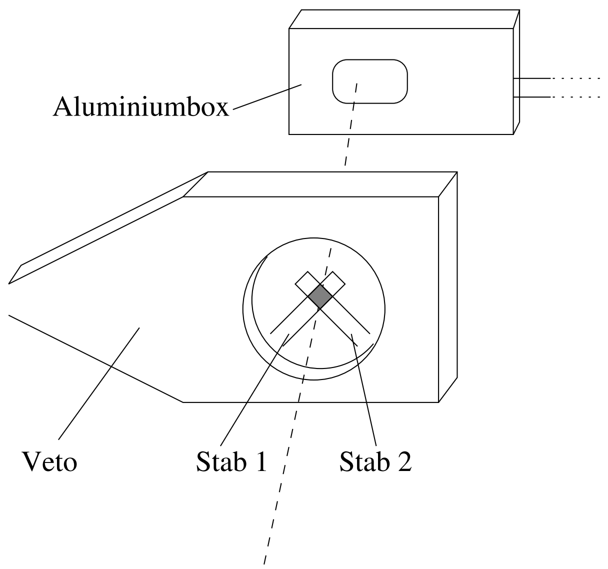

Abbildung 5.2: Der Aufbau im Teststrahl. Im Vordergrund die Szintillatoren, im Hintergrund der Detektor in der Aluminiumbox (s.a. Abbildung 5.1). Der Detektor wurde bei Ansprechen beider Stäbe (schattierter Bereich) und Ausbleiben eines Signals vom Veto-Szintillator ausgelesen.

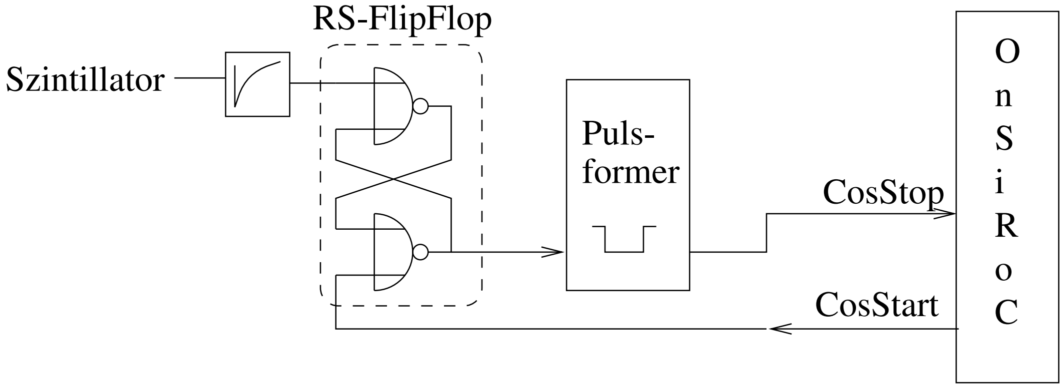

Abbildung 5.3: Schema der Triggerlogik für den Testbetrieb ohne Detektor

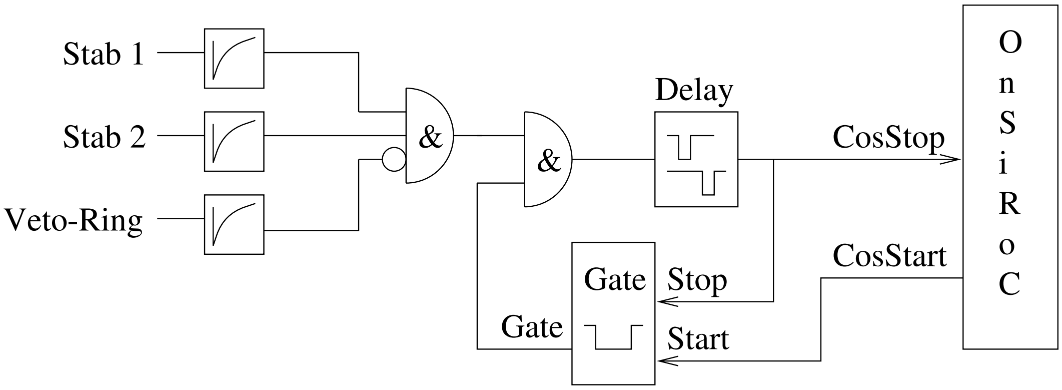

Abbildung 5.4: Schema der Triggerlogik für den StandAlone-Betrieb mit Detektor

Zerfallselektronen eines ^{90}Sr-Präparates werden von einem Szintillator mit Photomultiplier registriert und das Signal in ein RS-FlipFlop geleitet. Das FlipFlop kann nur dann gesetzt werden, wenn der OnSiRoC es zuvor mit dem Signal *CosStart* freigegeben hat und für die Datennahme bereit ist. Nach einem Signal vom Szintillator ist das FlipFlop bis zum nächsten *CosStart* gesperrt und kann kein Triggersignal für den OnSiRoC (*CosStop*) generieren. Da kein Zusammenhang zwischen den Testpulsen auf dem Hybriden und dem Signal des Szintillators besteht, ist das Zeitverhalten der Triggerlogik ohne Bedeutung.

Anders verhält es sich bei Messungen im Teststrahl. Der Elektronenstrahl passiert zunächst eine Anordnung von Szintillatoren, die aus zwei gekreuzten Stäben und einem Vetoring besteht (s. Abbildung 5.2). Die beiden Stäbe definieren einen Ausschnitt aus dem Strahl, der Vetoring soll Schauer aus dem Strahl und Teilchen, die nicht aus dem Strahl stammen, unterdrücken. Da hier ein Zusammenhang zwischen den Triggersignalen und dem Ereignis besteht, ist das Zeitverhalten der Triggerlogik ein kritischer Faktor, deshalb unterscheiden sich die Trigger deutlich (s. Abbildung 5.4). Zunächst wird eine Koinzidenz von den beiden Szintillatorstäben gefordert, bei gleichzeitigem Ausbleiben des Veto-

Last	Zustand	Strom [mA]	V_{Dig}[V]	Leistung [mW]
Subrepeater geregelt	—	31	6.5	205
Subrepeater + Hybrid	Auslese	90	6.5	585
Subrepeater + Hybrid	gestoppt	130	6.5	845
Hybrid	Auslese	59	6.5	384
Hybrid	gestoppt	99	6.5	644

Tabelle 5.1: Typische Werte für die Stromaufnahme des FrontEnd auf V_{Dig}. Die Werte für den Hybriden alleine wurden aus den übrigen Werten berechnet.

Signals. Zusätzlich mußte ein Gate vom OnSiRoC durch *CosStart* gesetzt sein. Das hieraus gewonnene Signal wurde um einige Taktzyklen[2] verzögert[3] und anschließend als Triggersignal *CosStop* an den OnSiRoC weitergegeben.

Der Unterschied zwischen diesen Aufbauten und Triggerlogiken spiegelt sich auch im Sequenzercode wieder, denn im Kalibrationsbetrieb wird die Pipeline an einer festen Stelle ausgelesen, was beim Betrieb im Teststrahl natürlich nicht der Fall ist.

5.2 Funktionstest des Hybriden

Die ersten Schritte beim Test der Auslese waren der Anschluß des neuen Hybriden an den Repeater und den OnSiRoC und ein einfacher Funktionstest. Da der Repeater und der OnSiRoC bereits beim CST und BST eingesetzt werden und ihr Verhalten gut bekannt ist, gestaltete sich die Integration des VLQ-Hybriden relativ unproblematisch. Der Hybrid und die Auslese wurden mit Testpulsen auf Funktion überprüft.

Stromaufnahme des Hybriden

Einer der ersten Parameter, die beim neuen Hybriden bestimmt werden müssen, ist die Stromaufnahme. Sie ist mit der Verlustleistung des Hybriden und damit mit der Wärmeentwicklung verknüpft. Außerdem ist die Leistung der Spannungsversorgungen des OnSiRoC begrenzt, die jedoch in der Lage sein müssen, im endgültigen Aufbau des VLQ-Detektors je zwei Hybriden zu versorgen. Tab. 5.1 zeigt die typischen Werte für die Belastung auf V_{Dig}, mit der alle Bauelemente auf dem Hybriden betrieben werden. Allein die APCs benötigen V_{Ana}.

[2] 'Taktzyklen' bezieht sich auf den Takt, mit dem die Pipeline betrieben wird (in diesem Fall 3.3 MHz).

[3] Die Verzögerung ist notwendig, damit die Pipeline nicht im selben Pipelinebuffer stoppt, in dem das Signal gespeichert ist, vgl. Kapitel 4.1.

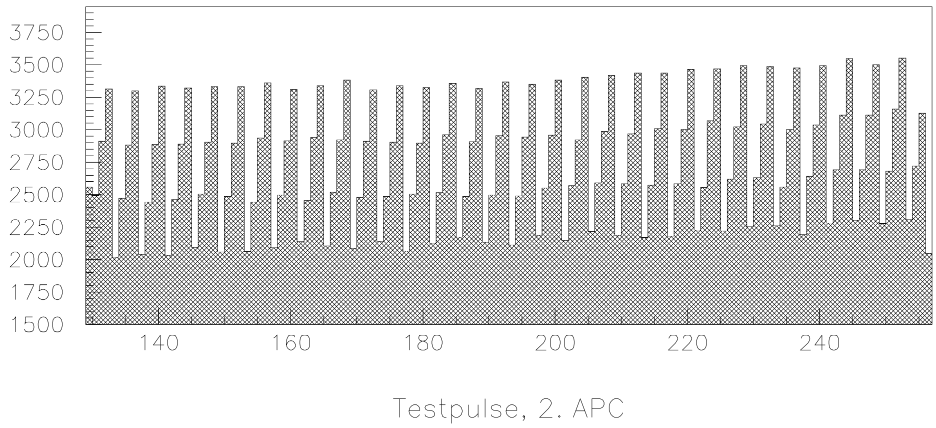

Abbildung 5.5: Auslese von Testpulsen mit dem VLQ-Hybrid #1. Man erkennt die charakteristische Stufenform.

Mit den ermittelten Werten erwartet man eine Belastung des OnSiRoC von höchstens 1493 mW, das System liegt damit um 400 mW unter der Leistungsgrenze des OnSiRoC.

