Vorbereitende Untersuchungen zur Bestimmung der Wechselwirkungsraten und deren Zeitstruktur an einem Drahttarget mit Hilfe der Energieinformation des HERA-B elektromagnetischen Kalorimeters

Diplomarbeit

vorgelegt von
Michael Symalla

Lehrstuhl für
experimentelle Physik V
Fachbereich Physik
Universität Dortmund

März 1999

“Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig:
Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas,
in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat,
wieder wegzuwerfen.”

Albert Einstein

Diese Arbeit ist meinen Eltern Ursula und Alfons,
sowie meinem Bruder Christian Symalla gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Seit Menschgedenken gibt es Forscher, die das Geheimnis hinter jeder vermeintlichen Selbstverständlichkeit ergründen wollen[1]. Das Ziel dieser Menschen ist es, die Gesetze der Natur zu verstehen und sie in einer einheitlichen Theorie zu beschreiben. Als Ergebnis dieser Bestrebungen in der Elementarteilchenphysik wurde das Standardmodell entwickelt.

Dieses ist die bisher beste Beschreibung der uns bekannten physikalischen Vorgänge. Es ist zwar nicht in der Lage, die Gravitation zu beschreiben, jedoch werden die übrigen Wechselwirkungen auf drei fundamentale Wechselwirkungen zurückgeführt. Diese sind die schwache, die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung. Fast alle durch das Standardmodell beschriebene physikalische Vorgänge konnten bis heute experimentell überprüft werden. Trotzdem muß jede Theorie an der Grenze ihrer Vorhersagekraft getestet werden.

Nach dem CPT–Theorem[2], das auch für das Standardmodell gilt, laufen Wechselwirkungen unter der kombinierten Anwendung dreier Transformationen auf dieselbe Weise ab wie ohne deren Anwendung. Diese sind:

- Die C–Transformation (Charge – Ladung): Beschreibt den Übergang von Teilchen zu den entsprechenden Antiteilchen.
- Die P–Transformation (Parity – Parität): Beschreibt die räumliche Spiegelung des Bezugssystems.
- die T–Transformation (Time – Zeit): Beschreibt die Umkehr der Zeitrichtung.

Für die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung gilt sowohl die Invarianz gegenüber der kombinierten CPT–Transformation, als auch die Invarianz gegenüber jeder der einzelnen Transformationen. Die theoretische und experimentelle Beschreibung der schwachen Wechselwirkung ist CPT–invariant. Ein für die Beschreibung der Quarkmischungen notwendiger freier Parameter ermöglicht aber die Verletzung der CP–Invarianz[3].

Schon 1964 wurde im Kaon–System ein Zerfall beobachtet, der durch CP–Verletzung in der schwachen Wechselwirkung erklärt werden kann. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $2 \cdot 10^{-3}$ zerfällt das neutrale Kaon in zwei Pionen mit dem CP–Eigenwert -1 anstatt in drei Pionen mit dem CP–Eigenwert +1 [3]. Erwartet wird die CP–Verletzung auch im System neutraler B–Mesonen, wobei der Effekt hier stärker ausgeprägt erwartet wird als im Kaon–System[4]. Dieses soll im Rahmen des HERA–B–Experimentes untersucht werden.

[1] “There are only two ways to live your life. One is as though nothing is a miracle. The other is as though everything is a miracle.” – Albert Einstein

Kapitel 1

Das HERA–B Experiment

Im folgenden wird zunächst die bei HERA–B untersuchte Physik beschrieben. Anschließend folgt eine Beschreibung des HERA–Protonenspeicherrings sowie des HERA–B Detektors. Am Ende des Kapitel wird die Gliederung dieser Arbeit vorgestellt.

Am westlichen Wechselwirkungspunkt der Hadron–Elektron–Ringanlage (HERA) des Deutschen Elektronen–Synchrotrons (DESY) in Hamburg wird zur Zeit das HERA–B Experiment aufgebaut. Dieses hat sich die Messung der CP–Verletzung im B–System als primäres Ziel gesetzt. Die dafür benötigten B–Mesonen entstehen durch inelastische Proton–Nukleon–Wechselwirkungen

$$pN \rightarrow b\overline{b} + X \rightarrow B\overline{B} + X', \tag{1.1}$$

indem auf 920 GeV beschleunigte Protonen mit einem feststehenden Target[1] wechselwirken.

Bei einer Schwerpunktsenergie von etwa 40 GeV entstehen bei nur jeder 10^6–ten Wechselwirkung b–Quarks. Die übrigen Ereignisse sind als Untergrund anzusehen. Um bei diesem hohen Ereignis–zu–Untergrund Verhältnis ein Ereignis klar identifizieren zu können, muß dieses eine deutliche Signatur aufweisen. Für das Studium der CP–Verletzung bietet sich der Zerfall

$$\begin{aligned} B^0 &\rightarrow J/\psi K_S^0 \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^- && \text{(Zerfallsrate R)} \\ \overline{B^0} &\rightarrow J/\psi K_S^0 \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^- && \text{(Zerfallsrate } \overline{\mathrm{R}}\text{)} \end{aligned} \tag{1.2}$$

an. Die Leptonen aus dem J/ψ und die Pionen aus dem Kaon identifizieren diesen Zerfall eindeutig. Wegen seiner Deutlichkeit wird er auch "Der goldene Zerfall" genannt; er ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Die B und $\overline{B}$ oszillieren ineinander und besitzen den gleichen Endzustand $J/\psi K_0^S$. Dieser Zustand ist ein CP–Eigenzustand. Daher liegt eine Verletzung der CP–Invarianz vor, wenn die Zerfallsraten R und $\overline{\mathrm{R}}$ sich unterscheiden.

Da die Endzustände beider Zerfälle identisch sind, ist nicht entscheidbar, ob ein B^0 oder ein $\overline{B^0}$ zerfallen ist. Nach Gleichung 1.1 entstehen die B–Mesonen immer paarweise. Die Ladung der Zerfallsprodukte des zweiten B–Mesons kennzeichnet den Flavour des ersten. Deshalb wird das jeweils andere Teilchen als Taggingteilchen[2] zur Kennzeichnung des den "Goldenen Zerfall" induzierenden B–Mesons benutzt.

[1] Target engl., Ziel
[2] tagging engl., kennzeichnen

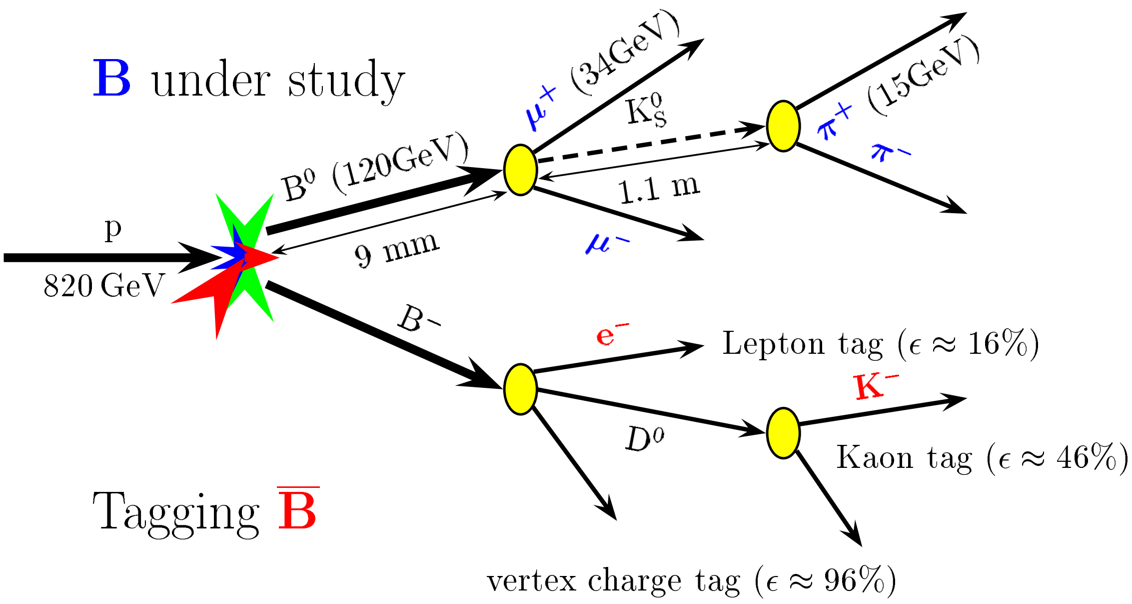

Abbildung 1.1: Der "goldene Zerfall".

Aus den Zerfallsraten der beiden B–Mesonen wird die Asymmetrie A gebildet. Aufgrund der $B - \overline{B^0}$–Oszillationen [5] ist diese flugzeitabhängig [4]:

$$A = \frac{R - \overline{R}}{R + \overline{R}} = \sin 2\beta \sin xt \tag{1.3}$$

Der Winkel β entstammt den Unitaritätsdreieck und ist nur dann von Null verschieden, wenn die schwache Wechselwirkung die CP–Invarianz verletzt. Das Unitaritätsdreieck stellt graphisch eine Bedingung[3] dar, die an die Quarkmischungsparameter gestellt werden. Der Parameter x beschreibt die $B^0 - \overline{B^0}$–Oszillation, t ist die Flugzeit des B–Mesons.

Der Wert für $\sin 2\beta$ ist nach Messung der CDF–Kollaboration am Fermilab gegeben durch[1]:

$$\sin 2\beta = 0.79^{+0.41}_{-0.44}\ (\mathrm{stat} + \mathrm{syst}). \tag{1.4}$$

Dieser Wert beinhaltet eine 95%ige Wahrscheinlichkeit, daß $\sin 2\beta > 0$ ist. HERA–B hat sich zum Ziel gesetzt, $\sin 2\beta$ mit einer Genauigkeit von etwa 0.1 zu bestimmen. Für diese Genauigkeit werden 1000 rekonstruierte "Goldene Zerfälle" benötigt. Unter Berücksichtigung der Verzweigungsverhältnisse für den "Goldenen Zerfall" und der Detektoreffizienz von etwa 10% sind 10^{11} Proton–Nukleon Wechselwirkungen nötig, um die 1000 "Goldenen Zerfälle" zu erhalten. Will man dies in einem Jahr erreichen, muß die Rate der primären Proton–Nukleon Wechselwirkungen etwa 30–40 MHz betragen.

Die Bunchfrequenz bei HERA beträgt etwa 10 MHz, so daß mit jedem Protonenbunch vier bis fünf Wechselwirkungen der Protonen mit dem Target stattfinden müssen. Die Ereignisse müssen bei jedem Bunchvorbeiflug erfaßt werden. Dazu ist eine neue Generation von Detektoren mit sehr schneller Elektronik und vielen Kanälen nötig.

[3] Unitarität der CKM–Matrix

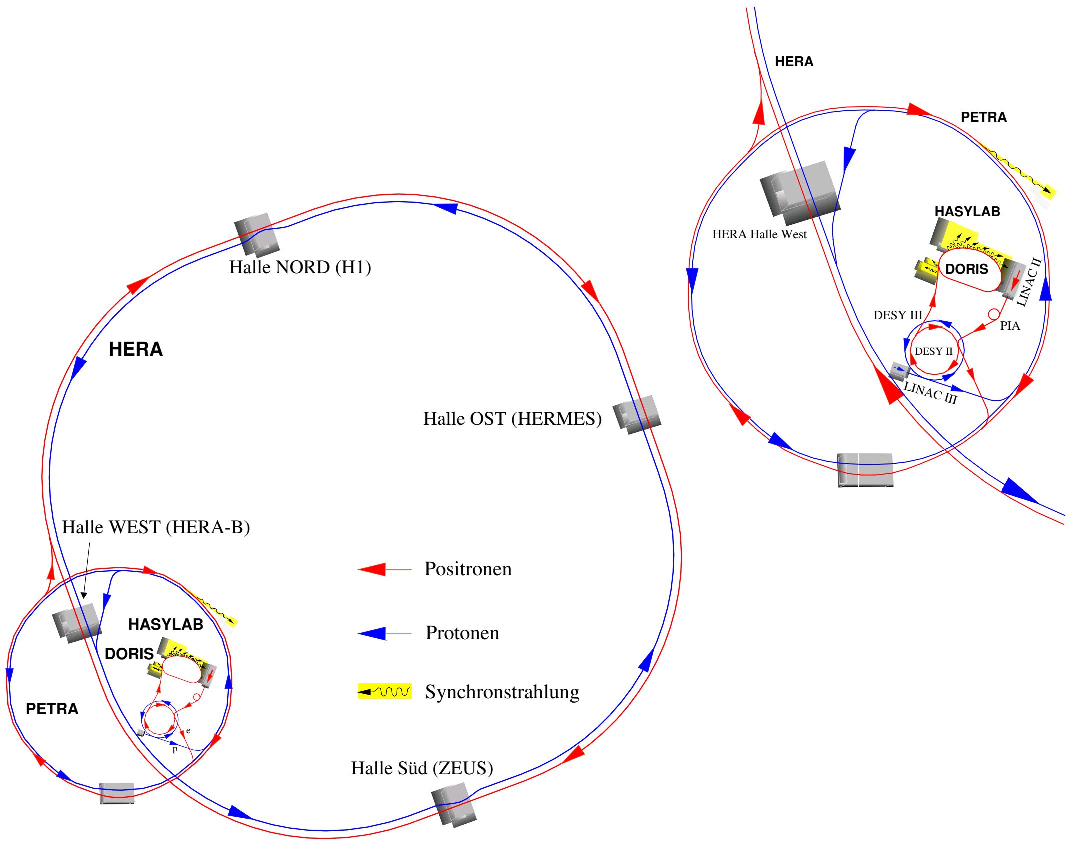

Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des HERA–Speicherrings und der Vorbeschleuniger sowie der Lage der einzelnen Experimente.

1.1 Der HERA–Speicherring

Der HERA–Speicherring hat eine Länge von 6335.8 m. In zwei Wechselwirkungszonen werden Protonen mit einer Energie von 920 GeV und Elektronen einer Energie von 27.5 GeV zur Wechselwirkung gebracht. (Abbildung 1.2). Elektronen und Protonen werden in getrennten Strahlrohren geführt. Entsprechend der geographischen Lage wird der Speicherring in die Quadranten Nord, Süd, Ost und West unterteilt. Die z–Achse des HERA–Koordinatensystems verläuft entgegen der Richtung des Protonstrahles.

Neben HERA–B in der Experimentierhalle West befinden sich am HERA–Speicherring noch drei weitere Großexperimente. Dies sind in der Experimentierhalle Nord H1, in der Halle Süd ZEUS und in der Halle Ost HERMES. Diese drei Experimente befinden sich im regulären Meßbetrieb.Die Experimente H1 und ZEUS untersuchen bei einer Schwerpunktsenergie von etwa 300 GeV tiefinelastische ep–Wechselwirkungen. Das HERMES–Experiment untersucht die Spinstruktur von Protonen und Neutronen durch die Wechselwirkungen longitudinal spinpolarisierter Elektronen mit einem polarisierten Gastarget. Bei HERA–B und HERMES werden die beschleunigten Protonen und Elektronen aneinander vorbei geführt und nicht zur Wechselwirkung gebracht. Im folgenden wird nur der für HERA–B wichtige Protonenstrahl betrachtet.

1.1.1 Der Protonenstrahl

Der Prozeß der Füllung des HERA–Speicherrings mit Protonen läuft in mehreren Schritten ab, die im nachfolgenden beschrieben werden. Die dabei verwendeten Beschleuniger und Speicherringe sind im rechten Teil der Abbildung 1.2 zu erkennen.

Zunächst werden negative Wasserstoffionen in einem Linearbeschleuniger (LINAC III) auf 50 MeV beschleunigt. Deren Elektronen werden an einer dünnen Folie abgestreift, bevor das Protonenbündel, im folgenden als Bunch bezeichnet, in den Vorbeschleuniger DESY III injiziert wird. Ein Protonenbunch besteht dabei aus $\mathcal{O}(10^{10})$ Protonen. Dieser Vorgang findet 10 mal statt, bis sich 10 Bunche in DESY III befinden, wo diese dann auf eine Energie von 7.5 GeV beschleunigt werden. Nach dem Beschleunigungsprozeß werden die 10 Bunche in den Speicherring PETRA gefüllt. Dieser Vorgang wiederholt sich sechs mal, bis sich 60 Bunche in PETRA befinden. Die Protonen dieser, im folgenden Zug genannten Füllung, werden auf 39 GeV beschleunigt und in den Speicherring HERA gefüllt. Der Speicherring HERA ist aufgeteilt in 220 Buckets genannte Hochfrequenzabschnitte im Abstand von 96 ns. Von den 220 Buckets werden mit drei Petra–Füllungen 180 mit Bunchen gefüllt und anschließend auf 920 GeV beschleunigt.

Aus dem beschriebenen Vorgang ergibt sich das in Abbildung 1.3 verdeutlichte Füllschema der Protonen im HERA–Speicherring. Am Ende jedes Zuges befinden sich je zwei Bunche, denen keine Elektronenbunche als Kollisionspartner zugeordnet sind, die sogenannten Pilotbunche. Darauf folgt zwischen zwei Zügen eine Lücke von 5 Buckets. Zwischen dem dritten und dem ersten Zug befindet sich die 15 Buckets breite Kickerlücke. In dieser Lücke kann der Protonenstrahl sicher aus dem Beschleuniger entfernt werden. Dies ist wichtig um Detektorkomponenten vor Schädigungen durch zu hohe Energiedepositionen zu schützen.

Der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn zweier aufeinanderfolgender Buckets beträgt 96 ns. Daraus ergibt sich mit 220 Buckets eine Frequenz der an einem Ort vorbei fliegenden Bunche von 10.417 MHz. Dies ist die Bunchfrequenz der so genannten HERA–Bunchclock. Die Umlauffrequenz des Strahls beträgt etwa 47.35kHz. Zur Beschleunigung des Strahls wird ein Hochfrequenzssytem der Frequenz 52 MHz eingesetzt. Die longitudinale Fokussierung der einzelnen Bunche geschieht durch ein mit 208 MHz, dem 20–fachen der Bunchfrequenz, operierendes Hochfrequenzsystem. Dadurch ergibt sich die zeitliche Länge der Bunche zu etwa 1 ns, was einer Länge von etwa 30 cm entspricht.

1.2 Der HERA–B Detektor

Der HERA–B–Detektor ist auf die Erkennung des "goldenen Zerfalls" optimiert. Die wesentlichen Anforderungen an den Detektor resultieren aus der benötigten hohen Effizienz zur Erkennung des "goldenen Zerfalls" und der hohen Wechselwirkungsrate mit der daraus folgenden großen Spurdichte und Strahlungsbelastung. Der HERA–B–Detektor ist als Vorwärtsspektrometer gebaut. Alle Detektorkomponenten befinden sich also hinter dem Target, in Flugrichtung des Protonenstrahls und des Großteils der Reaktionsprodukte der inelastischen Wechselwirkungen. Der HERA–B Detektor ist in Abbildung 1.4 schematisch dargestellt [33].

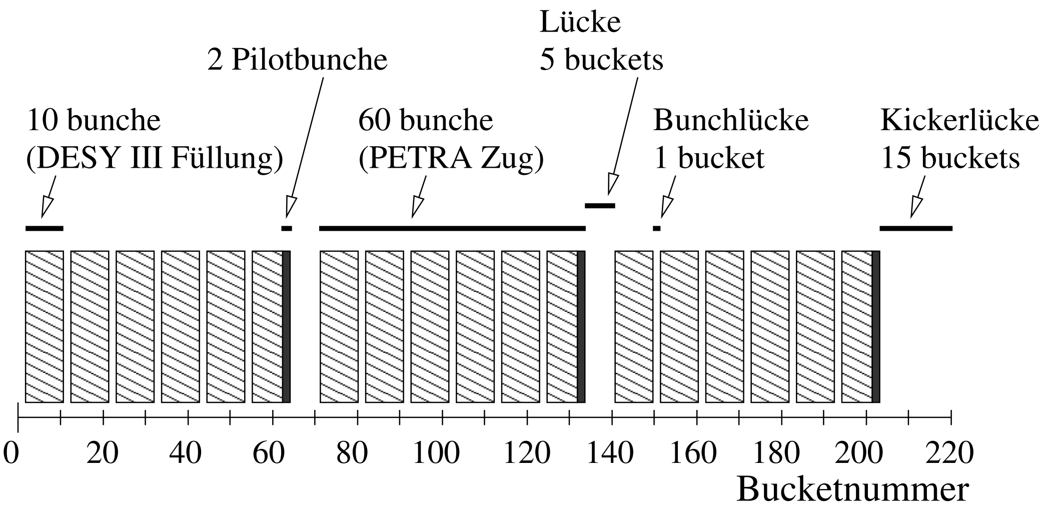

Abbildung 1.3: Das Füllschema des Protonenstrahls.

Um den "goldenen Zerfall" zu erkennen, müssen Elektronen[4], Myonen, Pionen und Kaonen identifiziert sowie deren Zerfallsorte und Massen bestimmt werden. Die für die Bestimmung der Asymmetrie (Gleichung 1.3) notwendige Flugzeit der B–Mesonen berechnet sich aus der Entfernung des Zerfallsvertex[5] des B^0 zum Target. Dieser Vertex wird mit Hilfe eines Silizium–Streifendetektors , dem Vertexdetektor (VDS[6]), bestimmt. Die Informationen der Spurkammersysteme erlauben die Rekonstruktion der Teilchenspuren. In der Nähe des Strahlrohres befindet sich das innere Spurkammersystem (ITR[7]). Dieses hat die für die hier auftretende hohe Teilchendichte notwendige Auflösung. Den restlichen Akzeptanzbereich bis zu einem Winkel von etwa 250 mrad zum Strahlrohr deckt das äußere Spurkammersystem (OTR[8]) ab. Ein Dipolmagnet erlaubt die Bestimmung des Impulses geladener Teilchen. Im elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL[9]) werden Elektronen identifiziert. Das ECAL ist in drei Bereiche aufgeteilt, die sich in der Feinheit der Segmentierung unterscheiden. Der innere Bereich des ECAL, in der Nähe des Protonenstrahlrohrs, ist am feinsten segmentiert, da in der Nähe des Strahlrohrs die höchste Teilchendichte herrscht. Die Trennung von Elektronen und Hadronen geschieht dort zusätzlich durch den Übergangsstrahlungsdetektor (TRD[10]). Ein Čerenkov–Zähler (RICH[11]) erlaubt eine Trennung von Kaonen und Pionen. Myonen werden im Myonsystem identifiziert.

[4]Die Benennung von Teilchen schließt im folgenden, falls nicht anders erwähnt, auch das entsprechende Antiteilchen ein.
[5]Vertex, gemeinsamer Ursprungsort zweier oder mehrere Teilchenspuren
[6]VDS: Vertex Detector Silicon
[7]ITR: Inner Tracker
[8]OTR: Outer Tracker
[9]ECAL: Electromagnetic Calorimeter
[10]TRD: Transition Radiation Detektor
[11]RICH: Ring Imaging Čerenkov Counter

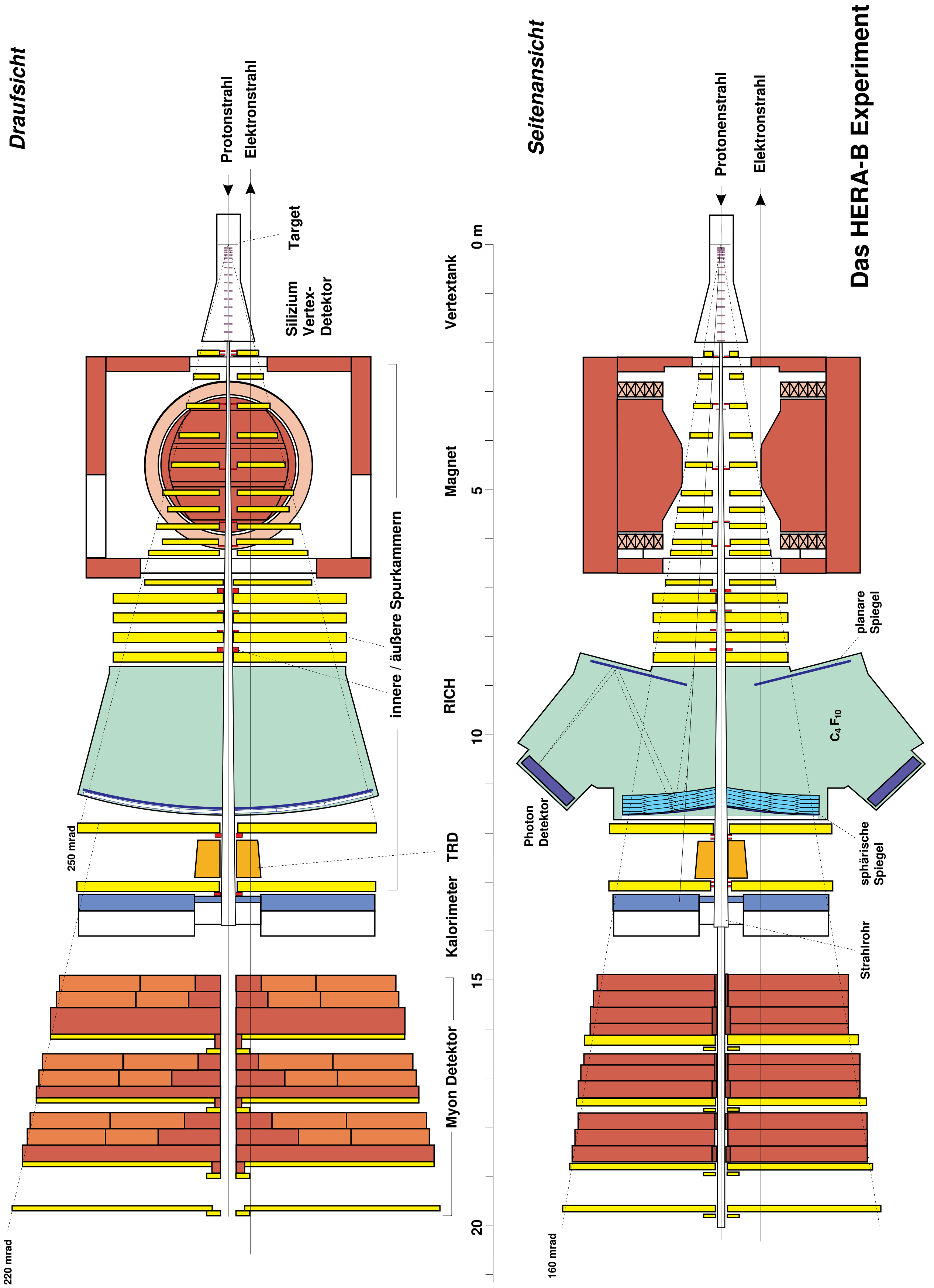

Abbildung 1.4: Der HERA–*B*–Detektor.

1.3 HERA–B Datennahme und Trigger

Der HERA–B Detektor besteht aus ungefähr 500.000 Auslesekanälen, die alle 96 ns ausgelesen werden müssen. Als grobe Abschätzung ergibt dies bei mindestens 1 Byte großen Informationen pro Kanal eine Datenrate von etwa 5 TByte[12] pro Sekunde. Da hierbei nicht jedes Ereignis genau untersucht werden kann, sind einfache Signaturen zur Erkennung interessanter Ereignisse nötig. Dies sind nur selten auftretende Myonen, im ECAL nachgewiesene Elektronen und Spuren mit hohem Transversalimpuls innerhalb des Magneten. Diese Signaturen werden, im Gegensatz zu anderen Experimenten, nicht durch eine kontinuierlich arbeitende erste Triggerstufe (FLT[13]), sondern durch sogenannte Pretrigger[14] detektiert. Findet ein Pretrigger in einem Ereignis eine der Signaturen, benachrichtigt dieser den FLT, um das Ereignis durch die verschiedenen Triggerstufen untersuchen zu lassen.

Zur Reduktion der großen Datenmenge ist das HERA–B Triggersystem vierstufig aufgebaut (Abbildung 1.5). Die Datenrate entspricht nach der Reduktion nur noch einem $^1/_{500000}$ der Eingangsrate, dies sind etwa 10 MByte pro Sekunde. Durch die schrittweise Reduktion der Datenrate steht auf jeder Triggerstufe mehr Zeit zur Rekonstruktion des Ereignisses zur Verfügung als auf der vorherigen, wodurch immer feinere Kriterien zur Erkennung interessanter Ereignisse zum Einsatz kommen können. Aufgrund der unterschiedlichen Ereigniskomplexität treten unterschiedlich schnell zu rekonstruierende Ereignisse auf. Die gesamten Detektordaten werden erst in einer der höheren Triggerstufen zu einem Gesamtereignis zusammengefügt. Die einzelnen Daten durchlaufen bis dort verschiedene Wege und müssen, um anschließend zu einem Ereignis zusammengesetzt werden zu können, eindeutig durch eine Ereignisnummer gekennzeichnet werden. Im folgenden Abschnitt wird die HERA–B Datennahme kurz beschrieben.

1.3.1 Implementierung der HERA–B Datennahme

In Abbildung 1.6 ist schematisch das HERA–B Trigger– und Datensystem dargestellt. Die Auslesekarten(FED[15]) verarbeiten die direkt aus dem Detektor stammenden Signale. Im Falle des ECAL verstärken und digitalisieren sie diese. Für Tests können auf den Front–End–Drivern im Simulationsmodus Testpulse erzeugt werden. Die Front–End–Driver des Kalorimeters verarbeiten pro FED–Karte 32 Zellen des Kalorimeters und bestehen deshalb aus 32 Analog–Digital–Konvertern (ADC[16]). Zudem werden die Daten bis zur Weiterleitung an den Speicher der zweiten Triggerstufe(SLB[17]) zwischengespeichert. Von den Front–End–Drivern gelangt ein Teil der Daten in die Pretrigger und, nach einer positiven Triggerentscheidung, in den First–Level–Trigger. Dies kann durch ein Veto –Signal für Ereignisse hoher Multiplizität verhindert werden. Das Veto–Signal wird anhand der gesamten Energiedeposition im inneren Teil des Kalorimeters durch die ECAL Energy Inhibit (EEI[18]) Karte gebildet.

[12] 5 TByte $\approx 10^9$ einseitig bedruckten DIN–A4 Seiten
[13] FLT: First Level Trigger
[14] Pretrigger: Triggerelektronik mit einfachen, und daher schnellen, Entscheidungskriterien
[15] FED: Front–End–Driver
[16] ADC: Analog to Digital Converter
[17] SLB: Second–Level–Buffer
[18] EEI: ECAL Energy Inhibit

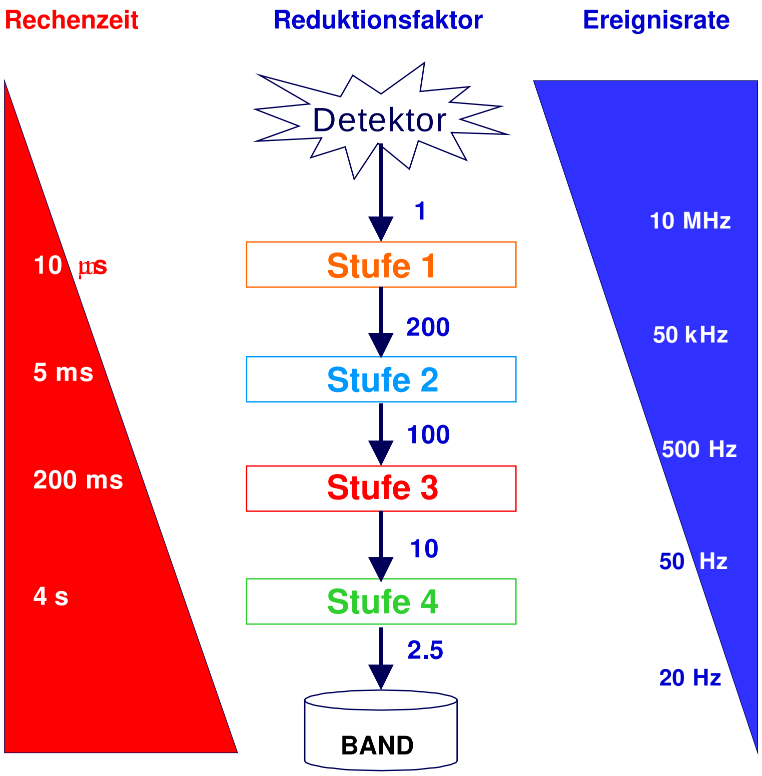

Abbildung 1.5: Darstellung der Reduktion der Ereignisrate unter gleichzeitiger Erhöhung der Rechenzeit pro Ereignis in den vier Triggerstufen.[28]

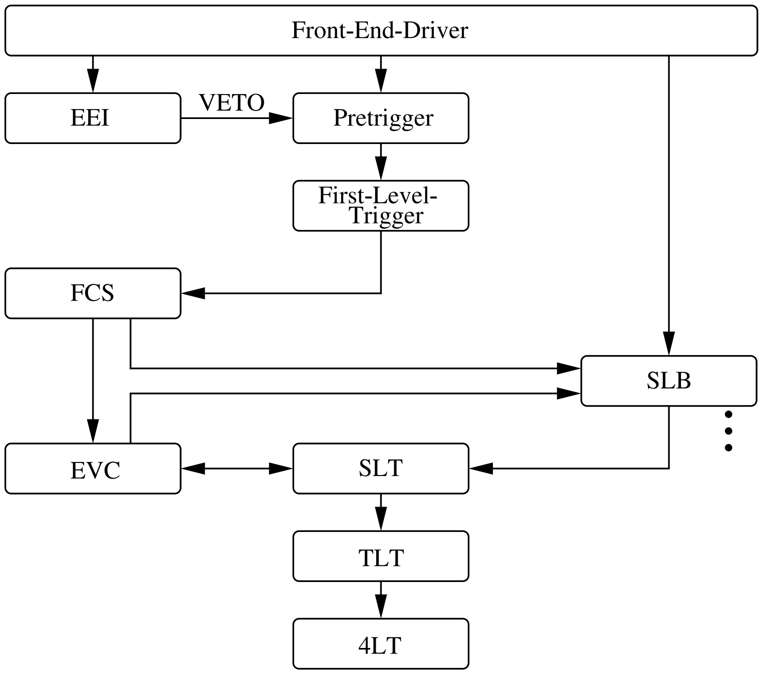

Abbildung 1.6: Schematische Darstellung des HERA–*B* Trigger– und Datensystems.

Im FLT wird das Ereignis auf interessante Signaturen hin untersucht, ohne die Ereignistopologie zu berücksichtigen. Akzeptiert der First–Level–Trigger das Ereignis, wird dies dem schnellen Kontrollsystem der Datennahme (FCS[19]) mitgeteilt. Dieses teilt daraufhin allen Detektorkomponenten die Triggerentscheidung mit, markiert die Daten mit einer Ereignisnummer und läßt sie in die Datennahmekette einfließen. Dies geschieht durch Informieren der Second–Level–Buffer (SLB), daß die entsprechenden Daten aus den Front–End–Driver ausgelesen werden können. Die Ereigniskontrolle (EVC[20]) weist den Second–Level–Buffern einen Rechner der zweiten Triggerstufe (SLT[21]) zu. Der SLT–Prozeß untersucht das Ereignis und fordert bei einer positiven Entscheidung die restlichen Daten des Ereignisses aus den Second–Level–Buffern an. Die dritte Triggerstufe (TLT[22]) bearbeitet das Ereignis und teilt dem Event–Controller mit, daß die zugehörigen Daten aus den Second–Level–Buffern gelöscht werden können. Bevor die Daten eines Ereignisses auf Band gespeichert werden können, müssen diese noch durch die vierte Triggerstufe (4LT[23]) akzeptiert werden.

1.4 Ziele dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die zweite Generation der ECAL Front–End–Driver sowie der Prototyp der ECAL Energy Inhibit Karte in Betrieb genommen und getestet. Weiterhin wurden die Anforderungen an diese Komponenten zur Bestimmung der Wechselwirkungsrate untersucht.

Im folgenden Kapitel wird das HERA–*B* Target mit seinen Anforderungen dargestellt. In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Messungen und Targetstudien aus dem Jahre 1998 präsentiert, um die Notwendigkeit eines leistungsfähigen Ratenmeßsystems zu begründen. Weiterhin wird gezeigt, wie wichtig ein auf Bunchniveau operierendes System zur Untersuchung der Wechselwirkungsrate ist. Das ECAL als Bestandteil eines solchen Systems wird in Kapitel 3 vorgestellt. Das Prinzip des HERA–*B* Triggersystems sowie der Datenerfassung werden in Kapitel 4 beschrieben. Daran anschließend folgt eine Beschreibung sowie die Darstellung der Möglichkeiten der ECAL Energy Inhibit Karte, dem Herzstück der Ratenmessung mit dem ECAL, in Kapitel 5.

In den Kapiteln 6 und 7 werden die vorbereitenden Untersuchungen an den ECAL Front–End–Drivern und der ECAL Energy Inhibit Karte gezeigt und die Ergebnisse beschrieben. Der Betrieb der ersten Stufe der ECAL Elektronik und die dafür entwickelte Prozedur werden in Kapitel 8 vorgestellt. Den Abschluß der Arbeit bildet eine Zusammenfassung, die die Einsatz– und Leistungsfähigkeit der EEI–Karte im HERA–*B* Experiment beurteilt.

[19]FCS: Fast Control System
[20]EVC: Event Controll
[21]SLT: Second Level Trigger
[22]TLT: Third Level Trigger
[23]4LT: Fourth Level Trigger

Kapitel 2

Das HERA–B Target

Das Target ist eine der wesentlichen Komponenten des HERA–B Experimentes.

Zunächst wird in diesem Kapitel das Funktionsprinzip des Targets vorgestellt und die Anforderungen an das Target beschrieben. Im weiteren folgen die Beschreibungen der verwendeten Zähler, der Elektronik und des Verfahrens zur Wechselwirkungsratenbestimmung. Weiterhin wird auf die für das HERA–B–Experiment wichtigen Punkte der Ratenstabilität eingegangen. Den Abschluß des Kapitels bildet ein Abschnitt über Bunchstrukturuntersuchungen sowie die Beschreibung eines perfekten Strahl– und Targetmonitoringsystems mit einer Diskussion der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme. Die in diesem Kapitel aufgeführten Erfahrungen mit dem Targetbetrieb im Jahr 1998 dienen als Grundlage für die an den Einsatz der ECAL–Energy–Inhibit–Karte gestellten Anforderungen. Anhand dieser Anforderungen wird in den weiteren Kapiteln die Leistungsfähigkeit eines auf dem ECAL basierenden Systems beurteilt.

2.1 Funktionsprinzip des Targets

Das HERA–B–Target besteht aus acht Drähten, die auf zwei hintereinandersitzenden Stationen um den Protonenstrahl herum angeordnet sind. Die Drähte können unabhängig voneinander auf den Strahl zu oder von ihm weg bewegt werden. In Abbildung 2.1 sind die Anordnung und die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Drähte dargestellt.

Die Drähte bestehen aus dünnen Folien, die so eingesetzt werden, daß die Abmessungen entlang des Protonenstrahls 500 μm, transversal zum Strahl 50 μm betragen. Bei dem aus einzelnen Fasern bestehendem Kohlenstoff–Target sind die Abmessungen weniger genau. In Tabelle 2.1 sind die 1998 benutzten Materialien aufgelistet.

Werden die Drähte zur Erzeugung von Wechselwirkungen eingesetzt, befinden sie sich etwa 4 bis 6 Strahl–σ vom Strahlmittelpunkt entfernt, wobei ein Strahl–σ etwa 350 nm entspricht.

Um die benötigte Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu erzeugen, ist die Anzahl der Protonen, die den Strahl durch natürliche Diffusion verlassen, nicht ausreichend. Die natürliche Lebensdauer τ_{nat} des Protonenstrahls beträgt typischerweise ohne Targetbetrieb etwa 1000 Stunden, der Protonenstrom $I_p \approx 80\ mA$. Mit der Umlauffrequenz $f_{Umlauf} \approx 47.35\ kHz$

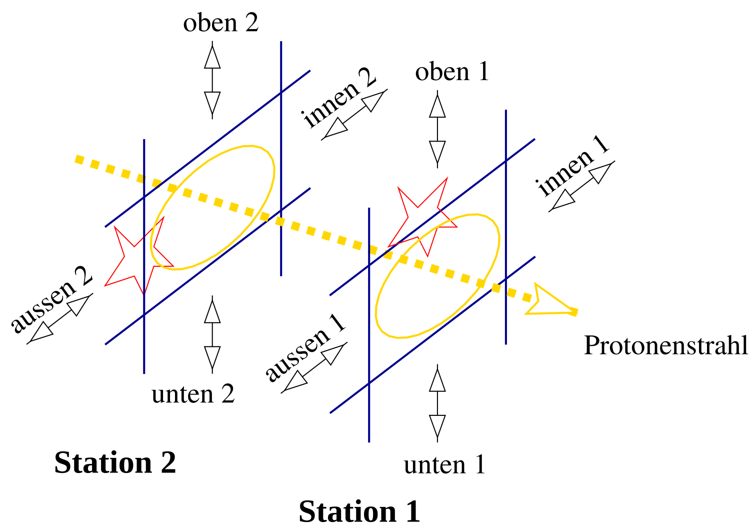

Abbildung 2.1: Anordnung der Targetdrähte. Die möglichen Bewegungsrichtungen der einzelnen Drähte sind durch die schwarzen Pfeile angedeutet, an denen sich auch die Bezeichnung des entsprechenden Drahtes befindet.