Betrieb mit Testpulsen

Der Decoderchip ist in der Lage, an jeder beliebigen Stelle der Pipeline einen Testpuls einzukoppeln (s. auch Abschnitt 4.2.2). Diese Testpulse erzeugen wegen der gestaffelten Testkapazitäten in der seriellen Auslese eine charakteristische Formation von vier Stufen, die auf einem Oszilloskop oder im Online-Display gut zu erkennen sind. Da die Testpulse im APC den gleichen Weg gehen wie die Signale eines angeschlossenen Detektors (vgl. Abb. 4.2), beweisen sie die korrekte Funktion und Ansteuerung des APC sowie der zwischengeschalteten Verstärker. Da die Steuersignale sowie die Testpulse selbst vom Decoder erzeugt werden, beweisen die Testpulse ebenfalls das Funktionieren des Decoders.

Das Sequenzerprogramm[4] muß wegen der fixen Position des Testpulses in der Pipeline so abgeändert werden, daß es statt einer **relativen** Pipelineposition eine **absolute** ausliest.

Die Testpulse sind in Abb. 5.5 zu sehen. Die Höhe pro Stufe beträgt etwa 400 FADC-Kanäle, was mit früheren Beobachtungen [42] gut übereinstimmt, das Auslesesignal entspricht den Erwartungen. Damit ist gezeigt, daß alle Elemente des FrontEnd funktionstüchtig sind.

[4] Alle in dieser Arbeit benutzten Sequenzerprogramme basieren auf dem bei H1 eingesetzten CST-Code.

5.3 Rauschmessungen

Eine wichtige Größe beim Aufbau eines Detektorsystems ist das Rauschen der gesamten Anordnung. Das Rauschen addiert sich zu dem eigentlichen Signal und ist bei der Auslese nicht mehr von diesem zu trennen. Dadurch wird die Signalhöhe „verschmiert“, d.h. eine vorgegeben Signalhöhe erscheint bei wiederholter Auslese als fluktuierende Größe. Ist das Rauschen von der gleichen Größenordnung wie das Signal, so können beide nicht mehr unterschieden werden, und das Signal geht im Rauschen unter. Um das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen zu charakterisieren, definiert man das *Signal-zu-Rausch-Verhältnis* (S/N)[5] als Quotient aus den entsprechenden Amplituden. Man unterscheidet gewöhnlich drei Arten von Rauschen (vgl. [32]):

Schrotrauschen Ein Strom besteht aus einer Menge von Elektronen, deren zeitliche Aufeinanderfolge unkorreliert ist. Die Verteilung gehorcht der Poissonstatistik, ihre Varianz ist

$$\overline{i^2} = 2e \langle i \rangle \Delta f$$

mit der Elementarladung e, dem zeitlichen Mittelwert des Stromes $\langle i \rangle$ und der Frequenzbandbreite Δf. Das Schrotrauschen ist weiß, die Amplitudenverteilung ist gaußförmig.

thermisches Rauschen Durch thermische Bewegung von Elektronen in einem Widerstand entsteht weiteres Rauschen. Da die thermischen Geschwindigkeiten der Elektronen grösser sind als ihre typischen Driftgeschwindigkeiten, ist das thermische Rauschen unabhängig vom Strom. Die Varianz ergibt sich zu

$$\overline{i^2} = 4k\frac{T}{R}\Delta f$$

mit der Boltzmannkonstante k, der absoluten Temperatur T und dem Widerstand R. Das thermische Rauschen ist ebenfalls weiss und gaußförmig verteilt.

$1/f$-Rauschen Das $1/f$-Rauschen tritt nur im Zusammenhang mit einem Strom I auf. Seine Varianz gehorcht der empirischen Formel

$$\overline{i^2} = K_1\frac{I^a}{f^b}\Delta f,$$

wobei K_1 eine Konstante der betrachteten Anordnung ist, a eine Konstante zwischen 0.5 und 2, b eine Konstante nahe 1, und Δf eine kleine Bandbreite um f.

[5] engl.: **S**ignal to **N**oise Ratio

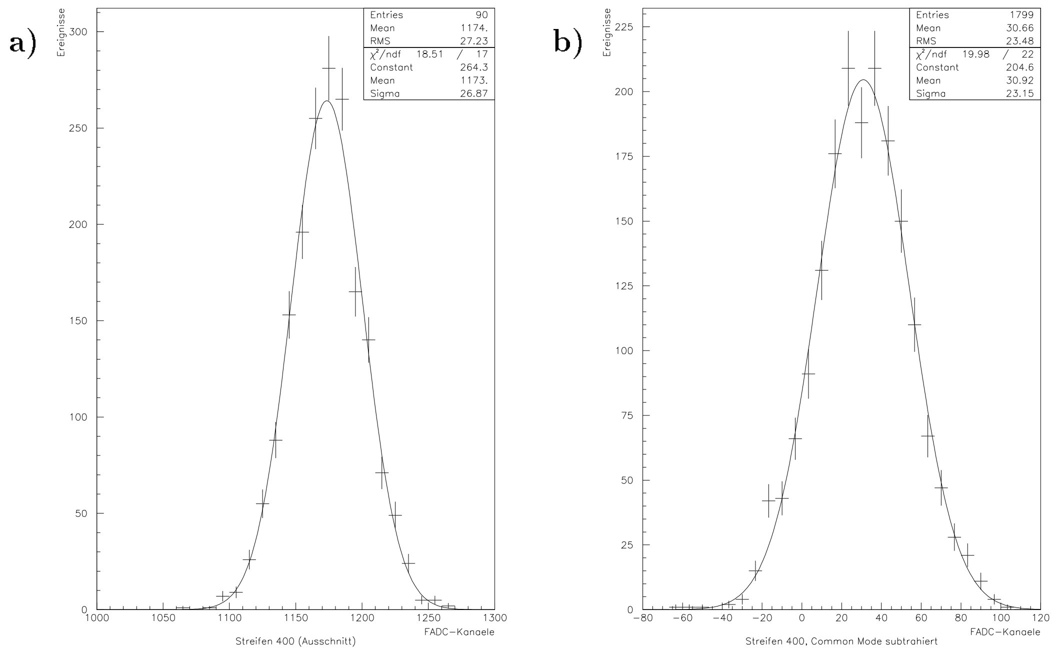

Abbildung 5.6: Rauschen eines Streifens (Nr. 400) mit Anpassung an eine Gauß-Kurve a) vor und b) nach der Subtraktion des *Common Mode*.

Diese verschiedenen Arten des Rauschens werden in dieser Arbeit nicht unterschieden und deswegen auch nicht näher erläutert.

Die Nullage eines Signals wird gewöhnlich als *Pedestal* bezeichnet. Dieser Nullage ist das Rauschen überlagert, das gewöhnlich (s.o.) gaußförmig verteilt ist. Der Mittelwert dieser Verteilung entspricht der Nullage, ihre Breite, die Standardabweichung σ, bezeichnet man auch als *Breite des Pedestals*. Diese Breite ist ein wesentliches Merkmal der Verteilung, weshalb man das Rauschen damit beschreibt. Man definiert σ als die Rauschamplitude und charakterisiert ein Signal P durch sein Signal/Rausch-Verhältnis P/σ.

Da die Größe σ später als Kriterium zur Trefferidentifikation herangezogen wird[6], muß überprüft werden, ob das Rauschen dieser Verteilung gehorcht und der Begriff der Standardabweichung sinnvoll anzuwenden ist. In Abbildung 5.6 ist die Anpassung[7] einer Gaußkurve an die Daten einer Rauschmessung mit Detektor dargestellt, sowohl vor als auch nach der Subtraktion des *common mode* (s. nächster Absatz). Offensichtlich wird das Rauschen der Auslese mit Detektor gut durch eine Gaußfunktion beschrieben, und die Beschreibung des Rauschens durch die Grösse σ ist sinnvoll.

[6]Um als Treffer erkannt zu werden, muß ein Signal deutlich grösser sein als die Breite des Pedestals, da sonst das Rauschen irrtümlich als Treffer identifiziert wird.

[7]Die Anpassungen in dieser Arbeit wurden mit dem MINUIT-Paket [21] vorgenommen.

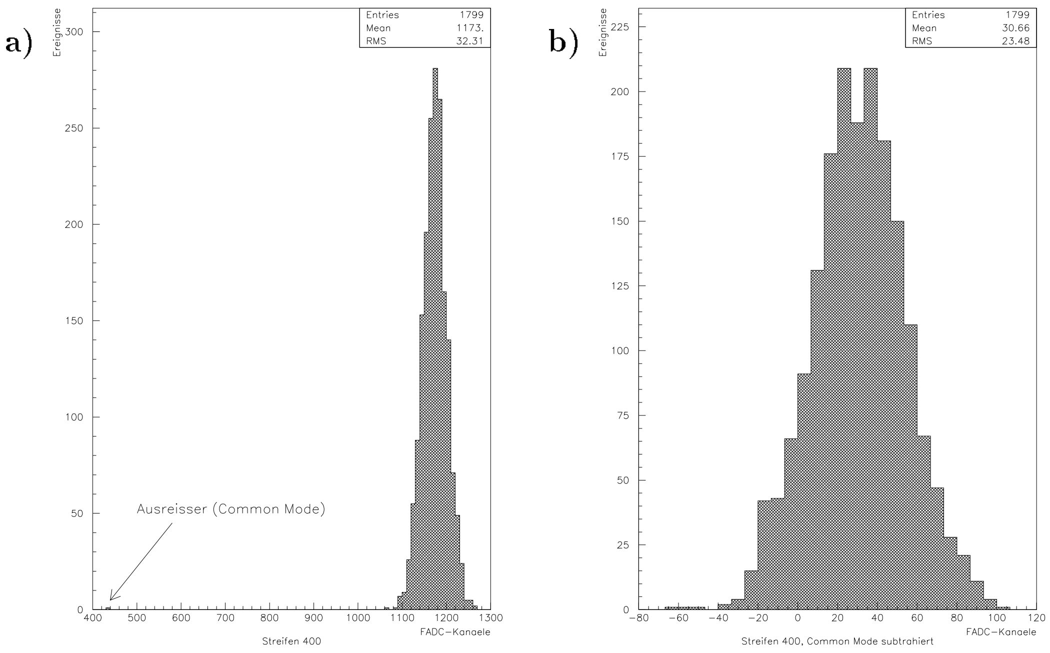

Abbildung 5.7: Rauschen eines Streifens (Nr. 400) a) vor und b) nach der Subtraktion des *Common Mode*.