Draht	Material
innen 1	Aluminium
innen 2	Kohlenstoff–Bündel
außen 1	Aluminium
außen 2	Titan
oben 1	Aluminium
oben 2	Eisen
unten 1	Titan
unten 2	Eisen

Tabelle 2.1: Materialien der 1998 verwendeten Targetdrähte.

ergibt sich hier die natürliche Verlustrate zu

$$R_{Verlust} = \frac{I_p}{e} \frac{1}{\tau_{nat}} \frac{1}{f_{Umlauf}} \approx 2.9\,\mathrm{MHz} \tag{2.1}$$

Die Diffusion der Protonen aus dem Kern in den Halo[1] ist in Abbildung 2.2 (links) verdeutlicht. Die als Pfeile dargestellten Protonen verlassen den Strahlkern und treffen, falls sie nicht vorher mit einem Targetdraht wechselwirken, auf eine Aperturgrenze[2]. In Abbildung 2.2 (rechts) ist vereinfacht die Protonendichte ρ für die Fälle mit und ohne Draht als Funktion der Betatronamplitude S gezeigt[3]. Zu erkennen ist das starke Absinken der Protonendichte am Ort der Protonwechselwirkung im Target. Diese sinkt allerdings nicht am Ort des Targetdrahtes, sondern erst an der Aperturgrenze auf Null ab, das heißt nur ein Teil der

[1]Halo: besteht aus nicht mehr stabil umlaufenden Protonen
[2]Apertur: Begrenzung, an der gespeicherte Teilchen verlorengehen.
[3]Der Abstand zum Strahlmittelpunkt in Einheiten von Strahlsigma ist proportional zur Betatronamplitude S.

am Targetdraht vorbeikommenden Protonen wechselwirken dort auch inelastisch. Dies läßt

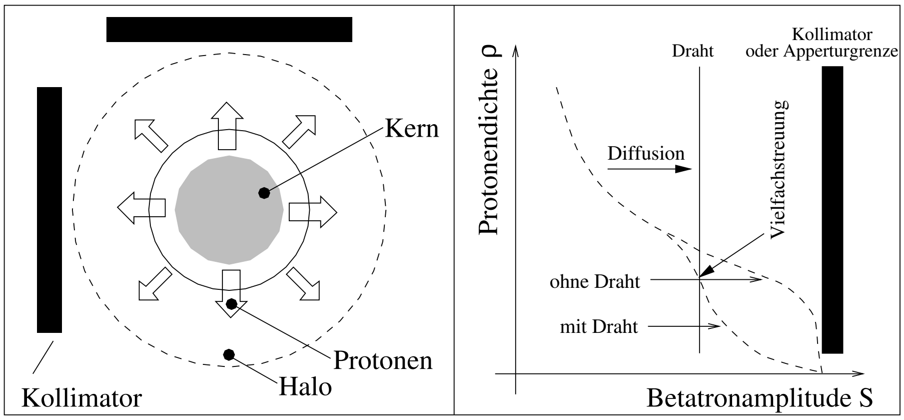

Abbildung 2.2: Links: Diffusion der Protonen aus dem Strahlkern in den Halo. Die Aperturgrenzen sind hier durch Kollimatorbacken dargestellt. Rechts: Die Protonendichte ρ mit und ohne Targetdraht als Funktion der Betatronamplitude S.

sich durch die Targeteffizienz ϵ_T genannte Wahrscheinlichkeit beschreiben, daß ein Proton mit dem Targetdraht wechselwirkt und nicht auf der Aperturgrenze verlorengeht. ϵ_T ist das Verhältnis aus Wechselwirkungsrate R_{WW} und Protonenverlustrate $R_{Verlust}$:

$$\epsilon_T = \frac{R_{WW}}{R_{Verlust}}, \tag{2.2}$$

Eine genauere Beschreibung findet sich in [11]. Mit einer realistisch gewählten Targeteffizienz von $\epsilon_T \approx 0.6$[11] ergibt sich die notwendige Verlustrate zu

$$R_{Verlust} = \frac{R_{WW}}{\epsilon_T} \approx 67\,\mathrm{MHz}, \tag{2.3}$$

um die geforderte Wechselwirkungsrate von $R_{WW} = 40\ MHz$ zu erzielen. Diese Verlustrate bewirkt nach Gleichung 2.1 eine Lebensdauer τ_{target} des Protonenstrahls von

$$\tau_{target} = \frac{I_p}{e}\frac{1}{R_{Verlust}}\frac{1}{f_{Umlauf}} \approx 42\,\mathrm{h}. \tag{2.4}$$

Das Target muß also die Lebensdauer des Protonenstrahls erniedrigen. Dies geschieht indem die zur Wechselwirkungsrate beitragenden Protonen aus dem Strahl “herausgekratzt” werden (sogenanntes scraping–Modell). Der dadurch schmaler werdende Protonenstrahl bedingt eine kontinuierliche Annäherung des Targets an das Strahlzentrum von $\mathcal{O}(10...100^{\mu m}/_{h})$[6].

2.2 Anforderungen an das Target

Die Anforderungen an das im HERA–B Experiment eingesetzte Target sind motiviert durch den Wunsch, einen möglichst hohen Produktionsquerschnitt für B–Mesonen unter optimaler

Ausnutzung des Detektors und des Protonenstrahls zu erzielen. Zugleich darf die Sicherheit und Runeffizienz der anderen am HERA Speicherring befindlichen Experimente nicht beeinflußt werden. Hieraus resultieren die folgenden Anforderungen:

- Ein sicherer Betrieb muß gewährleistet sein. Insbesondere ein Verlust des HERA–Protonstrahls durch die Einwirkung des Targets muß ausgeschlossen werden.
- Eine hohe Runeffizienz muß erreicht werden, um die notwendige Statistik für die Bestimmung der CP–Verletzung zu erhalten. Dazu ist ein kontinuierlicher Targetbetrieb während 10^7 s/Jahr notwendig.
- Die erforderliche Wechselwirkungsrate von 5 Wechselwirkungen pro Bunch (entspricht 40 MHz) muß möglichst konstant sein, um die optimale Effizienz des Detektors nutzen zu können. Zu viele gleichzeitige Wechselwirkungen können nicht rekonstruiert werden und bilden durch Spikes[4] die Gefahr von Strahlenschäden, zu wenig Wechselwirkungen liefern nicht die erforderliche Statistik.
- Die Wechselwirkungen müssen mit dem Protonenfüllschema korreliert sein, in den Lücken zwischen den einzelnen Protonenbündeln dürfen keine Wechselwirkungen stattfinden. Die Effizienz des Detektors verlangt die Wechselwirkungen innerhalb einer Nanosekunde mit der HERA–Bunchperiode von 96 ns.
- Die Targeteffizienz, also das Verhältnis der Anzahl der zur Wechselwirkung gebrachten Protonen zu der Anzahl der dem Strahl verlorengegangen Protonen, muß groß genug sein, damit die Lebensdauer des Protonenstrahls nicht weiter als unbedingt notwendig durch den Targetbetrieb reduziert wird. Ein $\epsilon_T > 50\%$ wird angestrebt.
- Um die Rekonstruktion des primären Zerfallsortes zu erleichtern, müssen die gleichzeitig stattfindenden Wechselwirkungen räumlich voneinander getrennt sein. Aus diesem Grund besteht das Target aus acht Drähten, über die die Wechselwirkungen gleichverteilt sein sollen.
- Untergrunderhöhungen bei den anderen HERA–Experimenten als auch wesentliche Verringerung der für H1 und ZEUS wichtigen ep–Luminosität müssen vermieden werden, um die Runeffizienz dieser Experimente nicht mehr als notwendig zu verringern.

2.3 Ratenbestimmung

Die Kenntnis der Wechselwirkungsrate ist für das HERA–B–Experiment von großer Bedeutung. Die Wechselwirkungsrate wird für die Steuerung der Targetdrähte, die Bestimmung der Luminosität, die Untersuchung des Protonenstrahls und die Optimierung der Targetoperationen benutzt. Durch die unterschiedlichen Anwendungsgebiete ergeben sich verschiedene Anforderungen an die zu zählende Rate. Diese sind im einzelnen[12]:

- für die Targetsteuerung:

[4] Spike: kurzzeitiges Auftreten extrem hoher Wechselwirkungsraten

  - Es wird keine extrem hohe Präzision benötigt, die Rate muß allerdings zuverlässig und totzeitlos auch bei hohen Raten gezählt werden können. Die gesamte Akzeptanz[5] der verwendeten Zähler sollte oberhalb von 1% liegen, um eine ausreichende Statistik in dem zur Messung zur Verfügung stehenden Zeitraum zu erreichen, andererseits muß die Akzeptanz der einzelnen Zähler klein genug sein, daß zum Beispiel die Photomultiplier nicht in Sättigung gehen.
  - Es muß eine Information über die Verteilung der Wechselwirkungsrate über die Drähte geben, um die gleichzeitige Steuerung mehrerer Drähte zu ermöglichen.

- für die Luminositätsbestimmung:
  - Für Alterungstests und die Bestimmung von Belegungsdichte und Kammerströme anderer Subdetektoren ist eine Genauigkeit der gemessenen Rate von $\approx 10\%$ ausreichend, ein streng monotones, weitgehend lineares Verhalten der Rate ist aber essentiell notwendig.
  - Für Wirkungsquerschnittmessungen ist eine genaue Kenntnis der Luminosität und der erzeugten Rate notwendig.

- für Strahlmonitoring und Optimierung der Targetoperation:
  - Für die Untersuchung der zeitlichen Verteilung der Wechselwirkungen, Ratenfluktuationen und variierender Bunchbeiträge sind Zähler mit einer guten zeitlichen Auflösung (d.h. $\leq 1\ ns$) notwendig. Es wird eine möglichst hohe Akzeptanz angestrebt, um eine hohe Statistik für Detailuntersuchungen der Wechselwirkungsrate zu erhalten.
  - Für die Messung des vorhandenen und durch den Targetbetrieb produzierten Untergrunds sind Zähler nicht zu kleiner Akzeptanz in der Nähe des Strahlrohrs notwendig, um auch Untergrundraten $\mathcal{O}(kHz)$ mit ausreichender Statistik messen zu können.

Die Ratenbestimmung erfolgte 1998 durch Szintillatoren und das so genannte Target–Monitoring–System (TMS). Beide Systeme werden im folgenden beschrieben.

2.3.1 Die Szintillationszähler

Die 1998 benutzten Szintillatoren sind einerseits die Triggerzähler[6] und andererseits die Hodoskopzähler, die sich vor allem durch ihre geometrische Akzeptanz unterscheiden. In Abbildung 2.3 ist eine Übersicht über die verwendeten Szintillationszähler und ihren Positionen innerhalb des Experimentes gegeben. Die Triggerzähler bestehen aus 4 um das Protonenstrahlrohr angeordnete Zählerpaare und befinden sich im Eintrittsfenster des Magneten, direkt hinter dem Vertextank an der Position z=2195mm. Die große geometrische Akzeptanz von etwa 20% pro Zählerpaar gestattet es, Wechselwirkungsraten bis etwa 10 MHz mit

[5] Akzeptanz, hier: Wahrscheinlichkeit, eine inelastische Proton–Target–Wechselwirkung in einem Zähler festzustellen.

[6] aufgrund der Anordnung auch Triggerring genannt

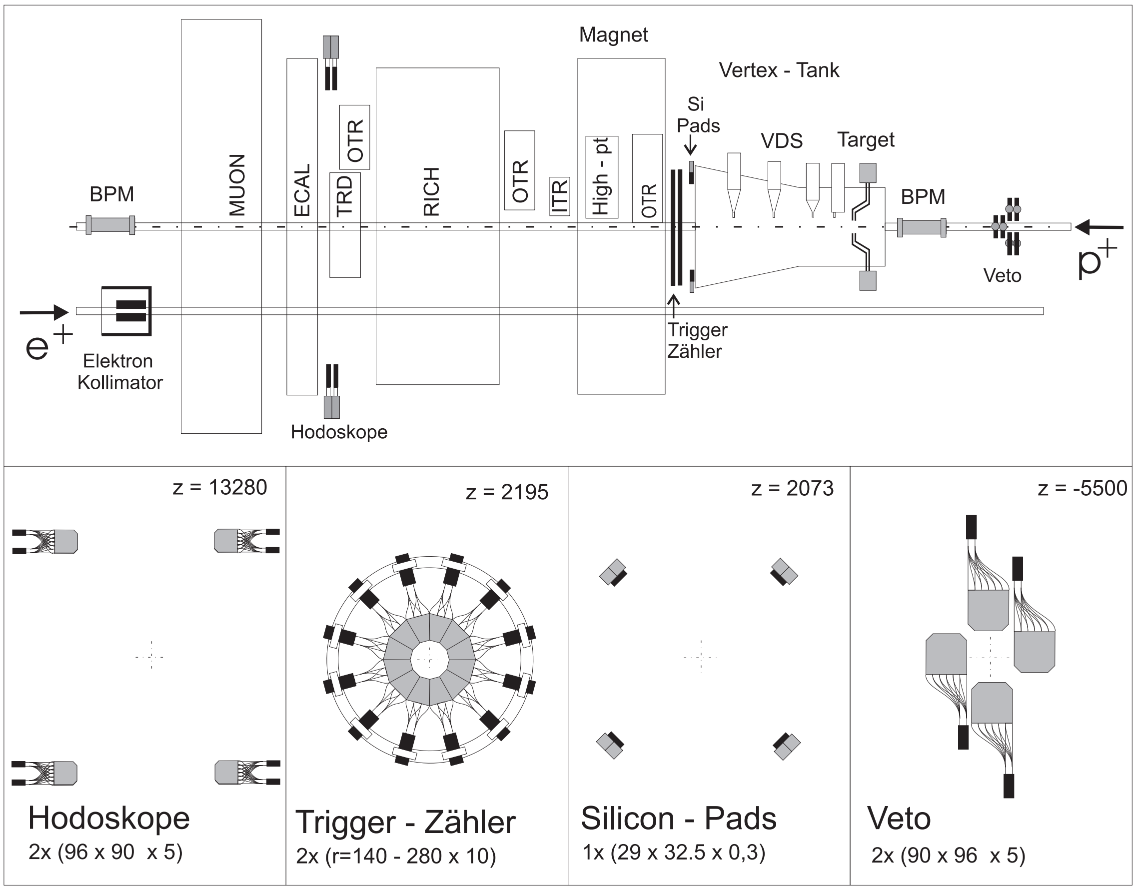

Abbildung 2.3: Übersicht der 1998 verwendeten Szintillationszähler und deren Position im HERA–B–Experiment.

diesen Zählern gut zu messen, bei höheren Raten gehen die verwendeten Photomultiplier in Sättigung, und die Zähler können in diesem Bereich nicht mehr zur Ratenmessung benutzt werden. Um die Sättigung der Zähler schon bei niedrigeren Raten zu vermeiden, ist der Triggerring in 12 Segmente unterteilt und besitzt daher eine feine Granularität. Da die achte Superlage des Vertexdetektors an der Position des Triggerrrings eingebaut wurde, mußte der Triggerring vor Beginn des Jahres 1999 entfernt werden. Damit fehlt nun ein System zur genauen Messung niedriger Raten und zur Kalibration von Zählern kleiner Akzeptanz.

Die Hodoskope bestehen aus vier Zählerpaaren. Die Abmessungen der Szintillatoren beträgt 90 $mm \times 96$ mm. Die Ratenbestimmung und Targetsteuerung basieren allein auf diesen Zählern. Die Hodoskopzähler wurden im März 1998 von ihrer Position zwischen OTR und TRD aus Platzmangel an das elektromagnetische Kalorimeter verlegt. Sie befinden sich nun horizontal angeordnet in den vier Ecken des Kalorimeter–Halterahmens an den Positionen $x = \pm 3100$ mm, $y = \pm 900$ mm und $z = 13250$ mm. Die geringe geometrische Akzeptanz von $\approx 0.15\%$ pro Zähler verhindert die Sättigung der Photomultiplier selbst bei hohen Raten. Dadurch ist ein stabiler Betrieb auch bei Raten bis zu ≈ 1 GHz möglich; bis zu einigen 100 MHz ist das Ratenverhalten für die Steuerung ausreichend linear. Für das Jahr 1998 kann die Akzeptanz mit einer Genauigkeit von $\approx 10\%$ angegeben werden. Da zwischen Target und Hodoskopen weitere Detektorkomponeneten eingebaut und Vertexdetektorzähler bewegt wurden, Zähler großer Akzeptanz zur Kalibration jedoch fehlen (Kapitel 2.3.5), ergibt sich für den Wert der Akzeptanz 1999 eine größere Unsicherheit. Aufgrund des Platzbedarfs neuer OTR–Triggerkammern werden diese Zähler im Laufe des Jahres 1999 entfernt und an den RICH–Tank verlegt.

Die Vetozähler bestehen aus vier um das Strahlrohr herum angebrachten Zählerpaaren und befinden sich in Protonrichtung gesehen etwa 5 m vor dem Target, um keine direkten Targetwechselwirkungen zu messen. Sie dienen der Messung des Untergrunds. Hierbei unterscheidet man zwischen dem natürlichen, in HERA vorhandenen Untergrund, und dem durch Targetbetrieb induzierten Untergrund. Der von HERA stammende, beobachtete Untergrund ist von der Stellung der Kollimatoren sowie der Strahlqualität abhängig, der targetinduzierte Untergrund wird durch unter großem Winkel elastisch gestreute Protonen hervorgerufen.

2.3.2 Das Target–Monitoring–System

Das Target–Monitoring–System besteht aus drei Komponenten: den Ladungsintegratoren, den Silizium–Teleskopen und den Silizium–Pads. Benutzt wurden 1998 nur die Ladungsintegratoren. Die Silizium–Teleskopen und die Silizium–Pads werden aufgrund von Strahlenschäden und zu kleiner Akzeptanz nicht weiter eingesetzt. Das Funktionsprinzip der Ladungsintegratoren ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt. Durch Wechselwirkungen

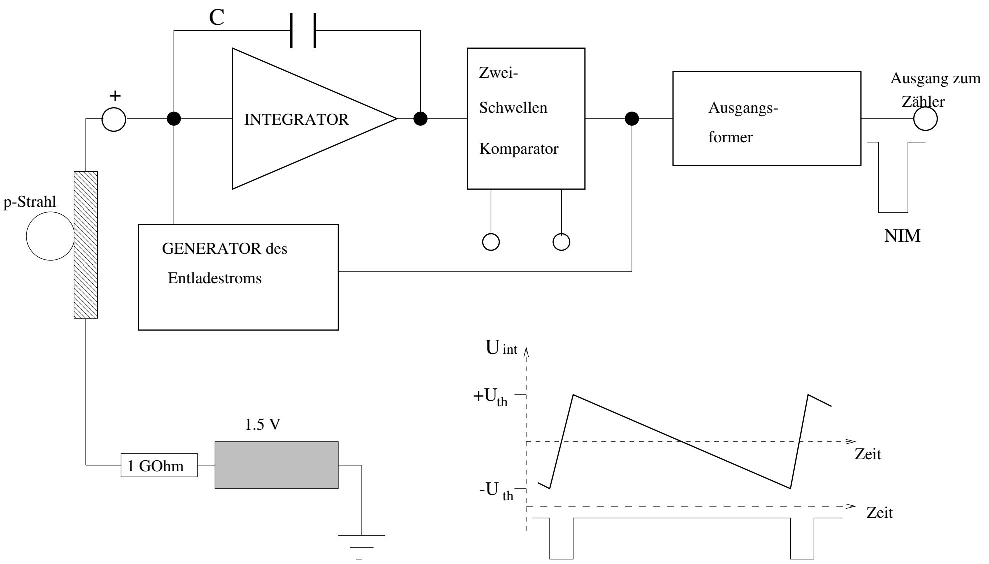

Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Funktionsprinzip der Ladungsintegratoren

der Protonen mit dem Drahtmaterial werden in diesem Delta–Elektronen erzeugt[7] [14]. Der dadurch erzeugte Strom wird integriert. Die Ausgangsspannung des Ladungsintegrators wird mit zwei Schwellen verglichen. Der Beginn der Integration bei der unteren Spannungsschwelle und das Ende der Integration bei der oberen Schwelle stellen gleichzeitig Beginn und Ende des erzeugten Ausgangssignals dar. Die Frequenz des Ausgangssignals ist somit proportional

[7]Ein endgültiger Beweis dafür, daß der Strom durch Delta–Elektronen hervorgerufen wird, existiert nicht. Das Vorzeichen der erzeugten Stroms spricht aber gegen die Erzeugung durch Proton–Kern–Wechselwirkungen.

dem Strom und damit der Wechselwirkungsrate und beträgt etwa $40^{Hz}/_{MHz}$. Durch eine Batterie gespeist wird dauerhaft ein Strom von 1.5 nA durch die Drähte geleitet, dem der durch Wechselwirkungen erzeugte Strom überlagert wird. Dadurch erhält man eine Nullpunktverschiebung der Frequenz von etwa 400 Hz[14] und eine Kontrolle der Funktionsfähigkeit des Systems. Die Sensitivität, d.h. daß Verhältnis der von den Ladungsintegratoren erzeugten Frequenz zu der Wechselwirkungsrate, beträgt etwa 10^{-5}. Aktiv benutzt werden die Daten der Ladungsintegratoren für die gleichzeitige Steuerung mehrerer Targetdrähte im Routinebetrieb, da aus der Relation der gemessenen Werte der Beitrag eines einzelnen Drahtes zur Wechselwirkungsrate bestimmt werden kann. Drähte mit einem geringen Anteil an der Wechselwirkungsrate werden zum Strahl hin bewegt.

2.3.3 Die Elektronik

Die Analogsignale der einzelnen Zähler werden über $\approx 50\ m$ lange Kabel in die Elektronikhütte geleitet und dort verarbeitet. Aus den verstärkten Analogsignalen werden zunächst mit Hilfe von Diskriminatoren Digitalsignale generiert. Überschreitet ein Analogsignal eine über dem Untergrund liegende Schwelle von 50 mV, so wird ein Digitalsignal von 40 ns Länge erzeugt. Diese Signale werden für die hintereinander liegenden Zähler eines Zählerpaares mit einem logischen UND verknüpft und daraus mittels einer ODER–Verknüpfung für die Zählerpaare einer Zählergruppe eine Rate gebildet. Die Verknüpfung der Triggerzählersignale (x1 bis x4) wird ALL–Rate, die der Hodoskopsignale (H1 bis H4) F1–Rate genannt.

Die gebildeten Raten werden von sogenannten VME–Scalern[8] gezählt. Aus der Anzahl der gezählten Signale und der mit der HERA–Bunchclock ermittelten Zeitdifferenz zur vorherigen Messung wird die Rate gebildet. Diese Ratenmessung findet üblicherweise alle 0.1 s statt. Die Trägheit der Targetmechanik macht eine schnellere Steuerung und damit eine häufigere Ratenmessung unnötig, zudem ist die serielle Schnittstelle der zur Steuerung der Targets verwendeten Kontrolleinheit durch das verwendete Netzwerkprotokoll mit einer Frequenz von 10 Hz fast ausgelastet. Mit Messungen im Abstand von 100 ms erhält man auch für kleine Raten von etwa 1 MHz einen statistischen Fehler der Größenordnung $\mathcal{O}(1\%)$.