Zusätzlich zum Rauschen treten Schwankungen auf, die entweder einen APC als Ganzen betreffen, oder die lang gegenüber der zur Auslese benötigten Zeit sind. Sie machen sich als „Springen" des Pedestals um einen für alle Streifen eines APCs gleichen Betrag bemerkbar. Man bezeichnet diese Schwankungen als *common mode*. Da der *common mode* im Vergleich zum Rauschen groß ist (einige σ), kann er Treffer vortäuschen. Es ist deshalb wichtig, den *common mode* wieder zu subtrahieren, um korrekte Daten zu erhalten. In Abbildung 5.7 ist ein Beispiel angeführt: 5.7 a) zeigt die unkorrigierten Daten. Man erkennt am linken Rand einen Ausreisser, der so weit vom Rauschen entfernt ist, daß er als Treffer erkannt würde. Er ist nach der Subtraktion des *common mode* in 5.7 b) verschwunden. Die Korrektur eines Ereignisses geschieht durch einfache Mittelung über die Daten D_i aller Streifen i eines APC und Subtraktion dieses Mittelwertes C_i von den Daten der einzelnen Streifen,

$$C_i = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} D_i,$$

wobei Streifen, die den Meßbereich des FADC im OnSiRoC über- oder unterschreiten, nicht berücksichtigt werden. Dadurch werden Schwankungen des ge-

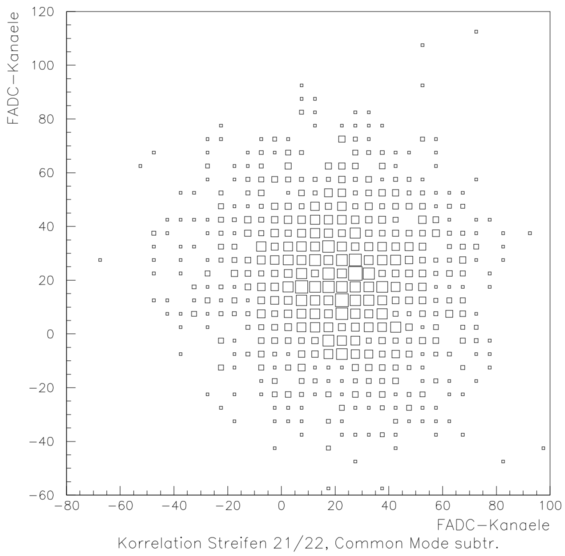

Abbildung 5.8: Korrelation zweier benachbarter Streifen (Kovarianzellipse) . Die Verteilung zeigt, daß der Aufbau frei von *PickUp* ist.

samten Pedestals eliminiert. Übrig bleibt das Pedestal[8] P_i:

$$P_i = D_i - C_i.$$

Nach der Subtraktion des *common mode* ist auch die vorher bereits vorhandene Gaußverteilung schmaler geworden (s. Abb. 5.6). Die Breite dieser Gaußfunktion kann nicht weiter verringert werden und wird als das „wahre" Rauschen angesehen.

Neben dem eigentlichen Rauschen der Elektronik und dem *common mode* kann die Signalqualität von äußeren elektromagnetischen Störungen beeinträchtigt werden, dem sog. *PickUp*. Um solche Störungen zu minimieren, muß der Aufbau ausreichend abgeschirmt sein. Zur Überprüfung trägt man die Daten zweier benachbarter Streifen nach der Subtraktion des *common mode* in einer sog. Kovarianzellipse gegeneinander auf. Ist *PickUp* vorhanden, so weichen die Hauptachsen der Ellipse von der senkrechten bzw. waagerechten Orientierung ab. Abb. 5.8 zeigt die Kovarianzellipse benachbarter Streifen auf dem ersten APC. Die Verteilung ist nahezu rund und zeigt, daß der Aufbau frei von *PickUp* ist, und daß beide Streifen ungefähr gleich stark rauschen.

[8]Bei einzelnen Ereignissen macht es natürlich keinen Sinn, von einer Verteilung und ihrer Breite zu sprechen; der Begriff Pedestal wird hier in Sinne von „Nullage" verwendet.

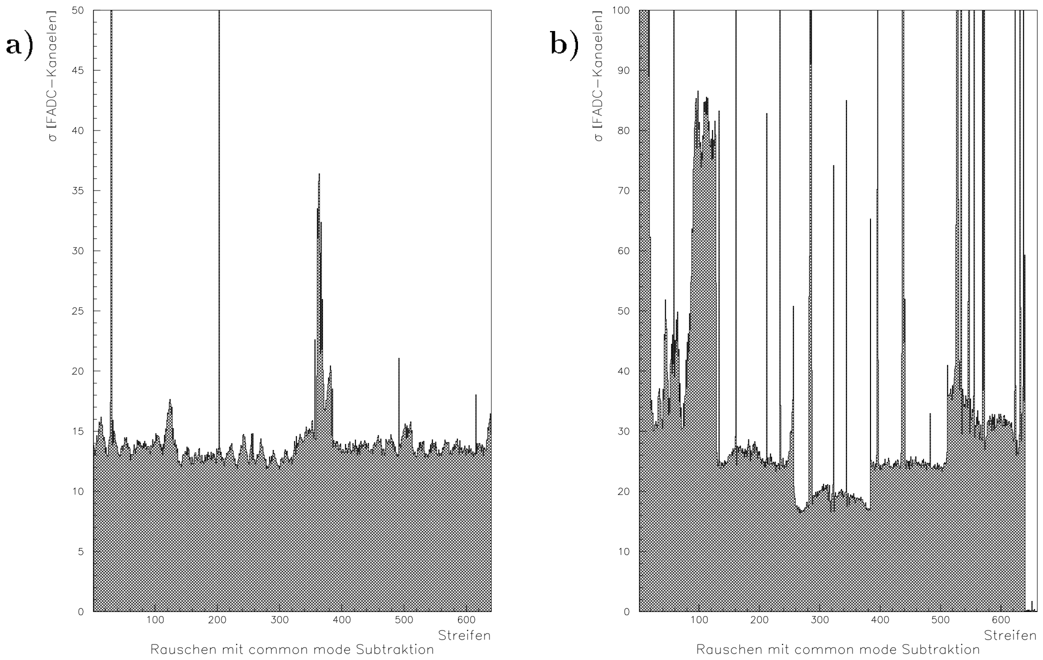

Abbildung 5.9: Rauschen des Hybriden #1 ohne Detektor (a) und des Hybriden #24 mit angebondetem Si-Detektor (b), aufgetragen ist jeweils σ gegen die Streifennummer. Auf dem Hybriden #1 ist das Rauschen sehr gleichmässig, auf dem Hybriden #24 sind die einzelnen Streifen z.T. stark unterschiedlich. Der vierte APC erweist sich hier als gleichmäßigster der Auslesechips. Der Maßstab der σ-Achsen wurde auf 50 bzw. 100 Kanäle festgelegt; einige Streifen haben ein deutlich höheres Rauschen.

5.3.1 Das Rauschen des gesamten Aufbaus

Um das Rauschen des gesamten Aufbaus zu bestimmen, wurden für beide Hybriden Noise-Runs genommen. Das Rauschen ist in Abb. 5.9 als Standardabweichung σ gegen die Streifennummer aufgetragen. In Abbildung 5.9 a) erkennt man, daß bis auf wenige Ausnahmen alle Streifen eine Pedestalbreite (d.h. ein Rauschen) von etwa 14 FADC-Kanälen haben. Die Verteilung ist über alle APCs gleichförmig, so daß die Aufteilung der Streifen auf fünf Auslesechips nicht mehr erkennbar ist. In Teil b) der Abbildung dagegen zeigt sich das Rauschen des Hybriden mit Detektor sehr ungleichmäßig, und man kann die fünf APCs gut unterscheiden. Da der Hybrid #24 nicht ohne Detektor getestet werden konnte, ist nicht feststellbar, ob das ungleichmäßige Rauschen von den APCs oder vom Detektor stammt.

Unter der Annahme, daß beide Hybriden **ohne** Detektor ein vergleichbares Grundrauschen haben, kann man aus der Differenz der beiden Messungen und der Abhängigkeit des Gesamtrauschens von der Detektorkapazität (vgl. [11])

$$ENC = 650e^- + 55e^-/\mathrm{pF} \cdot C_{Det} \tag{5.1}$$

die Kapazität des Detektors abschätzen. Man geht dabei davon aus, daß das Rauschen des Hybriden #1 (ohne Detektor) $650e^-$ entspricht. Durch einen einfachen Vergleich des Rauschens der beiden Hybriden kann man auf den vom Detektor verursachte Anteil der ENC schließen. Da das Rauschen auf dem Hybriden #24 sehr ungleichmäßig ist, wählt man den APC #4 wegen seines gleichförmig über die Streifen verteilten Rauschens für diesen Vergleich aus. Man erhält dann als Detektorkapazität

$$C_{Det} = \frac{650e^-}{14 \text{ FADC-Kanäle}} \cdot \frac{(26-14) \text{ FADC-Kanäle}}{55e^-/\mathrm{pF}} \approx 10\mathrm{pF}, \tag{5.2}$$

was in etwa dem bereits gemessenen Wert von 9pF [12] entspricht.

5.3.2 Rauschbeiträge der einzelnen Komponenten

Um das Gesamtrauschen in die Beiträge der einzelnen Komponenten zu zerlegen, wurde die Ausleseelektronik Stück für Stück aufgebaut und jeweils ein Noise-Run genommen. Bei allen Datensätzen wurden zunächst der *common mode* subtrahiert, und anschließend streifenweise das Rauschen aus der Standardabweichung der Daten aus 500 Ereignissen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.10 a)–d) dargestellt.

Ausgangspunkt ist der OnSiRoC ohne jegliche angeschlossenen Komponenten (a). Sein Grundrauschen beträgt ça 0.9 FADC-Kanäle. Die Kabel vom OnSiRoC zum Repeaterboard leisten keinen meßbaren Beitrag, die Daten sind deshalb nicht in Abb. 5.10 aufgeführt. Die nächste Komponente, die einen erkennbaren Beitrag zum Rauschen leistet, ist der Subrepeater. Ohne weitere angeschlossene Komponenten (b) vervierfacht sich das Rauschen; ist jedoch ein unbestückter Hybrid angeschlossen, der lediglich eine korrekte Abschirmung gewährleistet und eine gemeinsame Masse für alle Betriebsspannungen herstellt, sinkt das Rauschen wieder auf 1.2 FADC-Kanäle ab (c) und ist damit kaum höher als der Beitrag vom OnSiRoC. Schließlich ist zum Vergleich nochmals die Messung des kompletten Aufbaus (ohne Detektor) dargestellt (d).

Das Rauschen der Auslese stammt fast ausschließlich vom Hybriden, die Beiträge der übrigen Komponenten sind vernachlässigbar. Der Beitrag des Subrepeaters in Messung (b) stammt scheinbar aus äußeren Quellen, da er bei Anschluß eines Hybriden mit guter Erdung der Abschirmung fast vollständig wieder verschwindet. Um das Rauschen des Hybriden mit früheren Messungen am APC vergleichen zu können, muß erst eine Kalibration des Auslesesystems durchgeführt werden.

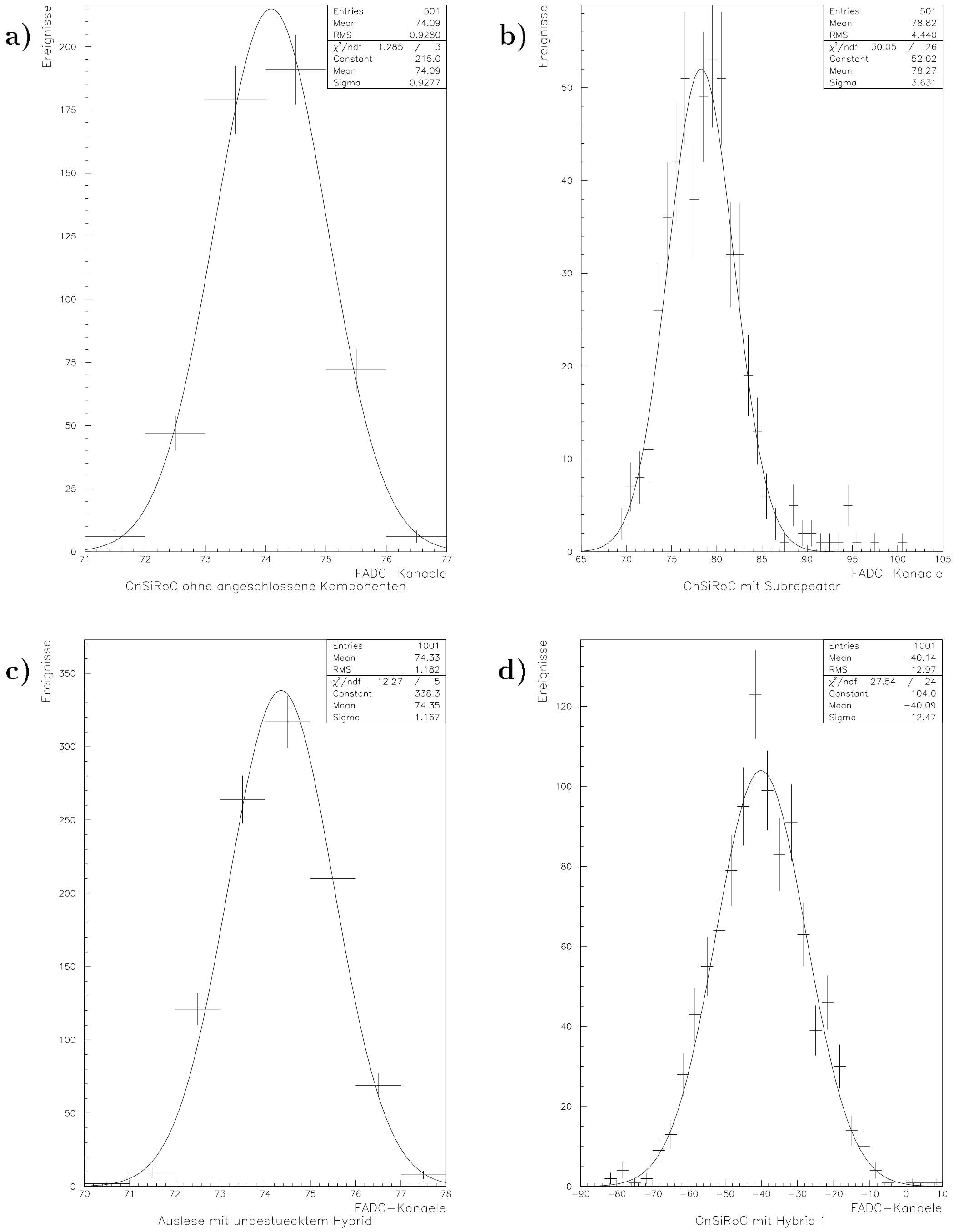

Abbildung 5.10: Rauschen bei stückweisem Aufbau der Auslese. Von den Daten in (d) wurde der *common mode* subtrahiert; für weitere Erläuterungen siehe Abschnitt 5.3.2.

5.4 Kalibrationsmessungen

Die charakteristischen Größen eines Auslesechips werden gewöhnlich in Einheiten der Elementarladung angegeben, da die eigentliche Aufgabe der Elektronik eine Ladungsmessung ist. So wird z.B. das Rauschen durch die **E**quivalent **N**oise **C**harge (ENC) beschrieben. Um solche Angaben machen zu können, muß die gesamte Auslesekette kalibriert werden, d.h. es wird ein Umrechnungsfaktor zwischen der Einheit „1 FADC-Kanal“ des OnSiRoC und der sog. Einheit „1 Elektron“ (d.h. eine Elementarladung) bestimmt. Zu diesem Zweck können die Kalibrationskapazitäten des APC verwendet werden. Sie sind in Vierergruppen zu Vielfachen von 40 fF angeordnet. Aus der Spannungsdifferenz $U_{in} = 2.2$V [31] der vom Decoder erzeugten Pulsflanke[9] und der Kapazität lässt sich die vom Testpuls auf der Testkapazität deponierte Ladung bestimmen, die der Höhe des Ausgangssignals proportional ist. Daraus lässt sich die Kalibration oder die Ladungsauflösung ΔQ_{FADC} des FADC nach

$$\Delta Q_{FADC} = \frac{1}{e} \times \frac{U_{Puls} C_{Test}}{P}$$

berechnen, wobei U_{Puls} die Höhe des (reduzierten) Spannungssprungs bezeichnet, e die Elementarladung, C_{Test} die Grösse der Testkapazität, und P die Pulshöhe über dem Pedestal in FADC-Kanälen.

Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt in der Genauigkeit, mit der Kapazitäten dieser Größe hergestellt können. Beim APC beträgt die Unsicherheit etwa 50% [42]. Diesen Fehler hat auch die Kalibration.

Zur Berechnung der Kalibration wird zunächst ein Run ohne Testpulse genommen, aus dem das Pedestal und das Rauschen für jeden Streifen einzeln bestimmt werden. Anschließend folgt ein Run mit Testpulsen, hier werden die Daten ebenfalls streifenweise über alle Ereignisse gemittelt. Von diesem Mittelwert wird der Mittelwert des Pedestals subtrahiert, und die verbleibende Pulshöhe wird mit der auf der Testkapazität deponierten Ladung verglichen. Mit dieser Kalibration ist es nun möglich, das im ersten Run bestimmte Rauschen als ENC anzugeben.

Abbildung 5.11 zeigt die Kalibration für den Hybriden #24. Es fällt auf, daß der APC #4 auch bei der Kalibration recht gleichförmig ist. Aus der Grafik liest man für den vierten APC eine Auflösung zwischen 44 und 72 e^-/FADC-Kanal ab. Als Mittelwert erhält man 58 e^-/FADC-Kanal, der in der Grafik durch eine Linie markiert ist. Mit dieser Kalibration kann nun das Rauschen als ENC angegeben werden, die Werte sind in Tabelle 5.2 angegeben. In Gleichung 5.1 wurde implizit eine Kalibration angenommen. Sie entspricht 46 e^-/FADC-Kanal; damit berechnet sich das Rauschen des Hybriden mit Detektor zu 1200 e^-. Die Kalibration über die integrierten Testkapazitäten ist 26% höher; was aber deutlich innerhalb der Fehlergrenze von 50% liegt.

[9] Die von außen an den Kalibrationseingang angelegte Spannung wird im APC um den Faktor 37 reduziert, so daß $U_{Puls} = 1/37 \cdot U_{in}$.