2.3.4 Bestimmung der Wechselwirkungsrate

Die zur Bestimmung der Wechselwirkungsrate eingesetzten Szintillationszähler sind in Kombination mit der oben beschriebenen Elektronik nicht in der Lage, mehrere gleichzeitige Wechselwirkungen aufzulösen. Es kann nur gemessen werden, ob der Zähler kein oder mindestens ein Teilchen registriert hat. Die Wechselwirkungsrate muß aus diesem Grund berechnet werden. Das Maximum der Zählrate R_{gem} berechnet sich aus der Bunchfrequenz der gefüllten Protonenbunche. Bei 180 gefüllten Protonenbunchen mit einer Bunchfrequenz von $f_{bunch} = 10.417\ MHz$ ergibt sich die maximale Zählrate R_{BX} zu

$$\begin{aligned} R_{BX} &= f_{bunch} \cdot \frac{Anzahl\ Protonenbunche}{Anzahl\ gefüllte\ Protonenbunche} \\ &= 10.417\ MHz \cdot \frac{180}{220} \end{aligned}$$

[8]VME–Scaler zählen Signale in einem wählbaren Zeitraum und stellen die Anzahl der gezählten Signale über den VME–Bus zur Verfügung

$$= \ 8.523 \ MHz. \tag{2.5}$$

Die für HERA–B geforderte Wechselwirkungsrate von 40 MHz erfordert also durchschnittlich 5 Wechselwirkung pro vorbeifliegendem Protonenbunch. Die Binomialverteilung der Wechselwirkungen eines Protonenbunches mit den Targetdrähten geht in eine Poissonverteilung (siehe Abbildung 2.5) über, da die Anzahl von Protonen, die pro Bunch durch das Target fliegen, sehr groß ist, und ein einzelnes Proton einen Draht mehrere hundert Mal passieren muß, bevor es zu einer Wechselwirkung kommt. Die Anzahl der Durchquerungen bevor eine Wechselwirkung stattfindet, berechnet sich aus der Wechselwirkungslänge für das Targetmaterial und der Targetabmessung entlang der Strahlachse. Die Poissonverteilung

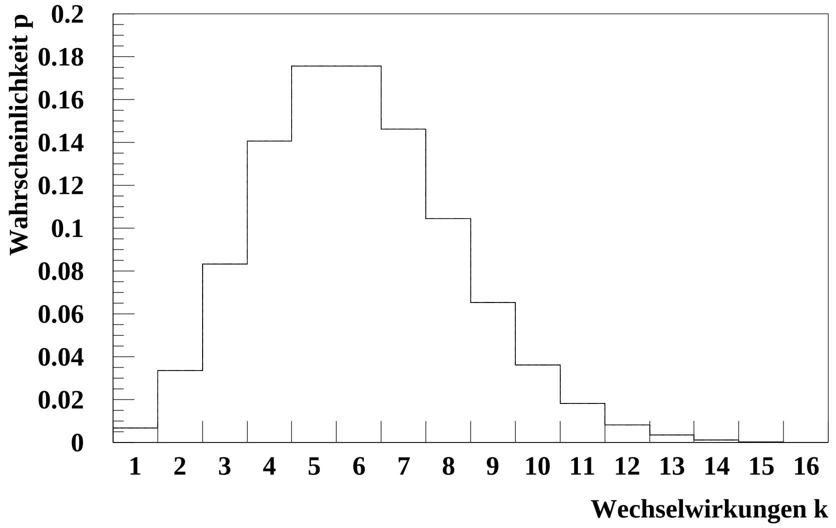

Abbildung 2.5: Poissonverteilung für einen Mittelwert von $\lambda = 5$ Wechselwirkungen pro Bunchcrossing.

$$p_\lambda(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \tag{2.6}$$

gibt die Wahrscheinlichkeit p_λ für k Wechselwirkungen bei einer mittleren Anzahl von λ Wechselwirkungen an. Die Wahrscheinlichkeit $P_0(k \geq 0)$, daß eine Wechselwirkung nicht nachgewiesen werden kann, ergibt sich, bei einer geometrischen Akzeptanz a des Detektors von weniger als 100%, zu[13]:

$$P_0 = e^{-a\lambda}. \tag{2.7}$$

Mit der gemessenen Rate R_{gem} und der Bunchcrossingrate R_{BX} ergibt sich die Nachweiswahrscheinlichkeit für ein oder mehrere Teilchen $P_{\geq 1}$ zu

$$P_{\geq 1} = \frac{R_{gem}}{R_{BX}} \leq 1. \tag{2.8}$$

Eine Gesamtwahrscheinlichkeit von eins dafür, daß man eine Wechselwirkung entweder sieht oder nicht sieht, liefert

$$P_0 = 1 - P_{\geq 1}. \tag{2.9}$$

Daraus folgt durch Einsetzen für die gemessene Wechselwirkungsrate R_{gem}

$$R_{gem} = R_{BX}\left(1 - e^{-a\lambda}\right), \tag{2.10}$$

und daraus

$$\lambda = -\frac{1}{a} ln\left(1 - \frac{R_{gem}}{R_{BX}}\right). \tag{2.11}$$

Für den Fall kleiner Akzeptanzen, d.h. für

$$a\lambda \ll 1 \tag{2.12}$$

erhält man

$$\begin{aligned} R_{gem} &= R_{BX} a\lambda \\ &= R_{WW} a, \end{aligned} \tag{2.13}$$

d.h. für kleine Akzeptanzen[9] ist die gemessene Rate direkt proportional der Wechselwirkungsrate.

2.3.5 Bestimmung der Akzeptanz

Wie in dem vorherigen Abschnitt erwähnt, benötigt man die Akzeptanz eines Zählers, um aus der gemessenen Wechselwirkungsrate auf die tatsächliche Anzahl von Wechselwirkungen schließen zu können. Bei der typischerweise zur Akzeptanzbestimmung eingesetzten Monte–Carlo–Simulation ergeben sich jedoch einige, im nachfolgenden erläuterte Probleme[15]:

- Die aus Simulationen resultierenden Multiplizitätsverteilungen entsprechen nicht notwendigerweise der Realität. Bei Zählern großer Akzeptanz wie dem Triggerring gehen viele der simulierten Spuren durch den Zähler, der Fehler auf die berechnete Akzeptanz ist dementsprechend klein. Bei den Zählern kleiner Akzeptanz wie den Hodoskopen ist die Anzahl der den Zähler durchsetzenden Spuren wesentlich geringer, der Fehler dadurch größer.

- Die große Akzeptanz des Triggerrings bewirkt einen geringen statistischen Fehler bei der Akzeptanzbestimmung durch die Simulation, bei Zählern kleiner Akzeptanz ist der statistische Fehler wesentlich größer.

- Die von der Simulation zu berücksichtigende Materialmenge zwischen Target und Triggerring ist wesentlich geringer als die zwischen Target und Hodoskopen, was zu einer größeren Unsicherheit der Hodoskopakzeptanz führt.

- Da die Hodoskope im Gegensatz zum Triggerring hinter dem Magneten liegen, bewirkt die nötige Simulation des Magnetfelds, durch die höhere Sensitivität auf die Impulsverteilung, eine weitere Unsicherheit in der Bestimmung der Akzeptanz.

[9] das heißt Akzeptanzen von etwa 2–3%.

Zähler	Akzeptanz in %
4 Triggerringpaare (ALL–Rate)	54.54±0.57
gesamter Triggerring (12 Paare)	81.54±0.71
Hodoskoppaar H1...H4	0.15
Hodoskope gemeinsam (F1–Rate)	0.6
Ladungsintegratoren	$1 \ldots 2 \cdot 10^{-5}$
Vetozähler	100
SI–Pads	10^{-4}

Tabelle 2.2: Akzeptanzen der 1998 verwendeten Zähler [16].

Mit der aus der Simulation genau zu gewinnenden Akzeptanz für den Zähler großer Akzeptanz kann der Wert für den Zähler kleiner Akzeptanz bestimmt werden. Im Bereich kleiner Raten, in dem sich sowohl Zähler großer Akzeptanz als auch Zähler kleiner Akzeptanz noch nicht in Sättigung befinden, gilt die Relation

$$\frac{R_{gem,1}}{R_{gem,2}} = \frac{a_1}{a_2}, \tag{2.14}$$

wobei R_1 die Rate und a_1 die Akzeptanz des Zählers großer Akzeptanz ist, und R_2 und a_2 die entsprechenden Werte der Zähler kleiner Akzeptanz sind. Mit dem zu messenden Wert für $R_{gem,1}/R_{gem,2}$ und der aus der Simulation zu bestimmenden Akzeptanz a_1 erhält man die Akzeptanz a_2. In [15] ist die Bestimmung relativer Akzeptanzen unter Berücksichtigung von existierendem Untergrund und nicht kleiner Raten gezeigt.

In Tabelle 2.2 sind die Akzeptanzen der 1998 verwendeten Zähler zusammengefaßt.

2.4 Ratenfluktuationen und Ratenstabilität

Von dem Target wird eine konstante Wechselwirkungsrate gefordert (siehe Kapitel 2.2). In Abbildung 2.6 ist beispielhaft eine Messung gezeigt, die den Anforderungen an das HERA–B Target entspricht. Im oberen Teil der Abbildung ist die erzeugte Wechselwirkungsrate in MHz gegen die Zeit aufgetragen. In der Mitte des Bildes erkennt man die Position der Targetdrähte, in diesem Fall wurde Draht Innen II bewegt. Während der Meßzeit von über drei Stunden weicht die Rate bis auf wenige Ausnahmen nicht um mehr als 10% von dem Sollwert von 40 MHz ab. Während der Meßzeit wurde der Draht ungefähr 60 μm in Richtung Strahl bewegt. Zwischen 3.30 Uhr und 4.18 Uhr erkennt man ein Entfernen des Drahtes vom Strahl, wobei die Rate konstant bleibt. Wie hier nicht gezeigt wird, ist dies ist auf eine Bewegung des Protonenstrahls in Richtung des Drahts zurückzuführen, die die Targetsteuerung durch Zurückziehen des Drahtes ausgeglichen hat.

Wie Abbildung 2.7 zeigt, ist nicht unter allen Umständen eine konstante Wechselwirkungsrate zu gewährleisten. Da das Aufsammeln der aus dem Strahl diffundierenden Protonen zum Erzeugen der geforderten Wechselwirkungsrate nicht ausreicht (siehe Kapitel 2.1), müssen Protonen aus dem Strahl “herausgekratzt” werden. Mit der Zeit wird die Kante des Protonenstrahls dadurch immer steiler, was die erzeugte Wechselwirkungsrate sehr empfindlich gegenüber kleinen Störungen werden läßt. Eine Bewegung von wenigen μm in Richtung

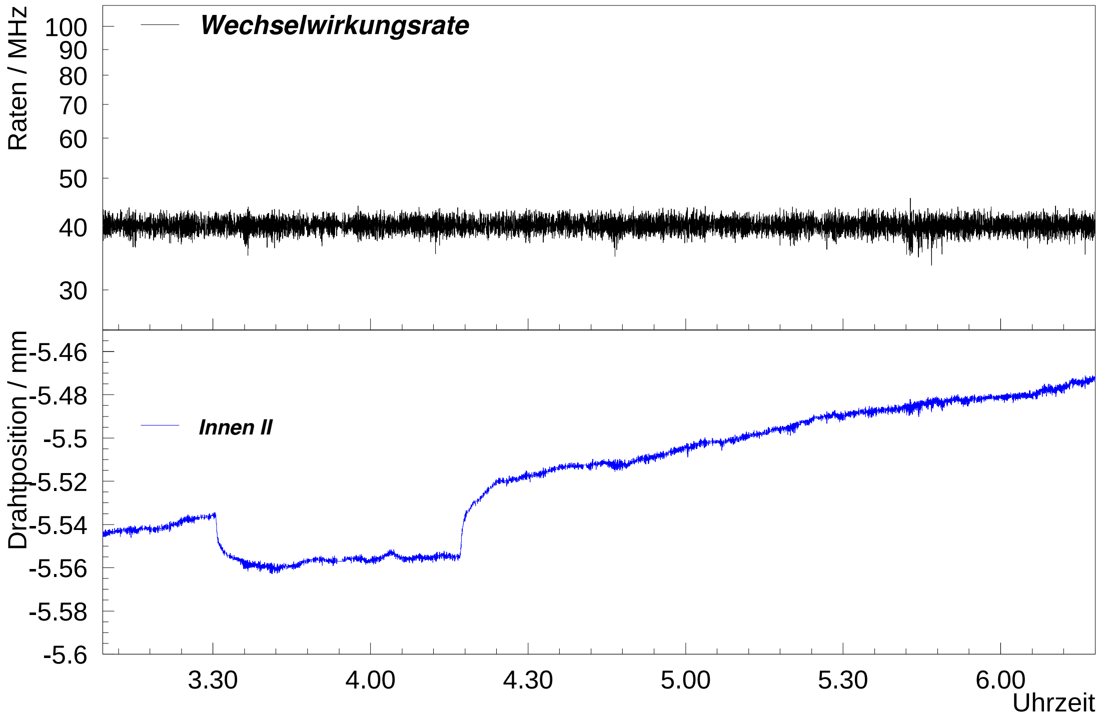

Abbildung 2.6: Im oberen Teil dieser Abbildung ist die Wechselwirkungsrate in MHz gegen die Zeit aufgetragen, im unteren Teil die Position des benutzten Targetdrahtes innen II.

des Strahls bewirkt mindestens eine Verdopplung der Wechselwirkungsrate[18]. Im normalen Targetbetrieb wird eine Schrittweite der Größenordnung O(0.1 μm) benutzt[36]. In Messungen sieht man eine Zunahme der Fluktuationen mit fortschreitender Zeit [12, 37].

Die in der Wechselwirkungsrate kurzzeitig auftretenden Spitzenraten von bis zu 1 GHZ verringern die Detektoreffizienz. Da bei extrem hohe Raten mit der Notfallregelung der Draht vom Strahl entfernt wird, sind anschließend etwa O(10 s) nötig, um den Draht wieder an den Strahl zu bewegen. Dadurch übersteigt die hohe Rate einerseits die gewünschten vier Wechselwirkungen pro Protonenbunch, andererseits sinkt die Rate anschließend durch die Notfallregelung unter den Sollwert, was einem Verlust der zeitlich integrierten Detektorgesamteffizienz von etwa 10% entspricht[10]. Weiterhin können Strahlenschäden in einzelnen Detektorkomponenten entstehen.

Um ruhigere Targetoperationen zu ermöglichen und Spikes zu vermeiden, wird versucht, den Targetbetrieb in Bereichen flacherer Protonendichteverteilung zu ermöglichen, da die Auswirkungen von Störungen dort geringer sind. Um dort die erforderliche Wechselwirkungsrate zu erreichen, wird durch Strahlanregungen versucht, die Halopopulation zu erhöhen, ohne den Strahlkern zu stören (so genanntes beam–tail–shaping[11]) [7]. Dazu existieren drei Ansätze, die im folgenden kurz erläutert werden.

- Hochfrequenz–Rauschen:

[10] Abschätzung basierend auf den Erfahrungen der letzten Jahre
[11] beam–tail–shaping engl., Formung des Strahlschwanzes

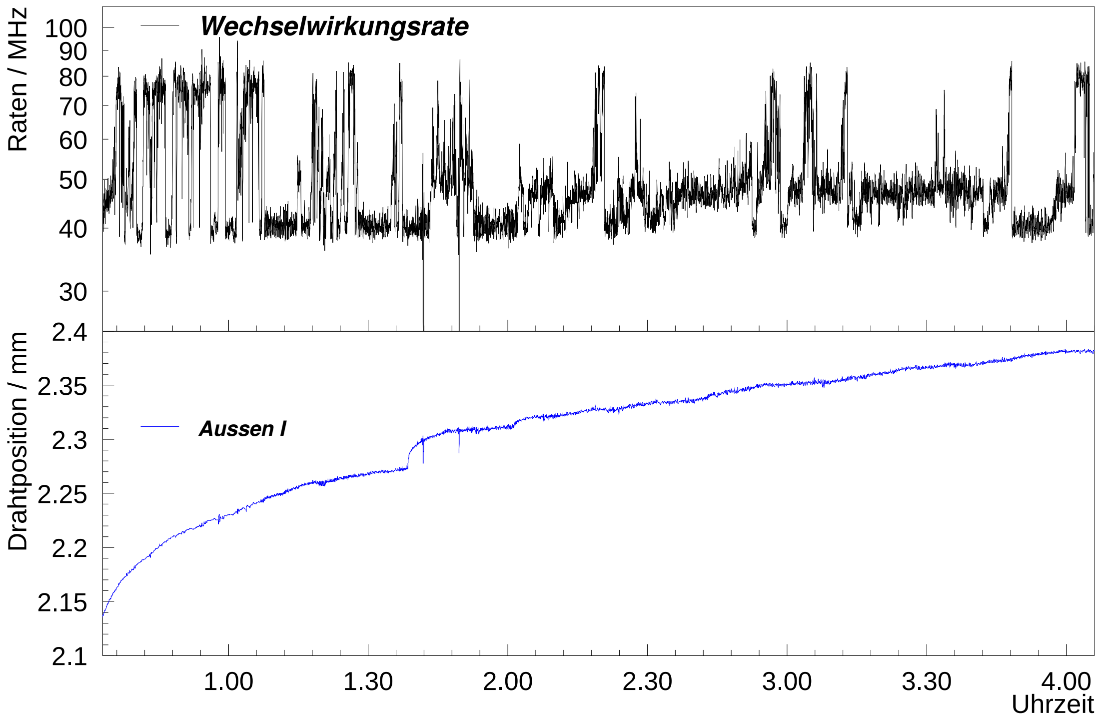

Abbildung 2.7: Benutzt wurde während dieser Messung der Draht außen I. Die Wechselwirkungsrate weicht von den gewählten 40 MHz um bis zu 60 MHz nach oben ab. Während der fast fünf Stunden dauernden Messung wurde der Draht etwa 300 μm auf den Strahlkern zu bewegt. Zwischen 1.40 Uhr und 1.54 Uhr sieht man zweimal die Reaktion der Steuerungsautomatik auf zu hohe Wechselwirkungsraten, der Draht wurde jedesmal 20 μm vom Strahl entfernt.

Resonanzen höherer Ordnung der Synchrotronfrequenz von etwa 35 Hz werden angeregt. Dadurch erfahren die Teilchen eine longitudinale Anregung. Dies bewirkt eine Energieabweichung der Teilchen; diese werden aufgrund nichtlinearer Synchrotron–Betatron–Kopplung nach außen befördert [9]. Erste Tests dieser Methode brachten keine Erfolge, zudem besteht die Befürchtung, daß die longitudinale Anregung der Protonen vermehrt zu nicht mit den Bunchen korrelierten Beiträgen führt. Aus diesen Gründen wird diese Methode nicht weiter verfolgt.

- Tune–Modulation:
  Ein Quadrupol wird mit Frequenzen zwischen 50 Hz und 1.5 kHz angeregt. Die dabei entstehenden Seitenbänder und Resonanzen sorgen für eine Aufweitung von Teilen des Strahls.

- Dipoloanregung: Hierbei wird mit den für Strahllagekorrekturen benutzten Feedbackkickermagneten ein kleiner Bereich um die 3. Harmonische der Betatronfrequenz als Anregung für den Strahl benutzt, was zu einer Erhöhung der Halopopulation führt. Erste vielversprechende Tests wurden im Dezember 1998 durchgeführt. In Abbildung 2.8 sind die Auswirkungen der Dipolanregung dargestellt. Zwischen 23.37 und 23.45 Uhr war die Anregung eines Dipols bei konstanter Drahtposition aktiviert. Die Wechselwirkungsrate steigt von 2 MHz auf etwa 12 MHz an, die Halopopulation wurde also wesentlich erhöht. Bei den anderen an HERA befindlichen Experimenten konnte während der Zeit der Anregung keine signifikante Erhöhung des Untergrunds festgestellt werden. Dies läßt vermuten daß der Strahlkern nicht angeregt und damit die Luminosität nicht verringert wurde. Allerdings müssen die Auswirkungen der Dipolanregung auf die Strahlbreite und die Luminosität weiter untersucht werden.

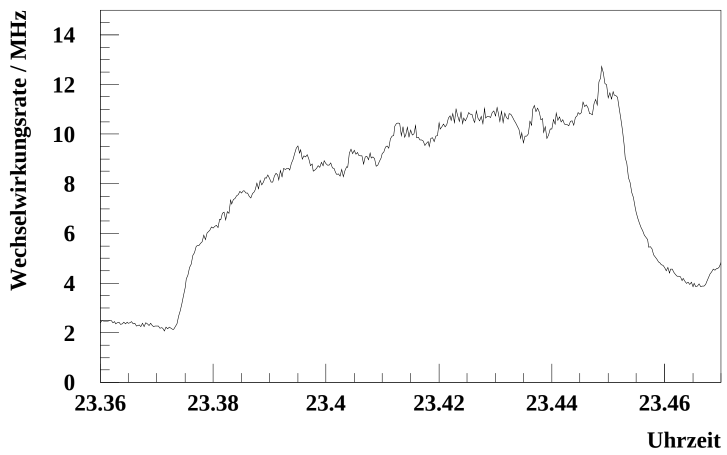

Abbildung 2.8: Eingeschaltete Dipolanregung zwischen 23.37 und 23.45 Uhr. Die beobachtete Rate wurde nur von 30 angeregten Bunchen produziert [7]. Zwischen 23.16 und 23.50 wurde die Position des verwendeten inneren Targets nicht verändert.

Wie oben beschrieben, reagiert die Wechselwirkungsrate sehr empfindlich auf Target– oder Strahlbewegungen. Bei plötzlichen Bewegungen des Protonenstrahl um bis zu 100 μm innerhalb einer Sekunde ist die Targetsteuerung nicht in der Lage die mit der Bewegung verbundene Wechselwirkungsratenänderung durch Steuerung der Targetdrähte zu kompensieren. Die Folge sind extrem hohe Änderungen der Wechselwirkungsrate. Langsam stattfindende Strahlbewegungen von einigen 10 μm während einer Minute bewirken zwar eine kleine Änderung der Wechselwirkungsrate, die Targetsteuerung reagiert aber anschließend schnell genug, um eine weitere Ratenänderungen zu vermeiden[18]. Schwingungen in der Umgebung des Experimentes können den Target– Strahlabstand verändern und so die Wechselwirkungsrate beeinflussen. So findet man im Frequenzspektrum der Wechselwirkungsrate (Abbildung 2.9) einige der folgenden Frequenzen:

- Die Frequenzen von Netzgeräten (50 Hz – 600 Hz) und Vakuumpumpen (48 Hz),
- Frequenzen in Hz– und Sub–Hz–Bereich, die durch Bodenvibrationen (Bauarbeiten im nahegelegenen Volkspark, S–Bahn) hervorgerufen werden,

- und die Frequenz von $1/7\ Hz$ der Steuerschwingungen. Die Targetsteuerung berücksichtigt nicht das differentielle Verhalten der Ratenentwicklung. Auf eine unter dem Sollwert liegende Wechselwirkungsrate wird zum Beispiel durch Annäherung eines Targets an den Strahl reagiert. Dabei wird ein vorheriges Ansteigen der Wechselwirkungsrate nicht berücksichtigt, so daß die zu niedrige Rate überkompensiert wird. Für zu hohe Raten gilt die analoge Erklärung. Durch dieses Verhalten ergeben sich Schwingungen der Wechselwirkungsrate um den Sollwert [18]. Eine weitere Ursache sind von der Targetsteuerung nicht berücksichtigte Hysteresen der Targetmechanik [8].