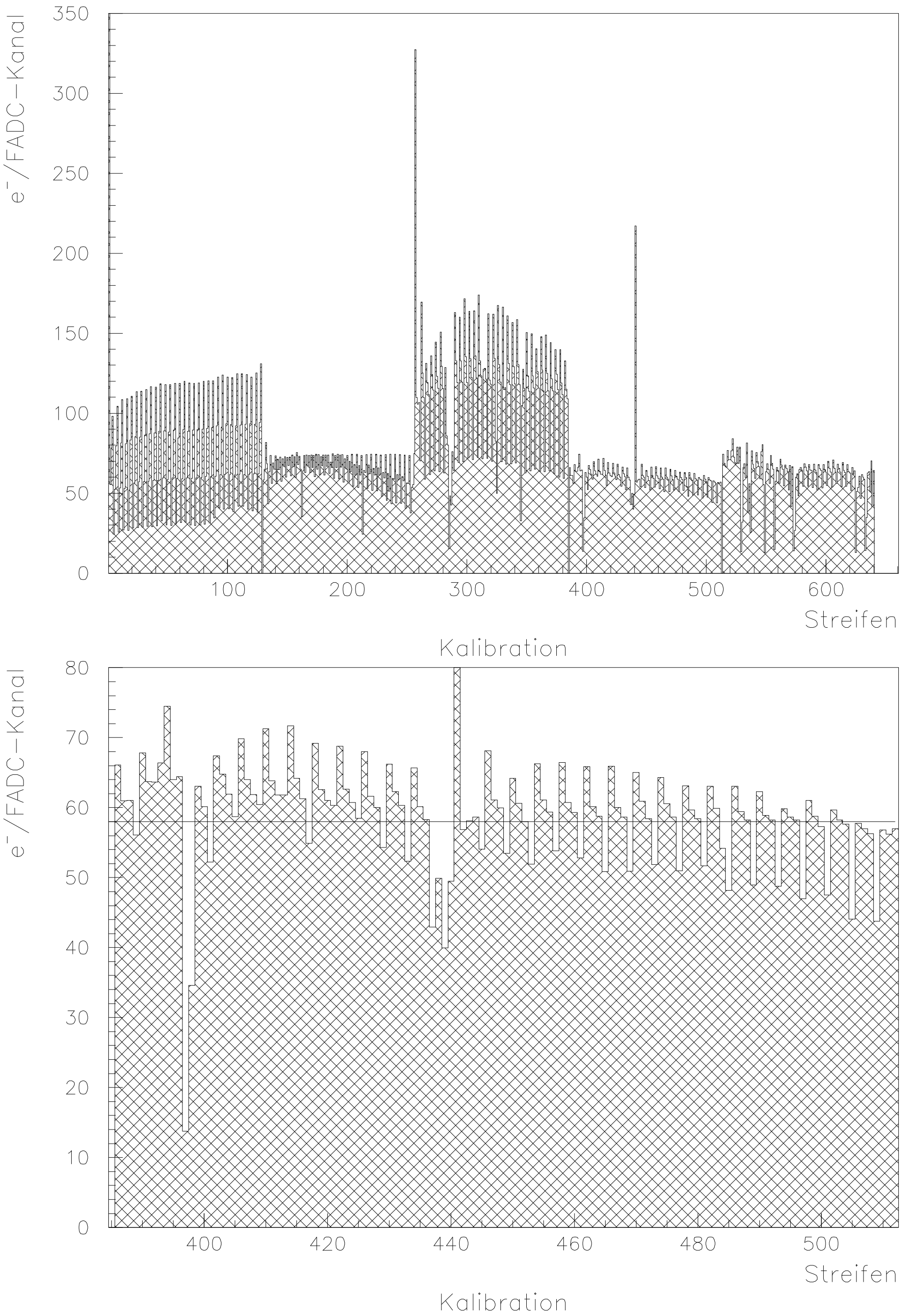

Abbildung 5.11: Streifenweise Ladungskalibration des Hybriden. Aufgetragen sind e^-/FADC-Kanal gegen die Streifennummer. Im oberen Bild ist der ganze Hybrid zu sehen, das untere Bild zeigt als Ausschnitt APC #4.

Konfiguration	Rauschen [FADC-Kanäle]	[e^-]
OnSiRoC	0.9	52.2
OnSiRoC + Subrepeater	3.6	209
OnSiRoC , Subrepeater + Hybrid (unbest.)	1.2	69.6
mit Hybrid 1	12.5	725
mit Hybrid 24 und Si-Detektor	typisch 26	1508

Tabelle 5.2: Umrechnung der Rauschamplituden in ENC.

Anzahl Ereignisse	3001
Sperrspannung V_{Bias}	50 V
Dunkelstrom des Detektors	8–11μA
Sequenzer Takt	3.3 MHz
Sequqenzer Code	Hyb 24 640 slpi det1c
Verzögerung *CosStop*	8.8μs
V_{Dig}	5.23 V
V_{Ana}	3.5 V
OnSiRoC #	11

Tabelle 5.3: Parameter der Datennahme im Teststrahl 22.

5.5 Messungen mit Detektor

Um die Funktionstüchtigkeit des Auslesesystems für den Einsatz im VLQ-Tracker zu prüfen, wurden mit dem Hybrid #24 und dem angebondeten Silizium-Detektor Messungen im Teststrahl 22 am Synchrotron DESY II durchgeführt. Der Aufbau wurde bereits in Kapitel 5.1 beschrieben.

In diesem Test konnte die ordentliche Funktion des VLQ-Auslesesystems gezeigt werden. Es wurden Daten bei verschiedenen Strahlenergien (1–5 GeV) aufgezeichnet, die übrigen Parameter waren für alle Runs gleich und sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Da durch die Szintillatoren ein im Vergleich zu den Abmessungen des Detektors enger Bereich des Strahls ausgewählt wurde ($3 \times 3\text{mm}^2$), konnten Trefferkandidaten durch Verfahren des Detektors senkrecht zu den Streifen schon im Online-Display als Elektronen identifiziert werden. Der Detektor wurde so positioniert, daß die an den APC #4 angeschlossenen Streifen getroffen wurden. Ein Ereignis mit einem (später identifizierten) Elektronkandidaten ist in Abbildung 5.12 wiedergegeben.

Zur Auswertung der Daten wurde ein einfaches Programm zur Treffersuche geschrieben. Es sucht in jedem Ereignis den Streifen mit dem höchsten Signal-

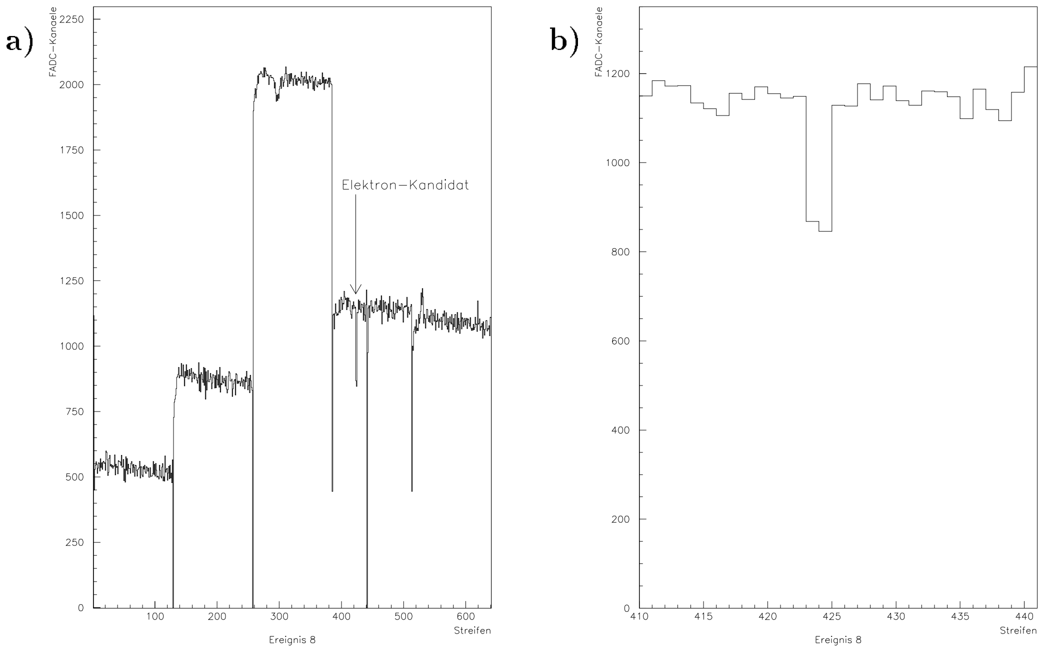

Abbildung 5.12: Ereignis mit einem Elektron-Kandidaten in den Streifen 423/424 (a). In der Vergrößerung (b) erkennt man einen Cluster aus zwei Streifen mit je $\sim$ 300 FADC-Kanälen Signalhöhe. Die Streifen an den APC-Grenzen und um Nr. 440 wurden als tot bzw. verrauscht markiert.

Variable	Typ	Wertebereich	Erläuterung
evtn	INT	unbeschränkt	Ereignisnummer
pipec	INT	0–31	Pipelinezähler
channel	INT	1–4	OnSiRoC-Kanal
width	INT	0–2048	Breite des Clusters
fstrip	INT	0–2048	erster Streifen
maxpos	INT	0–2048	Streifen mit dem höchsten S/N im Cluster
sum	INT	unbeschränkt	Summe der Pulshöhen
noise	REAL	unbeschränkt	Summe des Rauschens
sn	REAL	unbeschränkt	Quotient sum/noise
cog	REAL	unbeschränkt	Schwerpunkt des Clusters
wsum	INT	unbeschränkt	mit Streifenpos. gewichtete Summe

Tabelle 5.4: Struktur des Cluster-Ntuples.

Rausch-Verhältnis und prüft, ob er als Trefferkandidat in Frage kommt. Das Signal muß dafür mindestens 4σ vom Pedestal entfernt sein. Anschliessend werden die direkten Nachbarn untersucht; hier beträgt die Mindesthöhe nur noch 2σ. Ist das Verhältnis von Signalsumme zu Rauschsumme des Clusterkandidaten grösser als 6, so wird er als Treffer akzeptiert. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis keine Trefferkandidaten mehr in diesem Ereignis gefunden werden. Die Struktur des Cluster-Ntuples zeigt Tabelle 5.4. Die Funktion des Programms wurde durch die Bearbeitung eines Noise-Runs getestet, der keine Treffer enthält. Dabei wurden lediglich zwei Treffer identifiziert, in den echten Daten dagegen ça. 16000.

Die für die weiteren Auswertungen ausgewählten Ereignisse durften nur genau einen Treffer aufweisen, um verrauschte Ereignisse auszuschliessen. Außerdem wurden nur Ereignisse akzeptiert, in denen der OnSiRoC nicht automatisch ein SBI[10] generieren musste. Dieses Signal wurde nicht immer korrekt übertragen und führte zu einer Fehlmessung.

Strahlprofil

Zunächst wurde die Lage des Ladungsschwerpunkts (center of gravity) des Clusters untersucht. Die Verteilung, die in Abbildung 5.13 gezeigt ist, gibt das Strahlprofil wieder. Die Mitte des Strahls liegt auf dem vierten APC, wie durch die vorherige Positionierung per Online-Display vorgegeben. Der Einbruch in der Verteilung wird von Streifen verursacht, die als verrauscht oder tot ausmaskiert wurden.