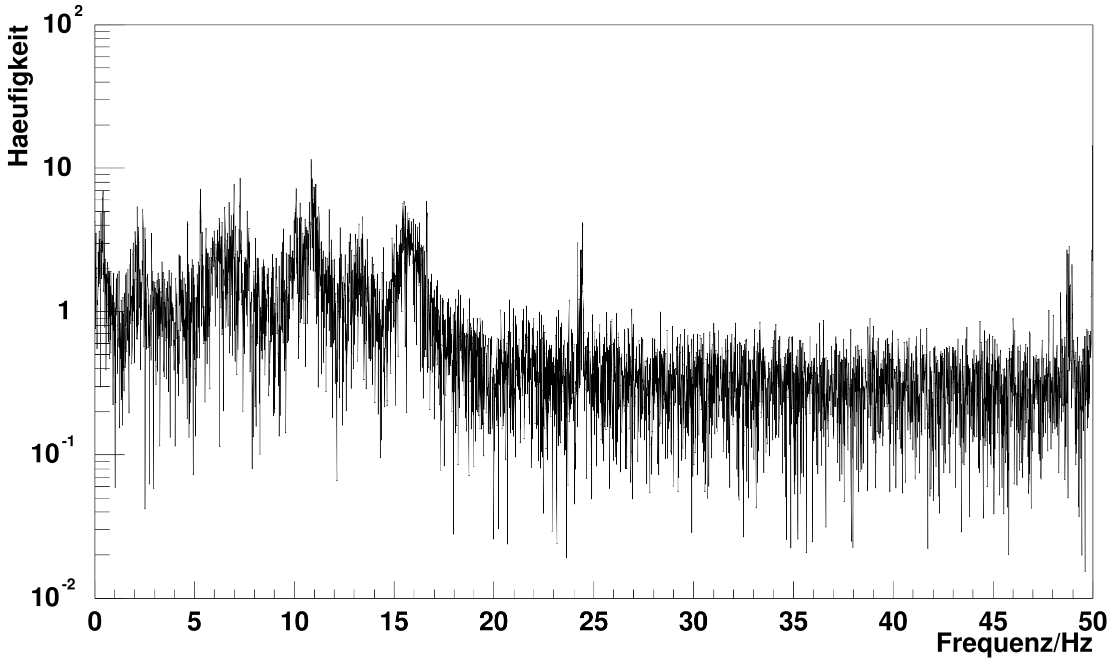

Abbildung 2.9: Ein Frequenzspektrum der F1–Rate.[17]

2.5 Bunchstrukturuntersuchungen

In den Anforderungen an das Target (Kapitel 2.2) wird die Korrelation der Wechselwirkungen mit dem Protonenfüllschema (Abbildung 1.3) gefordert. In diesem Abschnitt wird das für die Untersuchung der Bunchstrukturen eingesetzte Flash ADC–System beschrieben und Erklärungsansätze für die unterschiedlichen Beiträge verschiedener Bunche und für das Auftreten von nicht mit den Bunchen korrelierten Wechselwirkungen geliefert.

Die verstärkten und diskriminierten Szintillatorsignale werden von dem FADC–System mit der vierfachen Frequenz der HERA–Bunchclock in fester Phase zu dieser abgetastet und digitalisiert. Durch ein PLL (phase lock loop) wird die konstante Phase zur HERA–Bunchclock eingestellt. Die Digitalisierung geschieht durch schnelle Flash–ADC. Um zu gewährleisten, daß die eingelesenen Daten den richtigen Bunchen zugeordnet werden, wird das FADC–System immer in fester zeitlicher Korrelation zu dem HERA–Umlaufsignal, das die Ankunft des ersten Bunches am Target anzeigt, gestoppt. Die dann auszulesenden 880 Datensätze entsprechen den jeweils vier Werten für die letzten 220 Bunche, also einem kompletten HERA–Umlauf des Strahls. Dadurch erhält man eine zeitliche Auflösung von 24 ns und damit die Möglichkeit, 4 Zeitintervalle innerhalb von 96 ns, in der die Wechselwirkungen stattgefunden haben, zu unterscheiden. Die Eingangssignale für das FADC–System werden von den Hodoskopen geliefert. Deren kleine Akzeptanz erfordert die Aufnahme von 5000 HERA Umläufen, um genügend Statistik für eine aussagekräftige Verteilung der Wechselwirkungen zu erhalten. Aufgrund der Totzeit des Systems können nicht 5000 Umläufe hintereinander ausgelesen werden, so das die Informationen etwa alle 30 s zur Verfügung stehen.

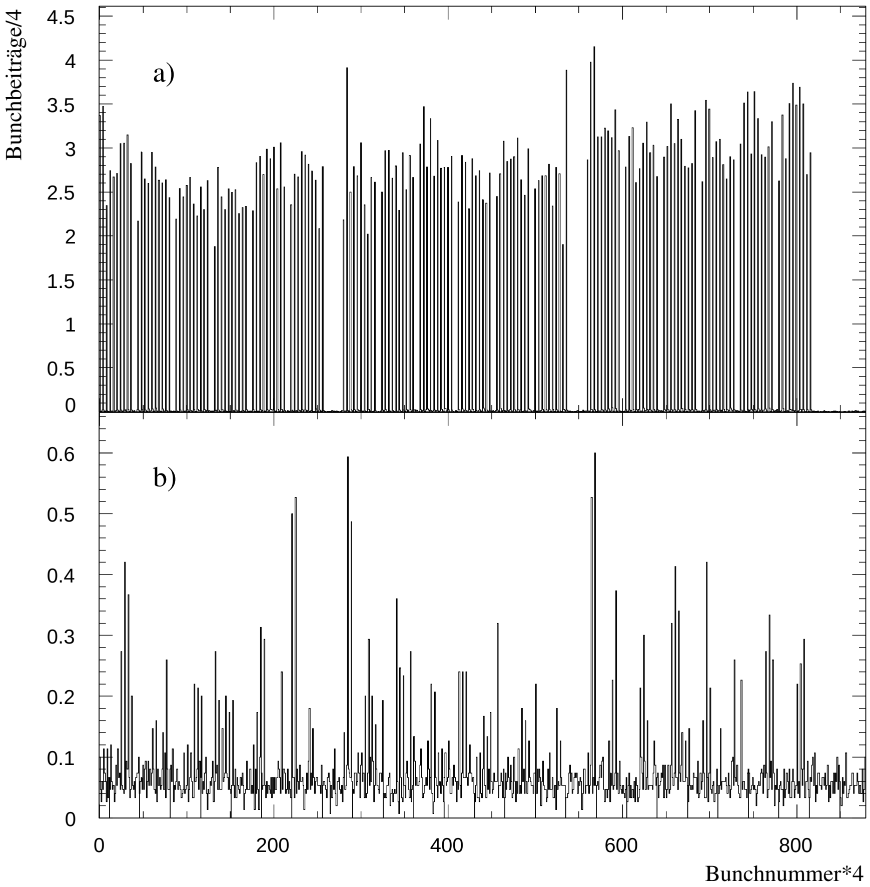

Abbildung 2.10: Verteilung der Wechselwirkungen über alle Bunche in 24 ns Intervallen. In a) ist eine Verteilung der Wechselwirkungen dargestellt, die den Anforderungen des HERA–B–Experimentes gerecht wird. Benutzt wurde ein innerer Draht. Bild b) zeigt eine ungenügende Verteilung, hier wurde ein äußerer Targetdraht eingesetzt.

Abbildung 2.10 zeigt den Anteil der einzelnen Bunche an der Wechselwirkungsrate. Im oberen Teil des Bildes ist eine Verteilung dargestellt, die den Anforderungen (Kapitel 2.2) genügt. Die nicht gefüllten Bunche tragen nicht zur Wechselwirkungsrate bei, zudem sind die Wechselwirkungsbeiträge der einzelnen Bunche in etwa gleich. Im unteren Teil der Abbildung läßt die Verteilung der Wechselwirkungen keinen Zusammenhang mit dem Protonenfüllschema erkennen. Selbst in den ursprünglich ungefüllten Bunchlücken tragen Protonen in hohem Maße zur Wechselwirkungsrate bei. Die Bunchstruktur ist nicht mehr zu erkennen, die Wechselwirkungsbeiträge fluktuieren sehr stark. Da aufgrund der kleinen Akzeptanz der verwendeten Hodoskope über 5000 HERA–Umläufe gemittelt wird, um eine ausreichende Statistik zu erhalten, ist davon auszugehen, daß die tatsächlichen Fluktuationen noch größer ausfallen.

2.5.1 Unterschiedliche Bunchbeiträge

Um die unterschiedlichen Beiträge einzelner Bunche zu erklären kommt eine unterschiedliche Protonenzahl in den einzelnen Bunchen nicht in Frage. Messungen der HERA–Wissenschaftler zeigen, daß die Ströme der einzelnen Bunche um weniger als 10% voneinander abweichen [12]. Um die unterschiedlichen Beiträge einzelner Bunche zu erklären, existiert folgender Erklärungsansatz: Bei der Injektion der Protonen in den Speicherring erfahren die Protonen durch Ungenauigkeiten in der Injektionskette eine leicht unterschiedliche Emittanz. Da die Protonen im Gegensatz zu Elektronen so gut wie keiner Dämpfung unterliegen, gleichen sich die Emittanzen einander nicht an. Das bei großer Steigung der Protonendichteverteilung am Strahl "kratzende" Target trifft somit auf Regionen unterschiedlicher Protonendichte, was die unterschiedlichen Beiträge der einzelnen Bunche erklärt. Durch den zeitlichen Abstand der einzelnen Bunche von 96 ns können die Targetsteuerung und die Mechanik auf diese Schwankungen nicht reagieren. Eine durch die Injektion veränderte, intrinsische Lebensdauer einzelner Bunche würde die beobachteten Effekte ebenfalls erklären, kann aber zur Zeit nicht von der vergrößerten Emittanz unterschieden werden. Ein unterschiedlicher Orbit der einzelnen Bunche als Ursache für unterschiedlich hohe Beiträge zur Wechselwirkungsrate kann dadurch ausgeschlossen werden, daß die Beiträge stark beitragender Bunche von Targets auf allen Seiten des Strahls gesehen werden, während eine Verschiebung des Orbits einzelner Bunche nur auf maximal zwei Seiten des Strahls zu sehen sein dürfte. Um das Problem der unterschiedlichen Bunchbeiträge zu verringern, ist vorgesehen, das Zeitverhalten bei der Injektion der Protonen in den Speicherring weiter zu verbessern, sowie das in Abschnitt 2.4 beschriebene beam–tail–shaping anzuwenden.

2.5.2 Coasting Beam

Wechselwirkungsbeiträge, die zeitlich nicht der Protonbunchstruktur korreliert sind, werden durch longitudinal gegenüber der Bunchstruktur versetzte Protonen hervorgerufen. Diese als coasting beam[12] bezeichneten Protonen werden nicht mehr von dem HERA–Hochfrequenzsystem fokussiert.

Ursache für diesen Effekt ist eine Abweichung der Protonenergie von dem Sollwert. Übersteigt diese den Wert

$$\frac{\Delta E}{E} \approx 2 \cdot 10^{-4}, \tag{2.15}$$

verlassen die Protonen die Separatrix[13]. Der Impuls ändert sich linear mit der Energie, die

[12]coasting beam engl., umhertreibender Strahl

[13]Separatrix, Grenze zwischen dem stabilen und instabilen Bereich im Phasenraum

Grenze für die Impulsakzeptanz von

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 10^{-3} \tag{2.16}$$

ist vorgegeben durch die Impulsabweichung, ab der die Teilchen so stark von den Magneten abgelenkt werden, daß sie an Aperturgrenzen verloren gehen. Da die maximale Impulsabweichung größer ist als der Wert für die Energieabweichung, können Teilchen, die die Separatrix bereits verlassen haben, trotzdem noch in dem Speicherring verbleiben und in den ursprünglich nicht gefüllten Buckets zur Wechselwirkungsrate beitragen. Die Beiträge der nicht mit dem Füllschema korrelierten Protonen treten nicht symmetrisch um den Strahl herum auf. Während des Targetbetriebs ist der Effekt auf der Außenseite (siehe Abbildung 2.1) am stärksten zu beobachten, da die Dispersion am Ort des Targets den Wert $D_x = -0.47m$ besitzt und somit Teilchen geringerer Energie auf die Außenseite des Strahls gelangen. Auf der Ober– und Unterseite des Strahls tritt der Effekt weniger intensiv auf, auf der Innenseite sind die Auswirkungen am geringsten.

Die Ursachen für die Entstehung des coasting beam scheinen sowohl bei HERA als auch beim Targetbetrieb zu liegen. Es existieren experimentelle Hinweise, daß der Einfluß des Targets auf die Produktion des coasting beam gering ist im Vergleich zu den Einflüssen HERAs [10]. Die oben beschriebene Energieabweichung der Protonen von der Sollenergie kann auf verschiedene Weise entstehen. Zum einen verlieren die Protonen durch Wechselwirkungen mit den Targetdrähten Energie. Zum anderen kommen bei HERA, wie oben beschrieben, zwei Hochfrequenzsystem mit 52 MHz und 208 MHz zum Einsatz. Fehler im Hochfrequenzsystem wie zum Beispiel Rauschen können für Änderungen der Teilchenenergie gegenüber der Sollenergie verantwortlich sein. Weiterhin können die Protonen Energie aufgrund der intra–beam–scattering genannten Wechselwirkungen von Protonen untereinander im Strahl und aufgrund von emittierter Synchrotronstrahlung (etwa 9 eV pro Umlauf) verlieren[20].

Um die Anzahl der nicht mit der Bunchstruktur korrelierten Protonen zu verringern, werden die folgenden Ansätze verfolgt:

- Erhöhung der RF–Amplitude U_{RF}:
  Der Energieakzeptanzbereich (Separatrix) ist proportional $U_{RF}^{\frac{1}{2}}$, das Sigma der Energieverteilung des Protonenstrahls proportional zu $U_{RF}^{\frac{1}{4}}$. Eine Erhöhung von U_{RF} würde somit die Separatrix mehr vergrößern als die Energieverteilung des Strahls verbreitern, die Protonen würden auch bei größeren Energieabweichungen innerhalb der Buckets bleiben.

- Entfernen der Protonen in der Kickerlücke:
  Die 15 Buckets breite Kickerlücke (Abbildung 1.3) sollte frei von Protonen sein. Um Protonen, die die Separatrix verlassen haben aus dem Strahl zu entfernen wird der Inhalt dieser Kickerlücke durch schnelle Kickermagnete angeregt. In Abbildung 2.11 wurde ein nur an den Bunchpositionen 16 bis 25 mit insgesamt 10 Bunchen gefüllter Strahl angeregt. Die Anregung wurde um Bucket 112 eingeschaltet. Deutlich zu erkennen sind neben den Wechselwirkungen der gefüllten Bunche die der angeregten

Protonen, die sich außerhalb der vorgesehenen Positionen befinden. Aus dem exponentiellen Abfall der Wechselwirkungsbeiträge der angeregten Protonen ergibt sich deren Lebensdauer zu etwa 0.5 μs [10].

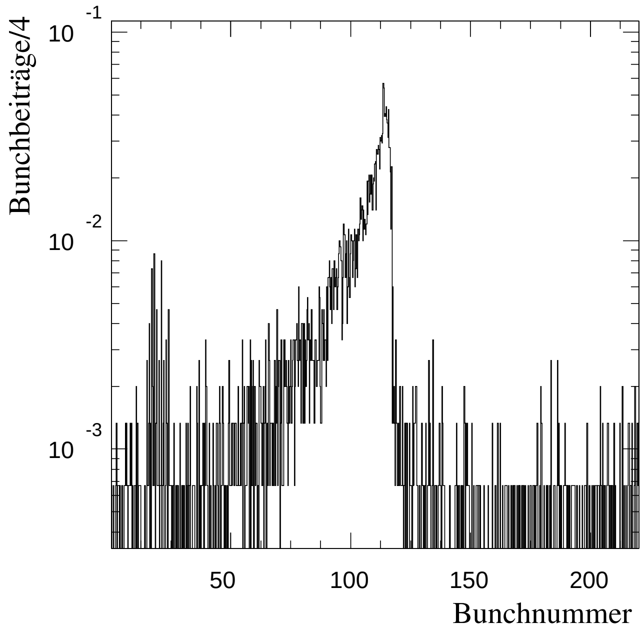

Abbildung 2.11: Anregung eines in den Bunchen 16 bis 25 gefüllten Strahls. Die Anregung wurde um Bucket 112 eingeschaltet.

- Kollimatoren und Optik:
  Am Ort eines Kollimators kann durch Veränderung der Optik versucht werden, eine möglichst große Dispersion zu erzielen. Dies führt zu einer Ablenkung von Teilchen deren Energie von der Sollenergie abweicht. Diese Teilchen werden auf einen Kollimator abgelenkt und gehen dort verloren, können also nicht mehr als coasting beam zur Wechselwirkungsrate beitragen.

Der HERA–*B* Detektor ist mit seinem Trigger–und Datennahmesystem, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird, auf die Erfassung von innerhalb 1 ns stattfindender Ereignisse alle 96 ns angewiesen. Die Beiträge nicht mit dieser Zeitskala korrelierter Protonen können die Effizienz des Detektors wesentlich verringern[21], da sie nicht für die Rekonstruktion von Ereignissen benutzt werden können. Zudem wird das Verständnis von vorhandenem und erzeugtem Untergrund sowie der Targeteffizienz erschwert.

2.6 Schritte zum perfekten Strahl– und Targetmonitoring

Das perfekte System zum Strahl– und Targetmonitoring existiert nicht. Im folgenden werden die Anforderungen an ein perfektes System beschrieben. Anschließend werden die existierenden und in der Planung befindlichen Systeme auf ihre Leistungsfähigkeit in einzelnen Teilbereichen hin untersucht.

2.6.1 Anforderungen

Das perfekte Beobachtungssystem sollte im wesentlichen den Beitrag, den Draht und den Zeitpunkt für jedes Ereignis liefern. Im Detail werden folgende Informationen benötigt:

- Anzahl der Wechselwirkungen pro Draht:
  Um die inelastischen Wechselwirkungen der Protonen gleichmäßig über alle Targetdrähte verteilen zu können, muß der Targetsteuerung das Verhältnis der Wechselwirkungsrate der Protonen mit den einzelnen Drähten mitgeteilt werden.

- Beiträge einzelner Bunche:
  Zur Untersuchung der Struktur des Protonenstrahls müssen Informationen über die Beiträge einzelner Bunche zur Gesamtwechselwirkungsrate erhältlich sein.

- Zeitpunkt der Wechselwirkung:
  Diese Information liefert Erkenntnisse über die Verteilung der Protonen innerhalb der einzelnen Bunche und in den Bunchlücken. Damit ist die Zeitinformation ein wichtiges Hilfsmittel zur Untersuchung der nicht–bunchkorrelierten Wechselwirkungen und ermöglicht die Überprüfung der Wirksamkeit der eingesetzten Maßnahmen durch Beobachtung der zeitlichen Änderungen. Weiterhin wird der Zeitpunkt der Wechselwirkung zur Synchronisierung der Elektronik eingesetzt.

2.6.2 Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme

- Die Szintillationszähler:
  Aus den Daten der Szintillationszähler kann aufgrund der Asymmetrie der Akzeptanz bezogen auf verschiedene Targetdrahtpositionen[13, 15] ein Rückschluß auf den die Wechselwirkungen erzeugenden Targetdraht gezogen werden. Die kleine Akzeptanz der Zähler läßt diesen Rückschluß nur gemittelt über einen großen Zeitraum zu. Ebenso können aus den Daten der Szintillationszähler die Beiträge einzelner Bunche bestimmt werden. Aufgrund der kleinen Akzeptanz ist dies jedoch nur gemittelt über ≈ 5000 HERA–Umläufe möglich, also jede $\approx 1/9.5\ s$. Kurzzeitige Fluktuationen in der Bunchstruktur sind deshalb nicht zu erkennen. Die verwendeten Zeit–zu–Digital–Konverter ermöglichen eine Bestimmung des Wechselwirkungszeitpunktes mit einer Auflösung von etwa 1 ns. Durch die verwendete Elektronik ist die Datennahme auf etwa 1% aller Ereignisse beschränkt. Die kleine Akzeptanz der Zähler und die Tatsache, daß die verwendeten Zeit–zu–Digital–Konverter nur zwei aufeinanderfolgende Bunche bearbeiten können, führen zusätzlich dazu, daß nur ein kleiner Teil aller Wechselwirkungen aus zwei Bunchen detektiert werden kann.

- Die Ladungsintegratoren:
  Die Ladungsintegratoren liefern eine dem in dem Targetdraht fließenden, zeitlich integrierten Strom proportionale Frequenz. Die Auflösung der Ladungsintegratoren ist ausreichend, um das Verhältnis der Verteilung der Wechselwirkungen über die Targetdrähte zu bestimmen. Diese Information wird als Auswahlkriterium für den zu fahrenden Draht von der Targetsteuerung benutzt. Beiträge einzelner Bunche und Infor-

mationen über den Zeitpunkt der Wechselwirkung können mit diesem System nicht gewonnen werden, da die Akzeptanz zu gering ist.

- Die EEI–Karte:
  Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit ausführlich beschriebene EEI–Karte liefert die im inneren Bereichs des elektromagnetischen Kalorimeters deponierte Energie bei jedem Vorbeiflug eines Protonenbunches. Dabei ist die Datenerfassung unabhängig von den Triggerstufen. Als Zähler großer Akzeptanz liefert das Kalorimeter für jeden Bunch Informationen mit hoher Statistik. Die Genauigkeit mit der der Beitrag eines einzelnen Bunches zur Wechselwirkungsrate bestimmt werden kann, ist primär durch die Kalibration bestimmt. Dabei ist nicht nur die Energieauflösung des Kalorimeters, sondern auch die Genauigkeit, mit der die Zuordnung

  $$deponierte\ Energie \mapsto Anzahl\ Wechselwirkungen \tag{2.17}$$

  bestimmt und aufgelöst werden kann, von Bedeutung. Da die Energieinformation der EEI–Karte mit jedem Bunch bereitgestellt wird, ist die zeitliche Auflösung auf 96 ns begrenzt. Die Messung des nicht–bunchkorrelierten Strahls ist mit dem Kalorimeter nicht vollständig möglich. Das integrierende Verhalten der Ausleseelektronik (Kapitel 4.2) ermöglicht die Messung von etwa ± 20 ns um den Zeitpunkt des nominellen Bunches. Dies entspricht etwa 50% des zu messenden Bereichs. Eine direkte Information über den Ort der Wechselwirkung ist nicht verfügbar.

  Aufgrund unterschiedlicher Teilchendichte und Energieverteilung am Ort des Kalorimeters in Abhängigkeit der Targetdrahtposition wird in Zukunft untersucht, ob die Information der EEI–Karte als Drahtauswahlkriterium in Frage kommt.

- Information des Vertexdetektors aus der zweiten und dritten Triggerstufe:
  Mit den Informationen des Vertexdetektors kann der Ort der inelastischen Proton–Target–Wechselwirkung mit einer Auflösung von etwa 100 μm bestimmt werden. Die Vertexdetektordaten werden nicht für jedes Ereignis ausgelesen, sondern stehen nur für getriggerte Ereignisse zur Verfügung. In den Daten eines durch alle Triggerstufen akzeptierten Ereignisses stehen die gesamten Vertexdetektordaten zur Verfügung. Da diese Ereignisse nur selten stattfinden, werden die Informationen der zweiten oder dritten Triggerstufe mit der wesentlich höheren Datenrate benutzt.

  Der Second–Level–Trigger benutzt zur Spurrekonstruktion die vom First–Level–Trigger definierten, interessanten Regionen. Diese beiden Regionen sind zur Rekonstruktion eines Wechselwirkungspunktes ausreichend. Daher können vom SLT keine Mehrfachwechselwirkungen aufgelöst werden.

  Der Third–Level–Trigger baut aus den Daten der einzelnen Detektorkomponenten den Datensatz eines kompletten Ereignisses zusammen. Mit den Daten des Vertexdetektors wird eine komplette Spurrekonstruktion durchgeführt. Dies und die hohe geometrische Akzeptanz des Vertexdetektors von $\approx 90\%$ führen dazu, daß im Third–Level–Trigger mehrere gleichzeitige Wechselwirkungen innerhalb eines Bunches rekonstruiert werden können.

  Beide System habe den Nachteil, nur auf Ereignisse zurückgreifen zu können, die vom FLT akzeptiert wurden. Die anfängliche Verteilung von Wechselwirkungen am Target stimmt nicht notwendigerweise mit der Verteilung der vom FLT akzeptierten Ereignisse überein. Bei diesen Methoden besteht die Gefahr eines großen systematischen Fehlers. Um dies zu vermeiden, wird der Ansatz verfolgt, mit zufälligen Triggersignalen zu arbeiten. Diese Triggersignale bewirken, daß die zu dem Ereignis gehörenden Daten unabhängig von den Triggerentscheidungen durch alle vier Triggerstufen verarbeitet werden. Unter der Annahme FLT–akzeptierter Ereignisse wird eine Rekonstruktion der Wechselwirkungsorte alle 20 Ereignisse, also alle $\approx 5\ s$ erwartet. Diese Verfahren sind also nicht in der Lage, kurzzeitige Veränderungen der Wechselwirkungsorte zu erfassen.

Um den mittleren Beitrag eines Drahtes zur gesamten Wechselwirkungsrate zu bestimmen, sind die Ladungsintegratoren geeignet. Diese liefern eine Relation zwischen den Beiträgen der verschiedenen Drähte. Die Unterschiede in der Zählrate einzelner Szintillatoren bezüglich der Drahtposition sind zu gering um mit dieser Information die Drähte steuern zu können [36]. Die Möglichkeit, die Asymmetrie der Energiedeposition im ECAL zur Drahtauswahl zu benutzen, muß näher untersucht werden. Die Informationen der zweiten und dritten Triggerstufe liefern sehr präzise Ergebnisse mit nur geringer Statistik, die für Steuerungszwecke allerdings ausreichend ist. Diese Methode wird in Zukunft in die Steuerung integriert.

Um die Beiträge einzelner Bunche zur Wechselwirkungsrate zu bestimmen, ist das ECAL mit der EEI–Karte am besten geeignet. Im Gegensatz zu den Szintillationszählern liefert dieses System für jeden Bunch eine Information. Somit sind wesentlich kurzzeitigere Fluktuationen der Bunchbeiträge zu erkennen.

Für die Feststellung des Zeitpunktes einzelner Wechselwirkungen bieten sich die Zeit–zu–Digital–Konverter der Szintillationszähler an. Die zeitliche Auflösung liegt im Nanosekundenbereich. Allerdings wird nur ein geringer Teil aller Wechselwirkungen detektiert. Eine größere Akzeptanz sowie eine höhere Datennahmestatistik ist wünschenswert.

Kapitel 3

Das elektromagnetische Kalorimeter

Die vom elektromagnetischen Kalorimeter des HERA–B Experimentes bereitgestellten Informationen werden auf vielfältige Weise genutzt. Die Diskriminierung von Hadronen gegenüber Elektronen und Positronen stellt eine der wesentlichen Aufgaben des Kalorimeters dar. Die Energie– und Ortsinformation von identifizierten Elektronen wird benutzt, um der in Kapitel 4.3 erläuterten ersten Triggerstufe ein Signal zum Start des Triggerprozesses zu liefern. Sie stellt aber auch eine wichtige Information für die spätere Rekonstruktion der Ereignisse dar. Ein Teil der ECAL–Informationen dient im Zusammenhang mit der EEI–Karte der Generierung des Veto–Triggersignals und bildet die Grundlage für eine genaue Ratenbestimmung.

Der Aufbau des ECAL als Sampling–Kalorimeter mit einer Schaschlik–Auslese durch Wellenlängenschieber und deren Auslese durch Photomultiplier wird in diesem Abschnitt zuerst beschrieben, bevor ein Überblick über die Kalibration des Kalorimeters gegeben wird. Am Ende des Kapitel wird die Einsatzfähigkeit des Kalorimeters zur Ratenbestimmung untersucht.

3.1 Der Aufbau

Das elektromagnetische Kalorimeter des HERA–B Experimentes ist als Sampling–Kalorimeter in Szintillator/–Absorber–Sandwich–Bauweise realisiert. Bei dieser Technologie befinden sich Szintillator– und Absorbermaterial schichtweise übereinander. Die Auslese des in dem Szintillatormaterial erzeugten Lichts ist als Schaschlik–Technologie mit aus Plastik bestehenden Wellenlängenschieberfasern (WLS[1]) ausgeführt. In Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Kalorimeters verdeutlicht. Absorber– und Szintillatorplatten sind, getrennt durch eine Papierlage, übereinander gelegt. Die Seitenflächen der Szintillatorplatten sind mit Aluminium beschichtet, um eine bessere Lichtsammlung zu ermöglichen und ein Übersprechen des Lichts zwischen verschiedenen Zellen zu verhindern. In den Szintillator– und Absorberplatten befinden sich Löcher. In diesen Löchern durchsetzen die Wellenlängenschieber, die das Licht sammeln und zu den Photomultipliern leiten, die einzelnen Zellen. Dabei werden die WLS–Fasern einer Zelle zusammen auf einen Photomultiplier geführt.

Das Kalorimeter ist aus Modulen der Abmessung $11.15 \times 11.15\ \mathrm{cm}^2$ aufgebaut. Diese

[1]WLS: Wavelengthshifter(fibres)

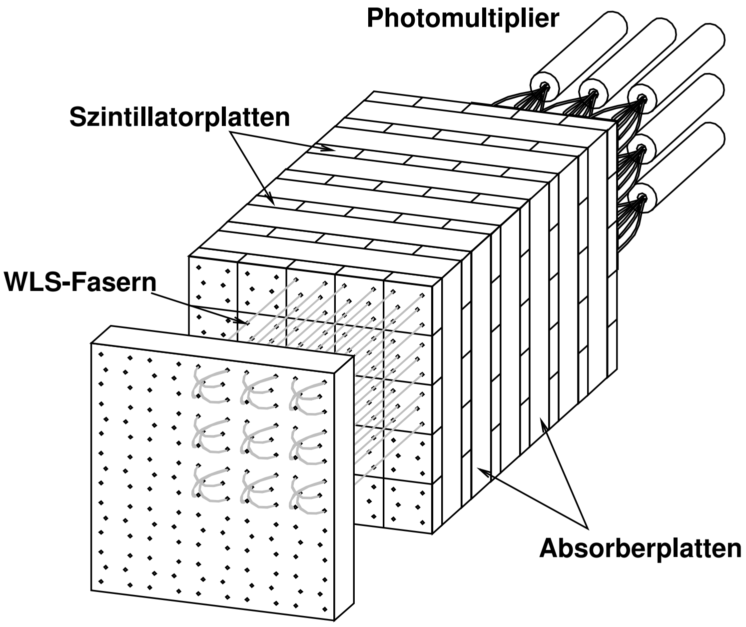

Abbildung 3.1: Schema eines Sampling Szintillator/Absorber–Sandwich Kalorimeters mit Plastik–Wellenlängenschieberfaserauslese.

Module sind in bis zu 25 Zellen aufgeteilt. Die Gesamtanzahl der Zellen beträgt 5752, deren Aufteilung auf die drei Bereiche des Kalorimeters ist Tabelle 3.1 zu entnehmen. Da die Spurdichte eine Funktion des radialen Abstands vom Strahl ist, wird eine variable Granularität benutzt, um die Anzahl der Auslesekanäle möglichst gering zu halten. Dazu ist das Kalorimeter in drei Bereiche unterteilt. Der innere Bereich enthält 25 Zellen pro Modul, der mittlere 4 und der äußere Bereich enthält eine Zelle pro Modul. Der Verlauf der einzelnen Bereiche kann Abbildung 3.2 entnommen werden. Die Grenzen zwischen den einzelnen Bereichen sind anhand Linien gleicher Belegungsdichte[2] bei eingeschaltetem Magnetfeld und dem zu vertretenden, konstruktiven Aufwand gebildet[33]. Im folgenden wird nur der für diese Arbeit relevante innere Bereich des Kalorimeters diskutiert.

Die feine transversale Segmentierung ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Unterscheidung von Elektronen und geladenen Hadronen. Deren Signale werden von Signalen der Photonen aus dem Zerfall des π^0 überlappt. Eine möglichst kleine Zellengröße ermöglicht die Vermessung von Schauerprofilen sowie die Trennung von Schauern, sie erhöht aber auch die Wahrscheinlichkeit, daß aus dem π^0–Zerfall stammende Photonen verschiedene Zellen treffen. Letzteres ist sowohl wichtig für die π^0–Rekonstruktion als auch für das Verwerfen von Photonen im First–Level–Trigger durch Nutzung einer minimalen Energiegrenze. Die Nachweiswahrscheinlichkeit des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ wird erhöht, wenn die Zellen groß genug sind, um die durch Elektronen produzierten Bremsstrahlungsphotonen zu erfassen.

Wie Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, wird für den inneren Teil des Kalorimeters eine Wolfram–Nickel–Eisen Legierung als Absorbermaterial benutzt. Die transversale Ausdehnung eines elektromagnetischen Schauers wird durch die Vielfachstreuung niederenergeti-

[2]Belegungsdichte: occupancy

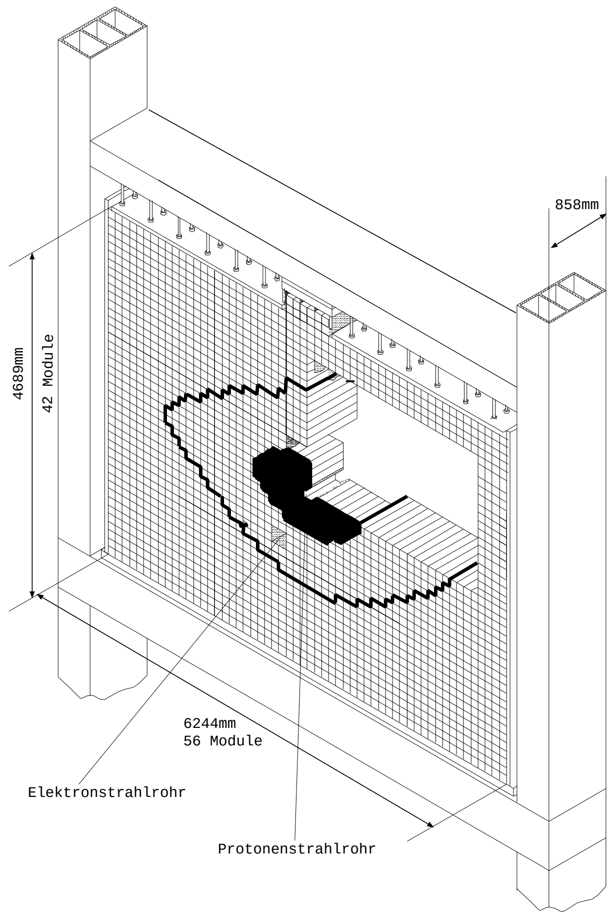

Abbildung 3.2: Isometrische Ansicht des Kalorimeters. Innerer, mittlerer und äußerer Bereich sind durch die fett gezeichneten Linien getrennt. Alle Maßangabe sind in mm.

scher Elektronen bestimmt. Der Molière Radius

$$R_m = 21\ MeV \cdot \frac{X_0}{E_c} \tag{3.1}$$

dient mit der Strahlungslänge X_0 und der kritischen Energie E_c zur Beschreibung dieser Verteilung. Die kritische Energie E_c entspricht dabei der Energie des Elektrons, unterhalb derer der Energieverlust durch Ionisation größer als der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist. Bei dieser Energie hat der Schauer sein Maximum erreicht [23]. Um die bestmögliche Schauertrennung und eine optimale räumliche Auflösung zu erreichen, muß der Molière Radius etwa dem halben Zellendurchmesser entsprechen. Die longitudinale Ausdehnung des Kalorimeters ist mit 22 Strahlungslängen für den inneren Bereich so gewählt, daß die Schauerenergie möglichst vollständig im Kalorimeter deponiert wird.

Jede Zelle des inneren Bereichs wird von 4 WLS–Fasern durchsetzt, die miteinander verbunden auf einen Photomultiplier geführt werden. Die Lichtausbeute beträgt etwa 250 Photoelektronen pro deponierter Energie von 1 GeV. Das bei 490 nm liegende Maximum des von den WLS emittierten Lichts setzt Photomultiplier mit einer im grünen Wellenlängenbereich sensitiven Photokathode voraus. Die Hochspannungsversorgung muß einen stabilen Photomultiplierbetrieb bei Teilchenraten bis zur Bunchfrequenz von etwa 10 MHz gewährleisten.

	innerer Bereich	mittlerer bereich	äußerer Bereich
Anzahl Kanäle	2000	1984	1768
Zellen/Modul	25	4	1
Zellengröße	2.23 cm×2.23 cm	5.575 cm×5.575 cm	11.15 cm×11.15 cm
Absorbermaterial	W–Ni–Fe Legierung	Blei	Blei
Volumenverhältnis	Abs./Szint.= 2.2 : 1	Abs./Szint.= 3 : 6	Abs./Szint.= 3 : 6
Molière Radius	1.3 cm	3.5 cm	3.5 cm
Strahlungslänge X_0	0.62 cm	1.64 cm	1.64 cm
Tiefe	13.6 cm (22 X_0)	33 cm (20 X_0)	33 cm (20 X_0)
Szintillatorplattendicke	1 mm	6 mm	6 mm
Anzahl Szintillatorplatten	41	38	38

Tabelle 3.1: Parameter des HERA–B elektromagnetischen Kalorimeters.

minimale Elektronenenergie E_e	300 MeV
maximale Elektronenenergie $< E >$	1.6 GeV
Lichtausbeute	250 Photoelektronen / GeV
Anodenstrom $< I_A >$	$\leq 1.4\,\mu$A
maximaler Anodenstrom I_A	1.9 mA
Verstärkung	$< 2.3 \cdot 10^3$

Tabelle 3.2: Anforderungen an die Photomultiplier im inneren Bereich des Kalorimeters.

Das Ausgangssignal der Photomultiplier ist stark abhängig von der Versorgungsspannung. Aus diesem Grund muß auch die Spannungsversorgung stabil sein und darf nicht driften. Die verwendeten Cockcroft–Walton Basen zeichnen sich gegenüber passiven Spannungsteilern durch eine geringere Wärmeabgabe aus, was bei 5752 eingesetzten Photomultipliern von großer Bedeutung ist. Die Anforderungen an die Photomultiplier des inneren Bereichs sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt. Der dynamische Bereich wird von der Maximalenergie der aus dem Zerfall $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ stammenden Elektronen, und von der Antwort des Kalorimeters auf ein minimalionisierendes Teilchen (MIP) bestimmt, dessen im Kalorimeter deponierte Energie etwa 300 MeV entspricht. Die Beschränkung der Verstärkung resultiert aus der maximalen Energiedeposition im ECAL und aus der Grenze für ein lineares Verhalten der verwendeten Photomultiplier. Der zugehörige mittlere Anodenstrom ist klein genug, um die mittlere Verringerung der Verstärkung durch Alterung unter einem Wert von 10% pro HERA–B–Jahr zu halten [33]. Nach der Vorverstärkung der analogen Photomultipliersignale werden diese durch etwa 50 m lange Kabel zu den im Kapitel 4.2 beschriebenen Front–End–Drivern geleitet und dort weiterverarbeitet.

3.2 Kalibration und Auflösung des elektromagnetischen Kalorimeters

Die Energiekalibration des ECAL findet iterativ mit verschiedenen Methoden statt, die im folgenden beschrieben werden.

Vorbereitend für die Energiekalibration wird ein erster Abgleich der Signale aller Photomultiplier mit dem LED[3]–Testsystem durchgeführt. Die LEDs sind so in das Kalorimeter integriert, daß ihr blaues Licht mit einer Wellenlänge von 430 nm direkt in das Zentrum der ersten Szintillatorlage trifft. In dem Szintillatormaterial gestreut, gelangt das Licht in die Wellenlängenschieber und zu den Photomultipliern. Neben der Kalibration eignet sich dieses System zur Kontrolle des Verhaltens der Photomultiplier, um zum Beispiel zeitlich bedingte Veränderungen in der Verstärkung erkennen zu können.

Die Signale von minimalionisierenden Teilchen werden genutzt, um eine Energieauflösung mit einer Genauigkeit von etwa 10% zu erreichen. Ist ein Teil der ECAL–Zellen mit ausreichender Genauigkeit kalibriert, nutzt man diese Zellen, um unter Kenntnis des monotonen Übergangs physikalischer Parameter den Rest des ECALs zu kalibrieren. So wird zum Beispiel die Abhängigkeit der Belegungsdichte vom Abstand r zum Strahlrohr benutzt. Dabei wird die Spannung der Photomultiplier der zu kalibrierenden Zellen so verändert, daß ausgehend von den bereits kalibrierten Zellen die $1/r^2$–Abhängigkeit der Belegungsdichte möglichst gut erreicht wird.

Eine wesentlich genauere Energiekalibration kann durch Nutzung des Zerfalls $\pi^0 \to \gamma\gamma$ erreicht werden. Bei dieser Methode werden die Kalibrationsparameter jeder Zelle bestimmt, indem die bekannte π^0–Masse rekonstruiert wird. Die Vorteile dieser Methode liegen in der Unabhängigkeit von externen Spuridentifizierungssystemen und von Triggereinstellungen, da der physikalische Ursprung der π^0–Mesonen nicht relevant ist. Die erreichbare Genauigkeit hängt von der gewonnenen Statistik und von Nichtlinearitäten der Kalorimetermodule ab.

Der Sollwert [32] der Energieauflösung des inneren Bereichs des Kalorimeters beträgt

$$\sigma = \frac{\sigma_E}{E} = \frac{17\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.6\% \qquad \text{Energie E in GeV} \tag{3.2}$$

Dieser Wert wurde durch Teststrahlmessungen bestätigt [24].