[10] vgl. Tabelle 4.1

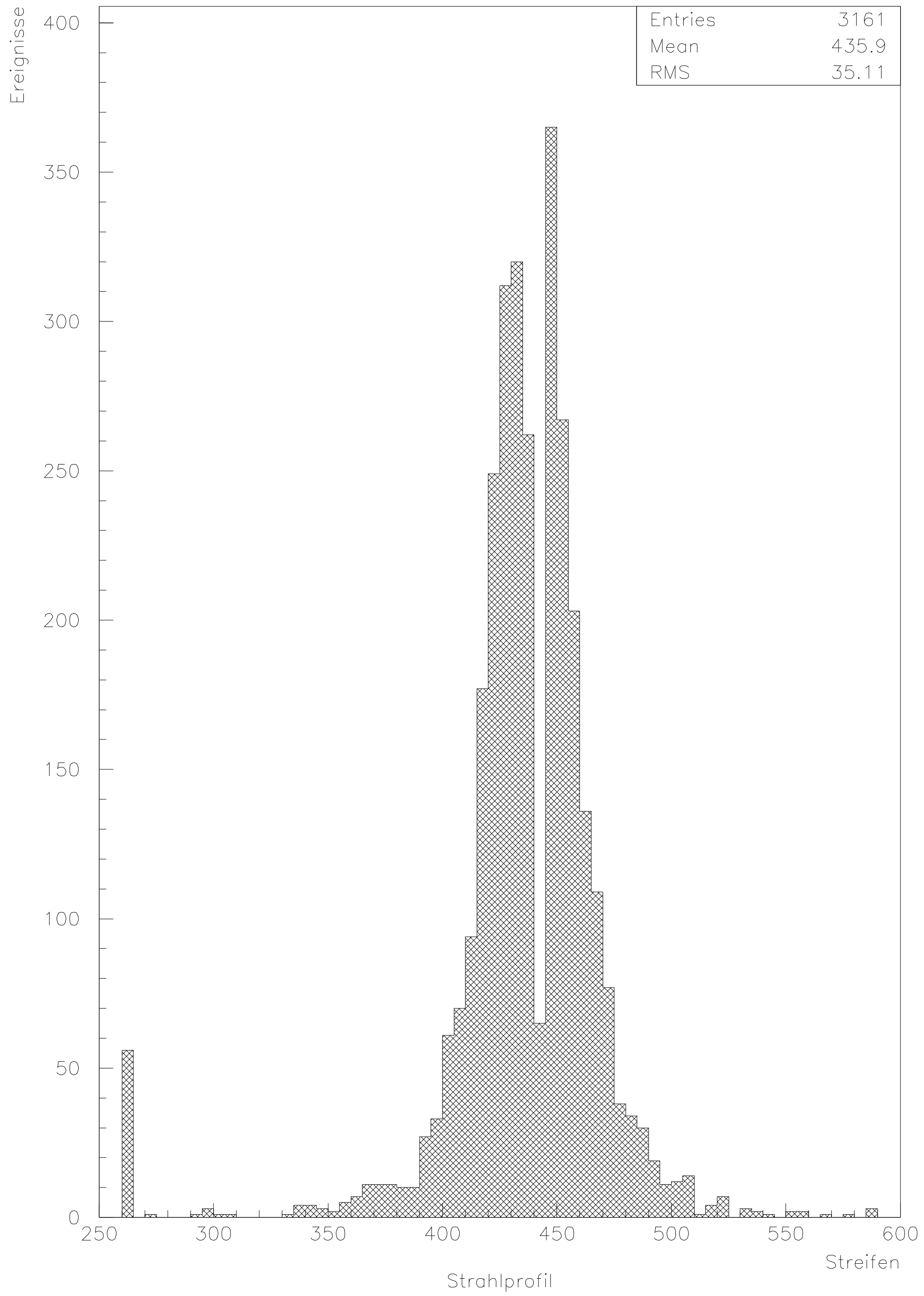

Abbildung 5.13: Profil des Elektronenstrahls. Der Einbruch in der Mitte des Strahls stammt von maskierten Streifen. Links am Rand ein verrauschter Streifen.

Clustergröße

Bei senkrechtem Auftreffen des Strahls auf den Detektor erwartet man fast ausschließlich Cluster aus einem oder zwei Streifen. Die Verteilung der Clustergrößen ist in Abb. 5.14 dargestellt und zeigt, daß die Daten auch in dieser Hinsicht der Erwartung entsprechen.

Pulshöhenspektrum

Als nächstes wurde ein Pulshöhenspektrum erzeugt (Abb. 5.15). Dazu wurden Daten aus allen Runs (1–5 GeV) verwendet; die Maxima der Verteilungen ließen nicht auf eine Energieabhängigkeit schließen; dies war auch nicht zu erwarten, da der Energieverlust von Elektronen in diesem Bereich nur eine schwache Energieabhängigkeit zeigt (s. Gleichung 3.1). Das Spektrum sollte im Idealfall durch die Landau-Verteilung [34]

$$f(x,\Delta) = \frac{1}{2\pi i}\int\limits_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{(p\Delta - x\int_0^\infty w(E)(1-e^{-pE})\,dE)}\,dp \qquad (5.3)$$

$w(E)$	differentieller Querschnitt für einen Stoß mit Energieverlust E
Δ	totaler Energieverlust
x	Absorberdicke [g/cm^2]

beschrieben werden. Da die Landau-Verteilung nicht geschlossen angegeben werden kann, benutzt man zur Anpassung die Moyal-Näherung [36]

$$C_1 e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-C_2}{C_3}+\exp\frac{-x+C_2}{C_3})} \qquad (5.4)$$

mit den drei Parametern C_1, C_2 und C_3. Die Anpassung ergab als Position für das Maximum (mop-Wert[11]) 449 ± 3.3 FADC-Kanäle. Da der mop-Wert der von einem minimalionisierenden Teilchen in einem 300μm dicken Silizium-Detektor erzeugten Ladung bekannt ist (24000 e^-), kann aus dieser Anpassung eine weitere Kalibration berechnet werden; man erhält $\Delta Q_{FADC} = 53.5 \pm 0.4 e^-$/FADC-Kanal. Damit ergäbe sich das Rauschen der Anordnung mit Detektor zu 1390 e^-. Die Bestimmung des mop-Wertes enthält allerdings Fehler unbekannter Größe, die eine genaue Kalibration nicht zulassen. Zum einen wurde nur mit einer Näherung der Landau-Verteilung gearbeitet, zum andern waren die nachgewiesenen Elektronen nicht minimalionisierend und damit der mop-Wert nicht exakt.

Ähnlich sieht auch die Verteilung des **Signal/Rausch-Verhältnisses** (vgl. Abbildung 5.16) aus, wobei man das Signal/Rausch-Verhältnis eines Clusters durch

$$S/N_{Cluster} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_i} \qquad (5.5)$$

[11] mop: **m**ost **p**robable value, wahrscheinlichster Wert

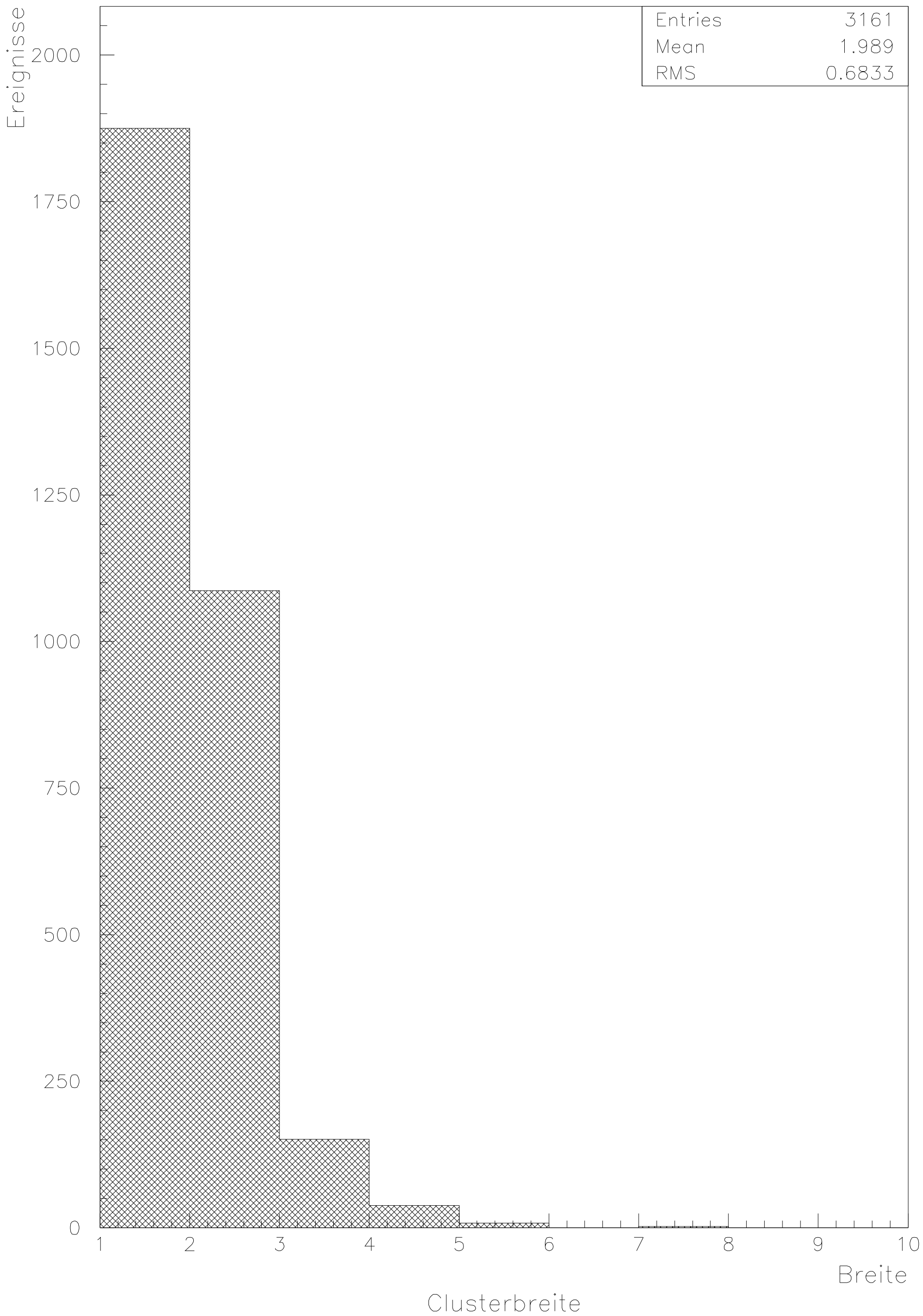

Abbildung 5.14: Verteilung der Clusterbreiten. Es treten nahezu nur Einer- und Zweiercluster auf.

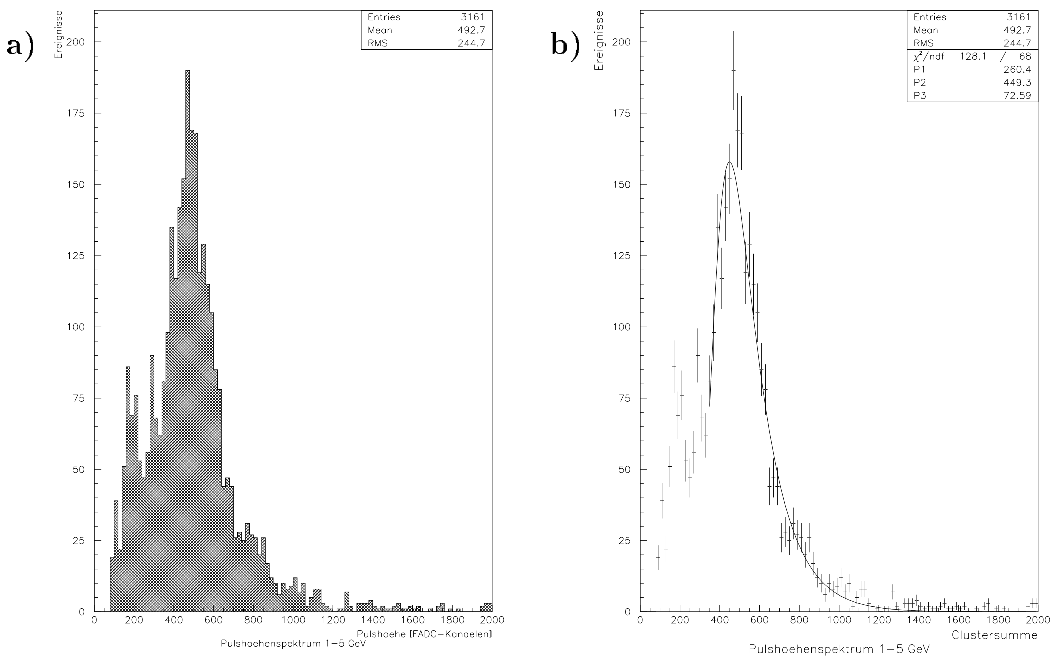

Abbildung 5.15: Pulshöhenspektrum der identifizierten Treffer (a) und Anpassung einer Moyal-Funktion [36] (b) als Näherung der Landau-Verteilung. Die Herkunft der Spitzen an der linken Flanke der Verteilung ist nicht geklärt; sie wurden bei der Anpasung nicht berücksichtigt.

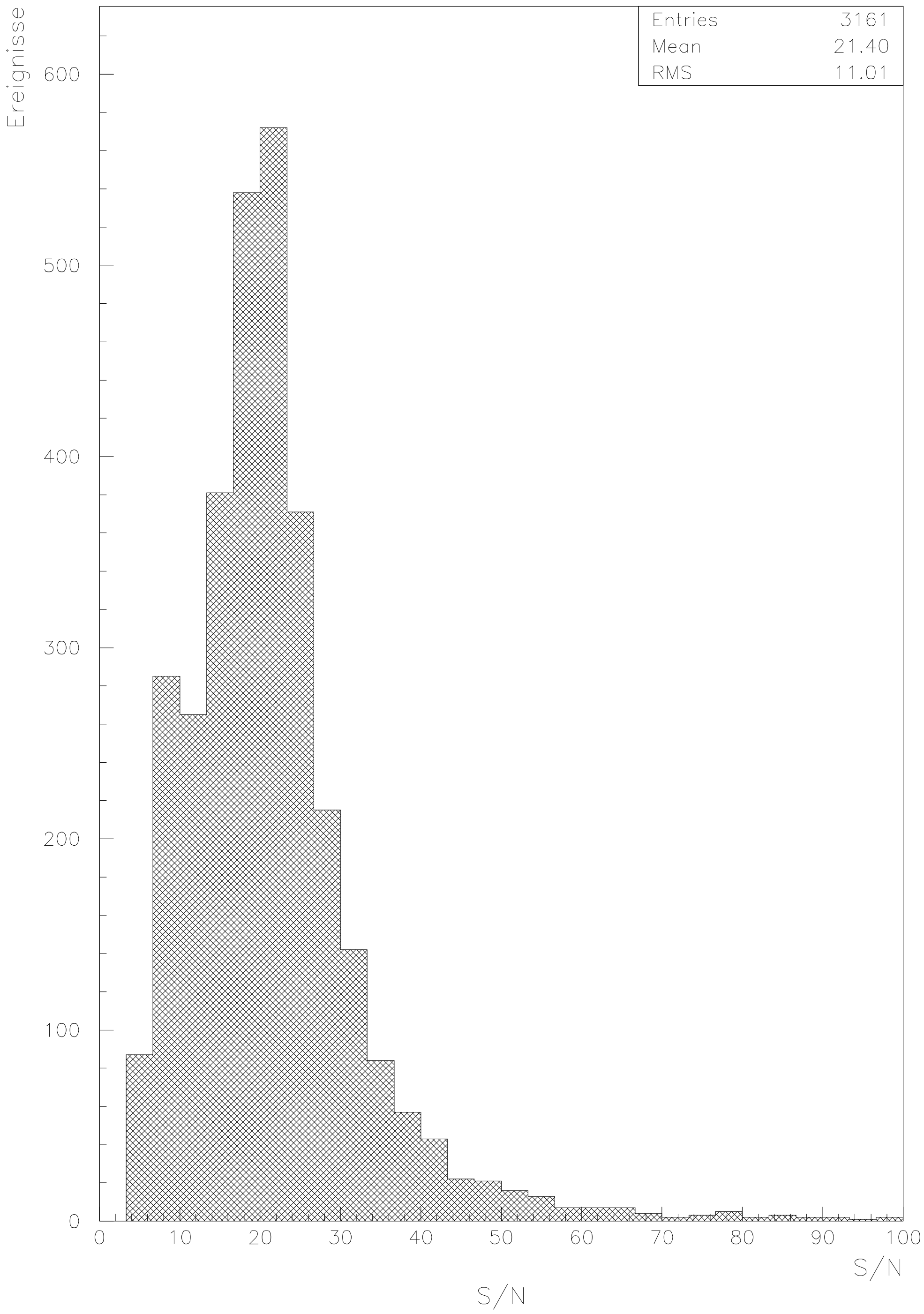

Abbildung 5.16: Spektrum des Signal/Rausch-Verhältnisses der identifizierten Treffer.

P_i	Pulshöhe des Streifens i
N_i	Rauschen des Streifens i
n	Anzahl der Streifen im Cluster

definiert. Die Verteilung hat ihr Maximum bei ça. 20, einem für Silizium-Detektoren typischen Wert.

Für Detektoren aus GaAs hat man für die gemessene Ladung einen mop-Wert von 15700 e^- bestimmt [19]. Anhand eines Vergleichs mit den hier angegebenen Werten für Silizium kann man für GaAs also ein Signal/Rausch-Verhältnis von ça. 13 erwarten.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Tauglichkeit des neu entwickelten Hybriden zur Auslese eines Halbleiterdetektors für den Einsatz beim VLQ-Tracker im H1-Experiment zu zeigen. Die Untersuchungen umfaßten einen Funktionstest, Rauschmessungen am Auslesesytem, Kalibrationsmessungen und den Betrieb mit einem Silizium-Detektor im Elektronenstrahl. Zusätzlich wurde ein Programm entwickelt, das die Bedienung des Auslesesystems im Vergleich zu bestehenden Programmen vereinfacht, sowie ein zweites Programm, das die Daten in ein für die Analyse passendes Format konvertiert.

Im Funktionstest wurde der Hybrid erstmalig am OnSiRoC betrieben; die Auslese von Kalibrationspulsen bewies die Funktionstüchtigkeit und lieferte einen ersten Vergleich mit Messungen an anderen Hybriden.

Das Rauschen der Hybriden wurde auf seine Amplitudenverteilung hin untersucht, die sich in beiden Fällen als gaußförmig erwies, was den Erwartungen entsprach. Die Breite der Verteilung war auf dem Hybriden #1 über alle Streifen gleichförmig, auf dem Hybriden #24 zeigten sich zum Teil erhebliche Schwankungen. Es war aber nicht möglich, bei diesem Hybriden zwischen den Auslesechips und dem Detektor als Ursache dieser Unregelmäßigkeit zu unterscheiden.

Bei Messungen im Teststrahl wurden bei verschiedenen Energien Daten aufgezeichnet, die mit einem gebräuchlichen Algorithmus auf Treffer überprüft wurden. Die erhaltenen Daten wurden nach einer einfachen Selektion auf die Lage der Cluster, ihr Signal/Rausch-Verhältnis und auf die Verteilung der Pulshöhen hin untersucht. Aus dem Pulshöhenspektrum läßt sich die Ladungsauflösung des OnSiRoC ableiten und mit einer Kalibration vergleichen, die mit Hilfe der Testkapazitäten des APC bestimmt wurde. Die erhaltenen Werte sind mit der daraus errechneten ENC in Tabelle 6.1 zusammengefaßt; als zusätzlicher Vergleich dient eine Angabe des Äquivalentrauschens aus [11]. Obwohl diese Werte wegen der unbestimmten Fehler nur eine Abschätzung darstellen können, sind sie miteinander vergleichbar, und das Rauschen der Anordnung entspricht den Erwartungen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Ausleselektronik in der vorgesehenen Konfiguration wie erwartet funktioniert und daß die Parameter für Rauschen,

Methode	ΔQ_{FADC}	Equivalent Noise Charge	
		Hybrid #1 $[e^-]$	Hybrid #24 + Detektor $[e^-]$
Testpulse	58	812	1508
mop-Wert Si	53.5	749	1391
Literatur	46.4	650	1207

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der ermittelten Kalibrationen und des resultierenden Äquivalentrauschens. Die Fehler konnten nicht bestimmt werden und sind deshalb nicht angegeben; die Werte können so lediglich als Anhaltspunkte betrachtet werden.

Signalhöhen und das Signal/Rausch-Verhältnis im vorgesehenen Rahmen liegen. Mit einem Silizium-Detektor wurde ein Signal/Rausch-Verhältnis von 20 erzielt. Vergleicht man das erwartete Signal von 24000 e^- für Silizium mit dem erwarteten Wert von 15700 e^- für GaAs, so kann man für den Betrieb eines GaAs-Detektors an dieser Auslese ein Signal/Rausch-Verhältnis von ~ 13 erwarten.