3.3 Eignung des Kalorimeters zur Ratenmessung

Seit Ende des Jahres 1998 wird die Verwendung einzelner Zellen des elektromagnetischen Kalorimeters zur Ratenbestimmung untersucht. Um die Ratenbestimmung nicht zu beeinflussen, sind diese Zähler von der automatischen Hochspannungskontrolle des Kalorimeters getrennt. Die Signale der Photomultiplier werden vom Detektor über etwa 50 m lange Kabel bis zu der ECAL–Elektronik geführt. Von dort gelangen die Signale der verwendeten Zähler anstatt in die ECAL–Ausleseelektronik über circa 20 m lange Kabel in die Targetelektronik. Im oberen Teil der Abbildung 3.3 ist die mit den Triggerzählern bestimmte Wechselwirkungsrate gegen die Zeit aufgetragen. Im mittleren Teil des Bildes ist die Rate einzelner ECAL–Zellen zum Vergleich aufgetragen. Deutlich zu erkennen sind lineare Bereiche die zeitlich korreliert mit einer konstanten Wechselwirkungsrate im oberen Teil des Bildes sind. Um dies zu überprüfen wurde im unteren Teil der Abbildung der Quotient aus der ECAL–Zellenrate und der Wechselwirkungsrate (jeweils in MHz) gebildet und gegen die Zeit aufgetragen. Zu erkennen sind zwei zusammenhängende Bereich, zum einen von 10 bis 50 Stunden und von 50 bis 85 Stunden. Der unterschiedliche Quotient ist durch Veränderung der Signalverstärkung

[3]LED: Ligth Emitting Diode

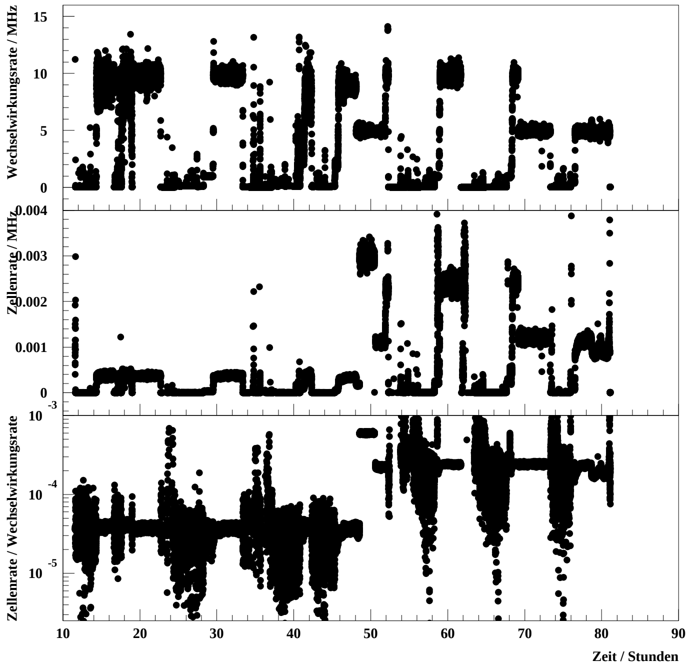

Abbildung 3.3: Von oben nach unten sind die Wechselwirkungsrate, die Rate einer einzelnen ECAL–Zelle sowie der Quotient von Zellen– zu Wechselwirkungsrate gegen die Zeit dargestellt. An den Stellen großer Streuung wurde die Hochspannung der Photomultiplier variiert.

bedingt. Die starken Fluktuationen basieren auf Tests der Hochspannungsversorgung der Photomultiplier, die während der Messung durchgeführt wurden.

In Abbildung 3.4 ist die Rate einzelner ECAL–Zellen als Funktion der Wechselwirkungsrate der Triggerzähler (siehe Abbildung 2.3) dargestellt. An den Stellen breiter Streuung wurde die Hochspannung der Photomultiplier des ECAL getestet. Die drei Kurven unterschiedlicher Steigung sind durch eine veränderte Verstärkung der Signale während der Messungen verursacht. Aus dieser Darstellung ist die Akzeptanz einer einzelnen ECAL–Zelle auf $\mathcal{O}(‰)$ zu bestimmen. Die Abhängigkeit der Zellenrate von der Wechselwirkungsrate ist linear. Aus diesem Grund werden einzelne ECAL–Zellen in Zukunft zur Wechselwirkungsratenbestimmung eingesetzt.

In Abbildung 3.5 ist die Abhängigkeit der im inneren Teil des Kalorimeters deponierten Energie von der Wechselwirkungsrate dargestellt. Die Daten der obersten Kurve entstammen einer Monte–Carlo–Simulation [40], die Daten der untersten Kurve sind Meßdaten aus dem Jahre 1999. Die Daten der mittleren Kurve sind durch Korrektur der Meßwerte entstanden. Da zum Zeitpunkt der Datennahme die bestimmte Wechselwirkungsrate durch einen Defekt der Photomultiplier–Hochspannungsversorgung um etwa 25% zu groš bestimmt wurde, sind bei den korrigierten Daten die entsprechenden Wechselwirkungsraten um den Faktor 0.75 skaliert. Eine Ungenauigkeit resultiert aus dem Fehler der Akzeptanz der für die Wechselwirkungsratenbestimmung eingesetzten Szintillatoren (siehe Kapitel 2.3.5). Die nach diesen Messungen im ECAL deponierte Energie beträgt bei einer Wechselwirkungsrate von 10 MHz etwa 80 GeV. Dieser Wert liegt deutlich unter der erwarteten Energiedeposition von 500 GeV

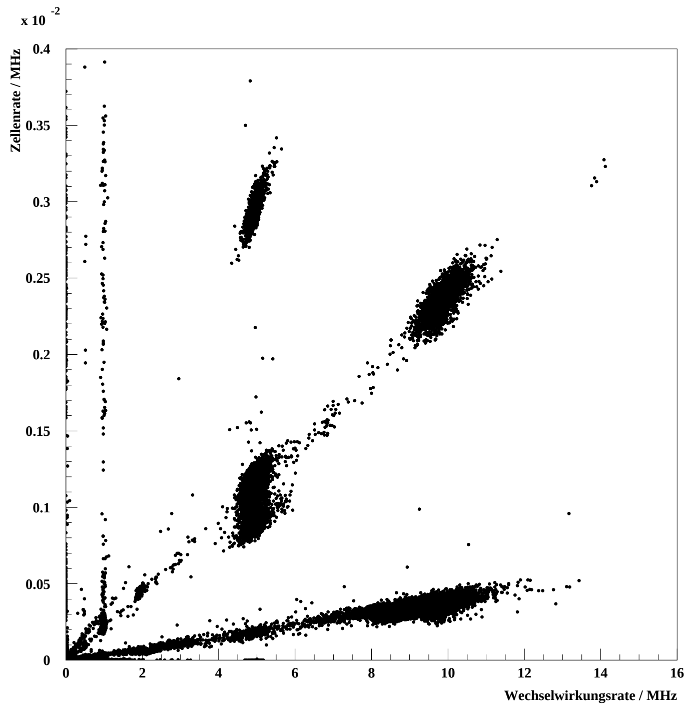

Abbildung 3.4: Dargestellt ist die Zellenrate als Funktion den Wechselwirkungsrate. Die drei Kurven kommen durch Veränderung der Signalverstärkung zustande.

pro Wechselwirkung [40]. Dies läßt sich durch die Art der verwendeten Daten erklären. Von den 2000 Kanälen des inneren Bereichs wurden nur etwa 1100 benutzt. Von diesen 1100 Zellen wurden die Daten der Zellen aufaddiert, in denen mehr als 2 GeV deponiert wurden. Zudem müssen mindestens 5 Zellen oberhalb dieser Energiegrenze liegen. Diese Bedingungen dienen dem Zweck, Ereignisse, in denen nur falsch kalibrierte Zellen Signale liefern, zu ignorieren. Der Schnittpunkt der Kurven mit der y–Achse liegt nicht wie erwartet bei 0 sondern bei etwa 50 GeV. Dies liegt daran, daß bei der Poissonkorrektur die Wahrscheinlichkeit von 0 Wechselwirkungen nicht berücksichtigt wurde. 50 GeV entsprechen also der Energiedeposition exakt eines Ereignisses in der Poissonverteilung. Die Energiedeposition im inneren Bereich des Kalorimeters ist linear abhängig von der Wechselwirkungsrate.

Die obigen Untersuchungen zeigen zusammengefaßt folgendes:

- Die mit einzelnen ECAL–Zellen gemessenen Rate ist linear zu der Wechselwirkungsrate.

- Die im inneren Teil des Kalorimeters deponierte Energie steigt linear mit der Wechselwirkungsrate an.

Dies ermöglicht mehrere Arten der Wechselwirkungsratenbestimmung. Zum einen werden in Zukunft einzelne Zellen des Kalorimeters eingesetzt, um wie mit den bisher benutzten Szintillatoren die Rate zu bestimmen (Kapitel 2.3.1). Weiterhin kann, aufgrund der geometrischen Akzeptanz des inneren Bereichs des Kalorimeters von etwa 90% [40], in Kombination mit der EEI–Karte das Kalorimeter als Zähler eingesetzt werden, der bei jedem Bunchvorbeiflug eine Energiesumme bereitstellt. Die lineare Abhängigkeit der deponierten Energie

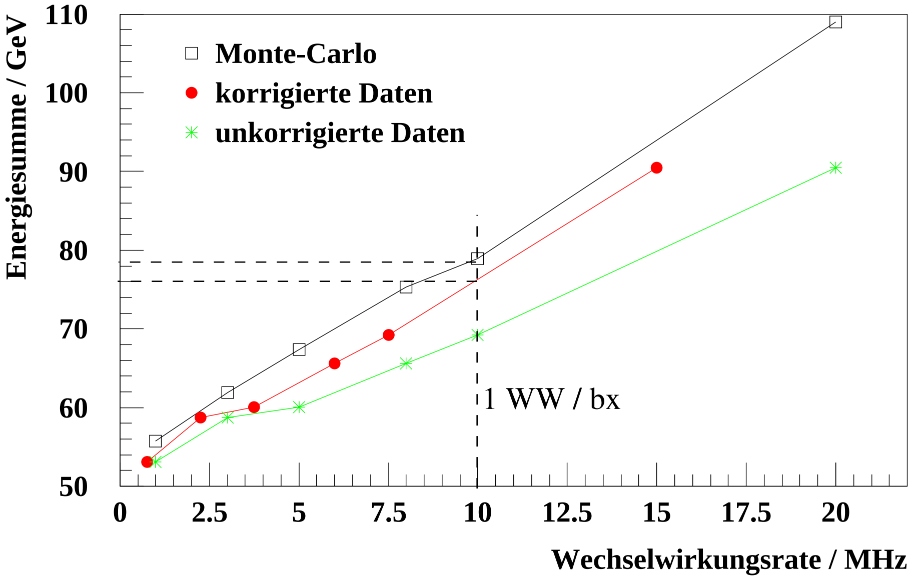

Abbildung 3.5: Abhängigkeit der deponierten Energie von der Wechselwirkungsrate. Vergleich von simulierten und realen Daten [40].

von der Wechselwirkungsrate beweist die Möglichkeit, anhand der Energieinformation bei jedem Bunchvorbeiflug den Beitrag des Bunches zur Wechselwirkungsrate zu bestimmen. Das elektromagnetische Kalorimeter ist damit zur Ratenmessung geeignet.

Kapitel 4

Die Trigger und die Datenerfassung

Dieses Kapitel beinhaltet die Beschreibung des Trigger– und Datenerfassungssystems beim HERA–B Experiment. Dieses hat zwei Gründe:

- Neben dem Einsatz der EEI–Karte als Instrument zur Wechselwirkungsratenbestimmung und zur Strahluntersuchung ist die ursprüngliche Aufgabe die Entlastung des First–Level–Triggers durch Bereitstellung eines Veto–Signals. Diese Funktion muß auch während andersartiger Nutzung der EEI–Karte sichergestellt sein.

- Viele der für die HERA–B–Datenerfassung notwendigen Komponenten sind auch für den Betrieb der EEI–Karte notwendig. So wird die EEI–Karte wie das restliche HERA–B Experiment durch das Fast–Control–System (Kapitel 4.4) synchronisiert und mit diesem getestet, sowie durch die in der Datenerfassung auf vielfältige Weise eingesetzten SHARCs (Kapitel 4.5.1) ausgelesen. Zudem sind Signale des First–Level–Triggers essentiell für die Auslese der EEI–Karte.

Im folgenden wird zunächst ein Überblick über das Trigger– und Datenerfassungssystem gegeben. Anschließend werden die Front–End–Driver des Kalorimeters–der ersten Elektronikstufe des HERA–B Experimentes– erläutert. Daran schließt sich die Beschreibung des Triggersystems an, wobei detailliert auf den ECAL–Pretrigger und den First–Level–Trigger eingegangen wird, da diese von dem Veto–Signal der EEI–Karte beeinflußt werden. Danach folgt eine Beschreibung des sowohl für die Synchronisation des Detektors und der EEI–Karte als auch für vielfältige Untersuchungen der EEI–Karte eingesetzten Fast–Control–Systems. Den Abschluß bildet die Beschreibung von Teilen des Datenerfassungssystems, wobei der Schwerpunkt auf den eingesetzten, schnellen digitalen Signalprozessoren liegt, da diese bei der Auslese der EEI–Karte und der Verarbeitung der Daten Verwendung finden.

4.1 Überblick

Das Zusammenspiel der verschiedenen Trigger– und Datenerfassungskomponenten ist schematisch in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Daten des HERA–B–Detektors werden durch die Ausleseelektronik von den Front–End–Drivern erfaßt. Von dort gelangen die Daten in einen Second–Level–Buffer (SLB) genannten Speicher. Der für die erste Triggerentscheidung wichtige Teil der Detektordaten wird an die Pretrigger weitergeleitet. Sie entscheiden, ob das

Ereignis Bedingungen erfüllt, um vom First–Level–Trigger bearbeitet zu werden. Hat der First–Level–Trigger ein Ereignis bearbeitet, das die notwendigen Bedingungen erfüllt, teilt der FLT dies dem Fast–Control–System durch ein Signal mit. Dieses Signal wird als FLT–Accept bezeichnet. Das FLT–Accept–Signal beinhaltet sowohl die Nachricht, daß ein Ereignis mit bestimmter Bunchnummer akzeptiert wurde, als auch die Nummer des vom FLT akzeptieren Ereignisses. Das Fast–Control–System übermittelt das FLT–Accept–Signal an die Front–End–Driver. Diese senden die Daten des entsprechenden Ereignisses an den Second–Level–Buffer, einen Zwischenspeicher für die zweite Triggerstufe. Vom Fast–Control–System gelangt die FLT–Accept Nummer an den Event–Controller, die dem Switch[1]mitteilt, daß Ereignisse aus dem Second–Level–Buffer an die Computer der zweiten und dritten Triggerstufe zu übermitteln sind. Von der zweiten und dritten Triggerstufe akzeptierte Ereignisse werden über einen Ethernet–Switch den Rechnern der vierten Triggerstufe zugeführt und deren Daten nach der Bearbeitung und Akzeptanz auf Band geschrieben.

4.2 Die Front–End–Driver (FED)

Die HERA–*B* Kalorimeter Front–End–Driver[2] sind als VME Standardplatinen aufgebaut. Jede von ihnen bearbeitet 25 Kanäle[3] des Kalorimeters. Die Bearbeitung jedes einzelnen Kanals findet in einem eigenen Module auf dem FED statt. In Abbildung 4.2 ist die Verarbeitung der Daten durch die FED schematisch dargestellt. Anhand dieser Zeichnung wird im folgenden die Funktionsweise der FED erläutert.

Die synchron mit der HERA–Bunchclock von den Photomultipliern gelieferten Signale werden gleichzeitig auf zwei verschiedene Arten verarbeitet. Für den Einsatz mit der ECAL–Energy–Inhibit–Karte werden die Analogsignale aller 25 Kanäle eines FED nach der Eingangsverstärkung summiert und auf einen Analogsummenausgang geführt. Für die Datennahme durchlaufen die analogen Photomultipliersignale zunächst den Eingangsverstärker und zur Pulsformung ein Integrierglied. Das Signal des Integrators wird von einem Analogkompressor bearbeitet. Dessen Transferkurve (Abbildung 4.3) besitzt zwei verschiedene Steigungen, wobei im unteren Bereich eine Verstärkung des Eingangssignals um den Faktor 2 vorgenommen wird, im oberen Bereich um den Faktor 1. Der Übergangspunkt zwischen den beiden Verstärkungsfaktoren wird für alle Kanäle eines Front–End–Drivers gemeinsam über eine Referenzspannung eingestellt. Durch den Analogkompressor werden die einen 14bit breiten Bereich umfassenden Signale auf einen 12bit breiten Bereich abgebildet und so der Dynamikbereich der Front–End–Driver vergrößert. Ein 12 Bit ADC[4] digitalisiert das Analogsignal und leitet den digitalen Wert zur Speicherung in einen Ringbuffer weiter. Die Speicheradresse innerhalb des 256 Worte tiefen Ringbuffers entspricht der Nummer des Bunches, dem das Signal zugeordnet ist. Diese Bunchnummer wird vom Fast–Control–System an die Subdetektoren und damit auch die ECAL–FED weitergeleitet. Ein vom First–Level–Trigger generiertes FLT–Accept Signal bewirkt eine Nachricht vom Fast–Control–System an die Front–End–Driver, die neben dem FLT–Accept Signal auch die Bunchnummer des akzeptier-

[1]schnelles Netzwerk, vergleiche Kapitel 4.5.1
[2]Typ CAEN VN690
[3]25 Kanäle pro FED im inneren , 32 im mittleren und äußeren bereich
[4]Analog–Digital–Converter, Typ AD9020

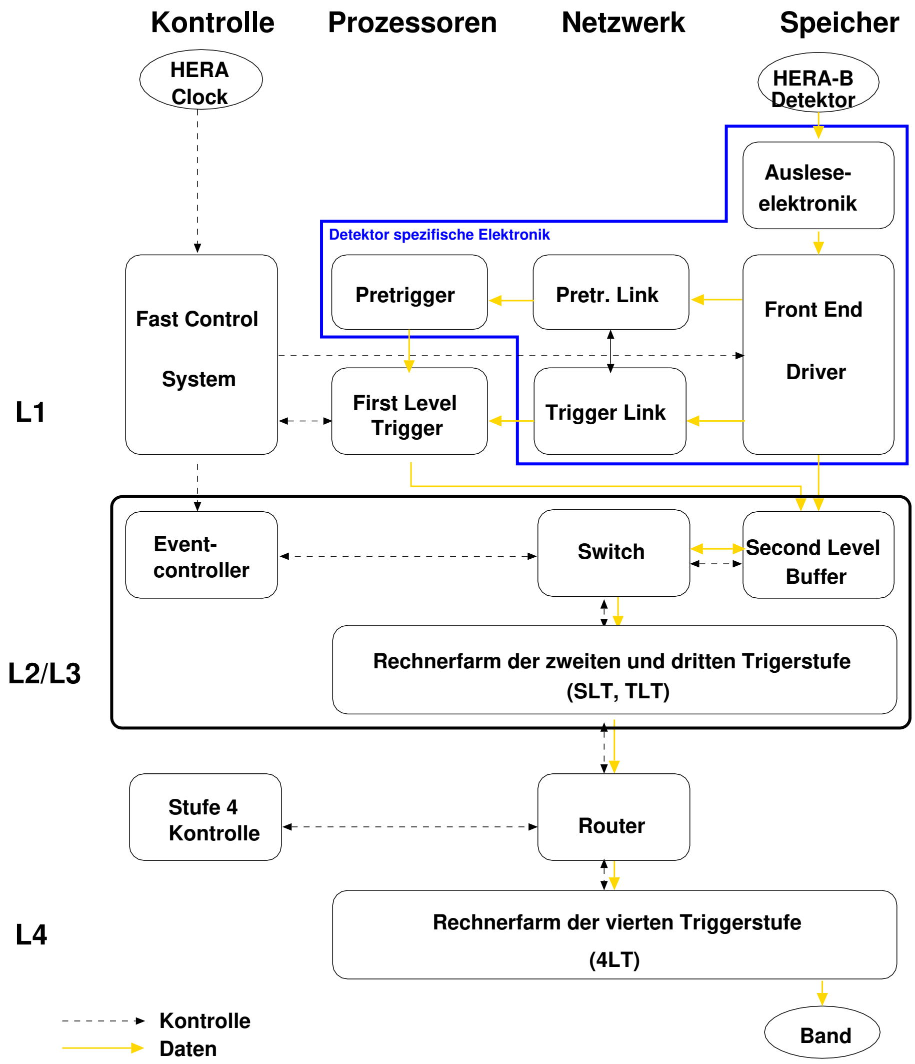

Abbildung 4.1: Systemskizze des Aufbaus des HERA–B Trigger– und Datennahmesystems.

ten Ereignisses enthält. Diese Bunchnummer bildet die Leseadresse für den Ringbuffer, wobei Verzögerungen durch die Front–End–Driver, zum Beispiel durch die ADC–Pipeline, berücksichtigt werden. Die Daten der vom First–Level–Trigger akzeptierten Ereignisse werden aus dem Ringbuffer ausgelesen und bis zum Transfer über den SHARC–Link (Kapitel 4.5.1) zu den Second–Level–Buffern (Kapitel 4.5) in einem FIFO[5] gespeichert.

Zusätzlich zu der Speicherung der Daten in dem Ringbuffer werden den 12 Bit Digitalsignalen, basierend auf einer Tabelle[6], 7 Bit breite, wurzelkomprimierte Daten zuzüglich eines Bits, daß das Überschreiten einer Grenze anzeigt, zugeordnet. Diese Grenze entspricht der Energie E_c, die vom ECAL–Pretrigger (Kapitel 4.3.1) für eine Zelle gefordert wird, um den Triggerprozeß des First–Level–Triggers zu starten. Die insgesamt 8 Bit breiten Daten werden über eine serielle Verbindung an den ECAL–Pretrigger weitergeleitet.