Die Ausleseelektronik erfüllt also die an sie gestellten Erwartungen und wird zur Auslese des VLQ-Trackers eingesetzt werden. Da ein GaAs-Detektor der endgültigen Serie noch nicht zur Verfügung stand, werden bis zum endgültigen Einbau des VLQ am DESY noch Tests mit dem neuen GaAs-Detektor durchgeführt werden, um zu prüfen, inwieweit die Erwartungen an diese Kombination erfüllt werden.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[1] Bilder des H1-Detektors und von HERA. http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys/H1/pictures/.

[2] Schaltbilder des APC und des Decoderchips. Zur Verfügung gestellt von M. Kausch, DESY.

[3] Ch. Berger. *Teilchenphysik*. Springer ISBN 3-540-54218-3, 1992.

[4] H1 Collaboration. Technical Proposal to build Silicon Tracking Detectors for H1. *Nuclear Physics*, B439:471, 1995.

[5] H1 Collaboration. Technical Proposal to build a Special Spectrometer covering Very Small Momentum Transfers. Unveröffentlicht, Mai 1996.

[6] National Instruments Corp. *LabVIEW*. 6504 Bridge Point Parkway, Austin, TX 78730-5039, USA, Dezember 1993. Software Handbuch.

[7] Particle Data Group. Review of particle physics. *Physical Review D (Particles and Fields)*, 54(1):128–131, Juli 1996.

[8] DESY, Abt. FEC. http://www.desy.de/˜hammer/activ1.html.

[9] DESY, Abt. FEC. Der Hybrid für den VLQ-Tracker. Persönliche Mitteilungen.

[10] CERN Application Software Division. *PAW Physics Analysis Workstation*. CERN, Genf, Schweiz, Juli 1994. CERN Program Library Long Writeup Q121.

[11] E. Peppel et al. Development of the H1 Backward Silicon Strip Detector. *Nucl. Instr. and Meth.*, A386:81–86, 1997.

[12] D. Pitzl et al. Evaluation of double-sided, AC-coupled, double metal silicon strip detectors for H1 at HERA. *Nucl. Instr. and Meth.*, A348:454–460, 1994.

[13] F. Tenbusch et al. Investigation of the radiation damage of GaAs detectors by protons, pions and neutrons. *Nucl. Instr. and Meth.*, A388:383–389, 1997.

[14] J. Bürger et al. Online Readout and Control Unit for High-speed / High Resolution Readout of Silicon Tracking Detectors. *Nucl. Instr. and Meth.*, A386, 1997.

[15] O. Syben et al. Measurements on GaAs strip and pixel detectors in a 50 GeV pion beam. *Nucl. Instr. and Meth.*, A388:408–411, 1997.

[16] P. Weilhammer et al. Measurement of the spatial resolution of double-sided-double-metal AC-coupled silicon microstrip detectors. *Nucl. Instr. and Meth.*, A326:189, 1995.

[17] S. Prell et al. The Readout System of the H1 Silicon Detectors. *Nucl. Instr. and Meth.*, A367:422–427, 1995.

[18] Th. Kubicki et al. Investigations on Damage of GaAs Detectors caused by Neutrons (Peak Energy 1 MeV) and Co^{60} Photons. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 44:528–530, 1995.

[19] W. Braunschweig et al. Time structure of charge signals and noise studies of GaAs detectors irradiated by neutrons and protons. *Il Nouvo Cimento*, 109A(9):1289–1302, September 1996.

[20] W. Karpinski et al. Radiation Tests on GaAs Particle Detectors. *Nucl. Instr. and Meth.*, A323:635–637, 1992.

[21] CN/ASD Group. *MINUIT – Users Guide*. CERN, 1993. CERN Program Library D506.

[22] H1 SPACAL Group. The H1 Lead/Scintillating-Fibre Calorimeter. *Nucl. Instr. and Meth.*, A386:1–1, 1997.

[23] H1 Collaboration. The H1 Detector at HERA. *Nucl. Instr. and Meth.*, A386:310–347, 1997.

[24] H1 Collaboration. The tracking, calorimeter and muon detectors of the H1 experiment at HERA. *Nucl. Instr. and Meth.*, A386:348–396, 1997.

[25] F. Halzen and A. D. Martin. *Quarks and Leptons*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-81187-4, 1984.

[26] W. J. Haynes. *SiVMExi, H1 Silicon Trackers: VMEtaxi Data Acquisition*. DESY. *http://www-h1.desy.de/h1/www/h1det/sitracker/sidaq/*.

[27] R. Horisberger and D. Pitzl. A Novel Readout Chip for Silicon Strip Detectors with Analog Pipeline and Digitally Controlled Analog Signal Processing. *Nucl. Instr. and Meth.*, A326:92–99, 1993.

[28] W. Raith (Hrsg.). *Bergmann-Schäfer — Lehrbuch der Experimentalphysik*, volume 4. de Gruyter ISBN 3-11-010977-8, 1992.

[29] H. Itterbeck. Untersuchungen am Myonsystem des H1-Detektors. Diplomarbeit in Physik, RWTH Aachen, Februar 1993.

[30] K. Hansen et al. (DESY FEC). FEC-Jahreskurzbericht 1996. Unveröffentlicht.

[31] H. Klaer. Persönliche Mitteilung, Mai 1997.

[32] G. Klaiber. Eigenschaften des analogen Verstärker- und Speicherchips APC128 zur Auslese von Siliziumdetektoren. Diplomarbeit in Physik, ETH Zürich, September 1995. ETHZ-IPP Internal Report 95-5.

[33] T. Köhler. *Suche nach angeregten Leptonen mit dem H1-Detektor*. Dissertation in Physik, RWTH Aachen, Februar 1995.

[34] L. D. Landau. *J. Phys.*, 8:201, 1944.

[35] M. Landon. *Zaradann 1.1.0*, 1994.

[36] J. E. Moyal. *Phil. Mag.*, 46(263), 1955.

[37] G. W. Noyes. *SiRun*. DESY, 1994.

[38] G. W. Noyes. *H1 Silicon Trackers DAQ*. DESY, März 1995. *http://www-h1.desy.de/h1/www/h1det/sitracker/sidaq/*.

[39] D. Pitzl. Persönliche Mitteilung, Juni 1997.

[40] S. Prell. *OSCA-Manual*, 1995.

[41] K. Rosenbauer. *Suche nach Leptoquarks und Leptogluonen im H1-Experiment bei HERA*. Dissertation in Physik, RWTH Aachen, Juli 1995. PITHA 95/16.

[42] S. Prell. *Entwicklung des Steuer- und Auslesemoduls für die Siliziumstreifendetektoren des H1-Detektors*. Dissertation in Physik, Univ. Hamburg, 1996. DESY FH1-96-02.

[43] Creative Electronic Systems S.A. *VMVbus Vertical Bus System, VBR 8212/VBE 8213 User's Manual*. CES S.A., Route du Pont-Butin 70, CH-1213 Petit-Lancy 1 /Genf, Schweiz, Juli 1988. Hardware Handbuch.

[44] Creative Electronic Systems S.A. *MAC 7212, Macintosh to VME 32-bit Interface User's Manual*. CES S.A., Route du Pont-Butin 70, CH-1213 Petit-Lancy 1 /Genf, Schweiz, April 1990. Hardware Handbuch.

[45] O. Syben. Zeichnungen von GaAs-Streifendetektoren.

[46] Creative Electronic Systems. *LabVIEW VIs for MAC - VME - CAMAC Systems*. CES S.A., Route du Pont-Butin 70, CH-1213 Petit-Lancy 1 /Geneva, Switzerland, Juni 1993. Software Handbuch.

[47] B. G. Taylor. *The MICRON User Manual*. ECP Division, CERN, 1988.

[48] B. G. Taylor. *The MacVEE Hardware User Manual*. ECP Division, CERN, 1990.

[49] M. Toporowski. *Development and Characterization of Tracking Detectors made of SI-GaAs for the LHC Experiments*. Dissertation in Physik, RWTH Aachen, 1997. PITHA 97/7.

[50] M. Toporowski. Persönliche Mitteilung, August 1997.

[51] VMEbus International Trade Association. *The VMEbus specification*. ANSI/IEEE Standard 1014-1987.

Lebenslauf

15.6.69	geboren in Düsseldorf als drittes Kind des Journalisten Rudolf Georg Mang und seiner Frau Suse Regina, geb. Scholz
1975 – 1979	Besuch der kath. Grundschule St. Ulrich in Sindorf
1979 – 1988	Besuch des Neusprachlichen Gymnasiums der Stadt Bergheim/Erft (später Erftgymnasium Bergheim)
Juni 1988	Abitur
Sept. 1988	Einschreibung an der RWTH Aachen für den Studiengang Physik
8. 10. 1991	Vordiplom in Physik
Sept. 1992 – Juni 1993	Studium an der Victoria University of Manchester, England, im Rahmen des ERASMUS-Programms
Okt. 1994	Eintritt in das I. Phys. Institut und Beginn an Arbeiten für das Myontriggersystem bei H1
Juli 1995	Beginn der Arbeit an der VLQ-Auslese

Danksagung

Am Schluss dieser Arbeit möchte ich all denen meinen Dank aussprechen, die bei der Anfertigung dieser Arbeit geholfen und sie erst möglich gemacht haben.

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Berger für die interessante Aufgabenstellung sowie Herrn Prof. Braunschweig für die Erstellung des Zweitgutachtens. Ausserdem danke ich Herrn Dr. Bürger vom DESY für seine Unterstützung, D. Pitzl für seine große Hilfsbereitschaft und zahlreichen Tips beim Aufbau, und P.-O. Meyer C. Duprel, C. Krauss sowie S. Hurling für ihre Mitarbeit am Readout des VLQ-Tracker und bei der Vorbereitung und Durchführung des Strahltests. Weiterhin danke ich den Mitgliedern der GaAs-Gruppe des I. Physikalischen Institutes für ihre Unterstützung und zahlreiche fruchtbare Diskussionen; insbesondere danke ich O. Syben und D. Albertz für ihre Hilfe in Detektorfragen und für die Erläuterung des Clusteralgorithmus sowie F. Tenbusch für seine Hilfe bei der Fehlersuche und -beseitigung. Dank schulde ich außerdem allen Mitarbeitern der H1-Gruppe am I. Physikalischen Institut, die für alle meine Fragen und Probleme stets ein offenes Ohr hatten.

Besonders herzlich danke ich meinem Vater, der mir das Physikstudium ermöglichte und mich während meines Studiums immer unterstützt hat, und Manuela Pape, die mir während dieser Arbeit Motivation und Rückhalt war.