[5]FIFO: First In, First Out
[6]Look Up Table (LUT)

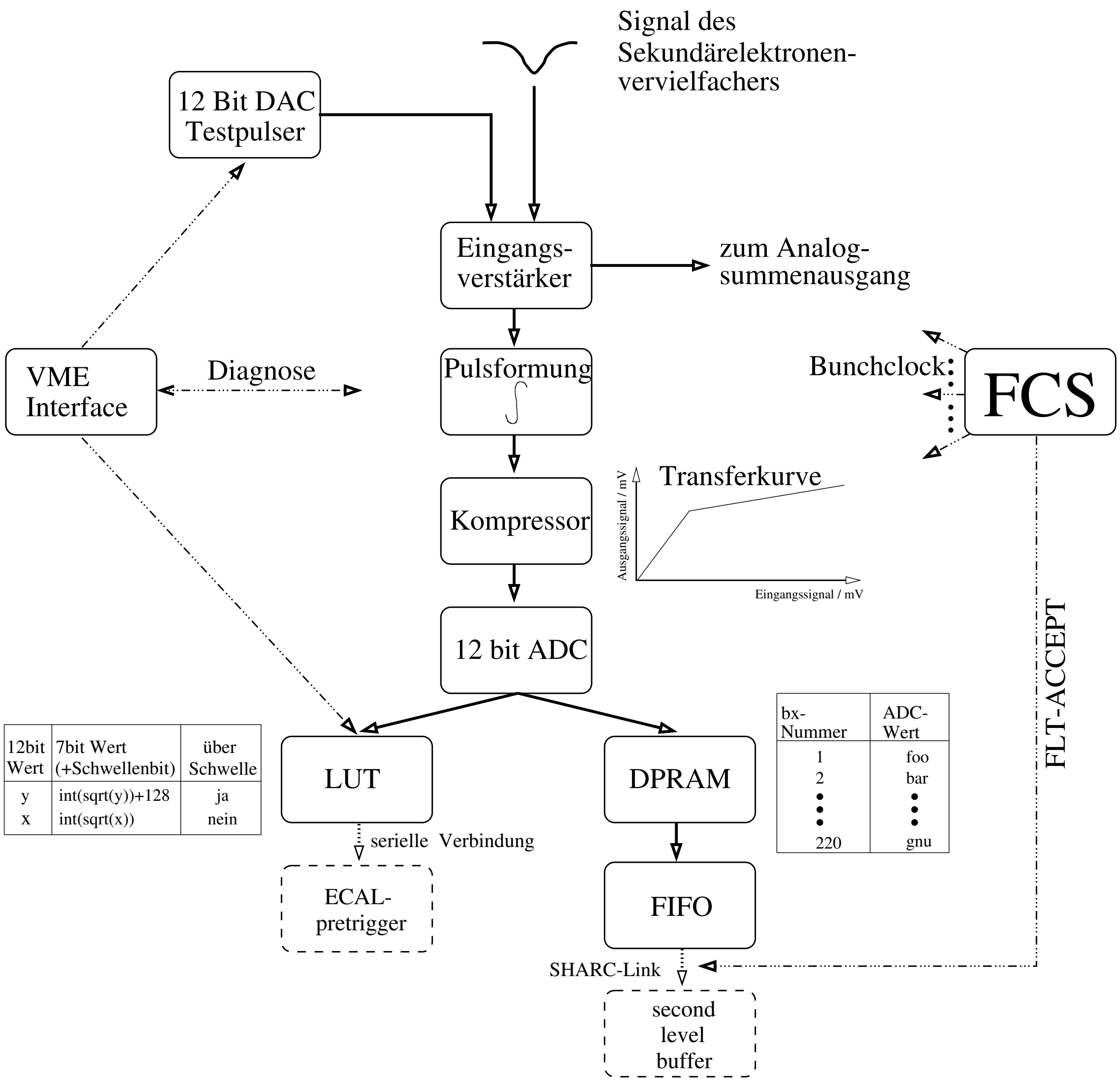

Abbildung 4.2: Signal– und Datenfluß in einem Kalorimeter–FED, synchronisiert vom Fast–Control–System.

Das auf den Karten vorhandene VME–Interface wird für die Kontrolle und Konfiguration der Front–End–Driver verwendet. So bietet es die Möglichkeit, die LUT neu zu laden. Zu Diagnosezwecken ist über die VME–Schnittstelle die Initialisierung der nachfolgend beschriebenen Testpulse möglich.

4.2.1 Die Testpulse

Das Testsystem basiert auf einem Digital–Analog–Konverter (DAC [7]), der ein analoges Signal entsprechend dem gewählten DAC–Wert generiert. Die Analogsignale werden wie reale Signale in die Verarbeitungskette der Front–End–Driver eingeschleust. Die Testpulse können sowohl kontinuierlich als auch gepulst erzeugt werden. Im kontinuierlichen Modus werden

[7] DAC: Digital Analog Converter

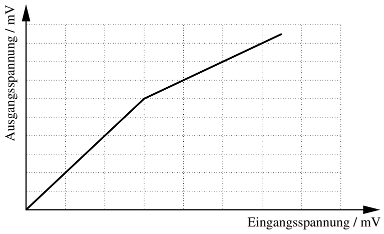

Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Kompressor–Transferkurve der Kalorimeter–FED.

Testpulse im Abstand von 96 ns erzeugt (Abbildung 4.4), im gepulsten Modus wird ein Testpuls durch den Empfang eines FCS–Testpulses ausgelöst (Abbildung 4.5). Um den Einfluß der Testpulser auf die Eingangskanäle möglichst gering zu halten, werden die Testpulsgeneratoren durch Relais während des Normalbetriebs von den Auslesekanälen getrennt.

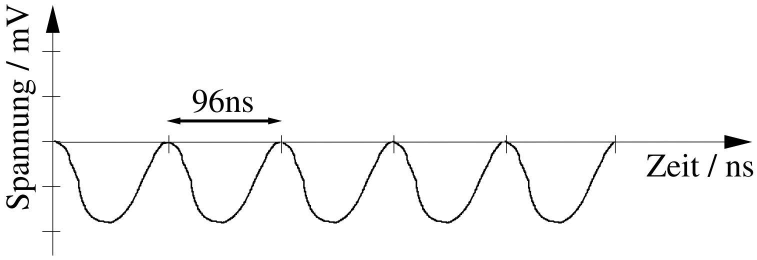

Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der auf den ECAL–FED generierten Testpulse im kontinuierlichen Modus. Nach Initialisierung des Testpulses über das VME–Interface wird der Testpuls alle 96 ns generiert.

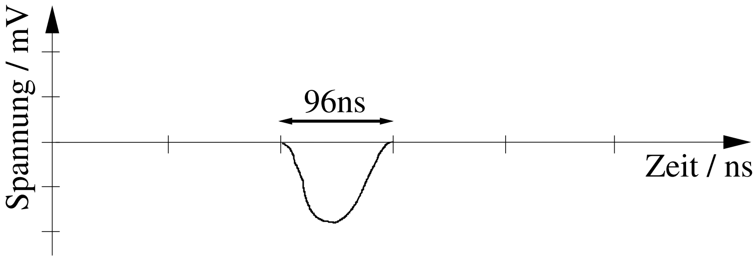

Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der auf den ECAL–FED generierten Testpulse im gepulsten Modus. Der Testpuls wird generiert, wenn ein vom Fast–Control–System erzeugter FCS–Testpuls empfangen wird. Der zeitliche Abstand zweier FCS–Testpulse kann beliebig gewählt werden.

4.3 Die Trigger

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, wird ein vierstufiges Triggersystem eingesetzt. Die Tabelle 4.1 zeigt für die verschiedenen Triggerstufen die Anzahl der benutzten Auslesekanäle,

Trigger	benutzte Detektoren	Kanäle	Algorithmus	Rechenzeit pro Ereignis
Pre	ECAL Myon High p_t	70000	e^-/μ/High-p_t-Kandidaten, liefern interessante Regionen (RoI)	–
FLT	ECAL Myon z.T. Tracking	100k	grobe Spurensuche, ausgehend von RoIs bis zum Magneten; Schnitt auf $m_{inv,J/\psi}$	12 μs
SLT	Kammern im Magneten, Vertexdetektor	400k	feiner Spurensuche im Magnet und Vertexdetektor; Suche nach sek. Vertizes	5 ms
TLT	kompletter Detektor	600k	Spurensuche mit Gesamtdetektorinformation; Physik jenseits “goldener Kanal”	200 ms
4LT	kompletter Detektor	600k	Rekonstruktion des kompletten Ereignisses	4 s

Tabelle 4.1: Die Eigenschaften der verschiedenen Triggerstufen. Dargestellt sind sowohl die Anzahl der verwendeten Kanäle, die verwendeten Detektorkomponenten und der die Triggerentscheidung bildende Algorithmus sowie die pro Ereignis zur Verfügung stehende Zeit.

die verwendeten Detektorkomponenten sowie das hinter der Triggerentscheidung stehende Grundprinzip.

Im folgenden Teil dieses Kapitels werden zunächst die drei Pretrigger (ECAL, Myon, high-p_t) beschrieben, bevor auf die vier Triggerstufen eingegangen wird. Aufgrund der Verknüpfung des INHIBIT–Signals der EEI–Karte mit dem ECAL–Pretrigger wird dieser ausführlicher behandelt. Weiterhin wird detaillierter auf den First–Level–Trigger eingegangen, da ein Einsatzgebiet der EEI–Karte die Unterstützung des FLT ist. Die anderen Triggerstufen werden in ihrer Grundfunktionalität kurz vorgestellt.

4.3.1 Der ECAL–Pretrigger

Im ECAL–Pretrigger wird nach Elektron–Kandidaten gesucht. Die Energie eines elektromagnetischen Schauers wird zu 99% in einem Zylinder deponiert, dessen Radius dem dreifachen des Molière Radius (Kapitel 3) entspricht[23]. Die Abmessung einer Zelle des Kalorimeters entspricht dabei etwa dem doppelten Molière Radius, so daß in einem 3×3 Zellen umfassenden Cluster ein Großteil der Energie eines elektromagnetischen Schauers deponiert wird (Abbildung 4.6).

Diese Einheit von 3×3 Zellen wird als Grundeinheit zur Clusterfindung benutzt. Dabei wird eine in der Grundeinheit deponierte Mindestenergie E_{trig} gefordert. Die für Elektronen charakteristische Schwelle E_{trig} ist abhängig von der Entfernung zum Strahlmittelpunkt. Für Entfernung ab $R \approx 200\ cm$ gilt eine konstante Schwelle von $5\ GeV$, für näher am Strahl

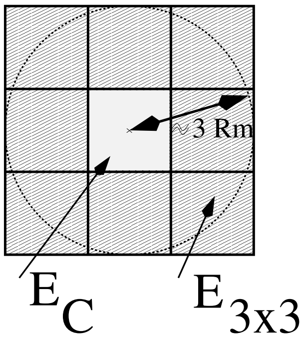

Abbildung 4.6: Für die Clusterfindung im ECAL–Pretrigger benutzte Grundeinheit von 3×3 Zellen. Die Kantenlänge einer Zelle ist etwas kleiner als der doppelte Molière Radius. Das Zentrum der Energiedeposition wird durch Bildung des Schwerpunktes der in den umliegenden Zellen deponierten Energie bestimmt.

befindliche Orte gilt eine durch

$$E_{trig} = K_{trig} \cdot \left(\frac{1}{R/\mathrm{cm}} + \frac{1}{\sqrt{(x/\mathrm{cm})^2 + |\,(y/\mathrm{cm})^3\,|}} \right) \tag{4.1}$$

beschriebene Schwelle[32], mit $K_{trig} = 700\,\mathrm{GeVcm}$. Der zu R^{-1} proportionale Term entspricht einer Beschränkung des Transversalimpulses, während der zweite Term die Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld berücksichtigt. Aufgrund der Ausrichtung des Magnetfeldes unterscheiden sich die Exponenten des X– und des Y–Wertes. Um einen Elektronkandidaten zu erhalten, ist eine Energiedeposition $E_{3\times3}$ oberhalb der gültigen Schwelle E_{trig} in einem 3×3 Cluster notwendig. Weiterhin gilt die Bedingung, daß die im Zentrum des Clusters deponierte Energie E_c mindestens 50% der Clustermindestenergie E_{trig} ausmacht. Zusammengefaßt sind die Bedingungen für einen Elektronkandidaten:

$$E_{3\times3} > E_{trig} \tag{4.2}$$

und

$$E_c > 0.5 \cdot E_{trig}. \tag{4.3}$$

Die in einem Cluster geforderte Mindestenergie E_{trig} ist durch Gleichung 4.1 so bestimmt, daß auch ein außerhalb des Zentrums der Grundeinheit wechselwirkendes Elektron als Elektronkandidat erkannt wird.

Bei der Bestimmung der deponierten Energie ist berücksichtigt, daß die Elektronen vor dem Magneten Bremsstrahlungsphotonen emittieren können. Abhängig von der Position der Elektronkandidaten und der deponierten Energie, kann die Position der im ECAL absorbierten, zugehörigen Bremsstrahlungsphotonen berechnet werden. Dazu nutzt man die Kenntnis des Magnetfeldes sowie des Targets als Wechselwirkungsort aus. Einzig das zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannte Ladungsvorzeichen des Elektronkandidaten ermöglicht die Wahl zwischen zwei Zellen, wovon die Zelle mit der höheren Energiedeposition zur Bremsstrahlungskorrektur benutzt wird. Hinter dem Magnet emittierte Photonen würden dieselbe Zelle treffen wie die Elektronen und dadurch die Impulsbestimmung nicht beeinflussen (Abbildung 4.7). Die in der gewählten Zelle deponierte Energie wird zu der in dem Cluster des Elektronkandidaten deponierten Energie addiert und verbessert so die Bestimmung des Impulses.

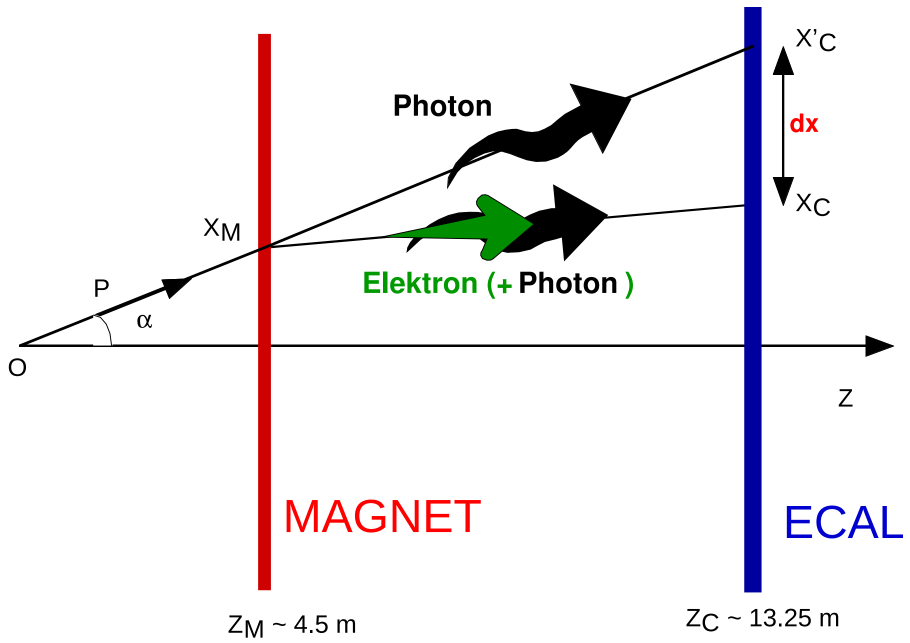

Abbildung 4.7: Funktionsprinzip der Bremsstrahlungskorrektur.

Ausgangspunkt der Suche nach Clustern sind die von den ECAL–Front–End–Drivern als Zellen hoher Energiedeposition markierten Bereiche. Diese Markierung findet, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, durch Anfügen eines zusätzlichen Bits an die gemessene Energie der Zelle, statt, wenn die Energiedeposition in einer Zelle den Wert E_c übersteigt. Ein von der EEI–Karte generiertes INHIBIT–Signal führt zur Ausmaskierung aller dieser Bits, so daß für dieses Ereignis keine Bearbeitung durch die Trigger stattfindet.

Wird ein Elektronkandidaten gefunden, sendet der Pretrigger eine Nachricht mit folgenden Informationen an den FLT:

- der Bunchnummer des Ereignisses
- der deponierte Energie $E_{3\times3}$ und
- der Koordinaten des Kandidaten.

Diese Nachricht startet im nachfolgend beschriebenen FLT den Triggerprozeß.

4.3.2 Die erste Triggerstufe

Die Anforderungen an die erste Triggerstufe des HERA–B Experimentes unterscheiden sich von denen vieler anderer Experimente. Experimente[8] mit festem Target arbeiten i.a. mit kurzen Teilchenbündeln. Auf diese folgen große Leerräume, in denen die Daten verarbeitet und

[8]zum Beispiel NA789 am Fermilab

gespeichert werden. Kollisionsexperimente[9] benutzen i.a. eine kontinuierliche Datennahme. Das Ziel des bei solchen Experimenten eingesetzten First–Level–Triggers ist es zum Beispiel, durch Strahl–Restgas–Wechselwirkung hervorgerufenen Untergrund zu unterdrücken. Diese Ereignisse unterscheiden sich wesentlich von den Ereignissen aus Kollisionen der Teilchenstrahlen durch Energie und Impuls im Schwerpunktsystem.

Beim HERA–B Experiment finden alle 96 ns mehrere Wechselwirkungen statt. Es existieren keine globalen Parameter der Ereignisse, die eine Unterscheidung zwischen Signal und Untergrund ermöglichen. Um den Trigger zweiter Stufe (Second–Level–Trigger – SLT)

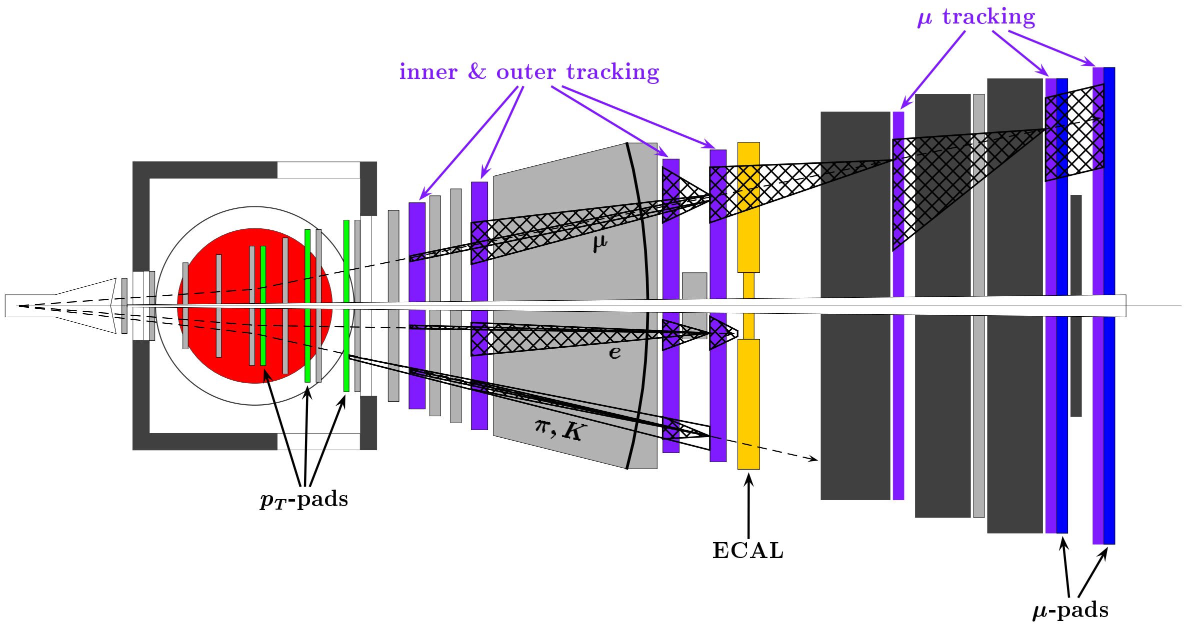

Abbildung 4.8: Das Schema des FLT. Von rechts nach links sieht man die Projektion der Regions–of–Interest (RoIs) auf die stromaufwärts liegenden Detektorkomponenten.

auf der Basis gewöhnlicher Vielzweckprozessoren aufbauen zu können, muß die Eingangsdatenrate etwa 50 kHz betragen. Der FLT muß also für eine Reduktion der Datenrate um den Faktor 200 sorgen (siehe Abbildung 1.5). Um dies zu garantieren, ist die primäre Aufgabe des FLT, aus dem Zerfall des J/ψ stammende Leptonenpaare (e^+, e^- und μ^+, μ^-) zu finden und zu akzeptieren. Zusätzlich existiert die Möglichkeit, allgemeinere Triggersignale zu definieren. Deren Bedingungen können aus Kombinationen von bis zu zwei Spuren , Ladung, Impuls, Transversalimpuls und Paarmasse bestehen.

Die Positionen der von den Pretriggern gefundenen Kandidaten werden großflächig in Richtung Target projiziert. In diesen interessanten Bereichen (RoI[10]) suchen die Spurfindeeinheiten (TFU[11]) nach passenden Spuren. Wird eine passende Spur in allen beteiligten TFU gefunden, berechnet die Spurparametereinheit (TPU[12]) die Spurparameter und leitet

[9]zum Beispiel H1
[10]RoI: Region of Interest
[11]TFU: Track–Findung–Units
[12]TPU: Track–Parameter–Unit

diese zur Generierung eine Triggerentscheidung an die Triggerentscheidungseinheit (TDU[13]) weiter, die die Masse des Kandidaten auf Übereinstimmung mit dem J/ψ–Massenbereich prüft. Die grundsätzliche Filterstrategie des FLT ist in Abbildung 4.8 dargestellt und wird im folgenden detaillierter beschrieben.

Zur Kommunikation der verschiedenen Komponenten des First–Level–Triggers wird ein Nachrichtensystem benutzt. Zunächst werden Spurkandidaten im Myondetektor, im elektromagnetischen Kalorimeter und im High–p_t–System aus den Informationen der entsprechenden Pretrigger bestimmt. Die Pretrigger generieren eine Nachricht mit allen für den Start der Spurverfolgung relevanten Informationen. Die in dieser Nachricht enthaltenen Informationen über zu verfolgende Kandidaten werden von den Track–Findung–Units benutzt, um die näher zu untersuchende Regionen (Regions of Interest) vorherzusagen. Dabei wird dem von den Pretriggern geliefertem Startpunkt in einer Tabelle die Projektion des Punktes auf die nächste, am Triggerprozeß beteiligten Spurkammer zugeordnet. Der Tabelle wird ebenfalls die für die Region zuständige Track–Finding–Unit entnommen. Diese sind nur für einen kleinen Teil einer Spurkammer zuständig, dessen Größe mit dem Abstand vom Strahl aufgrund der sinkenden Teilchendichte zunimmt. Wird in der projizierten Region of Interest ein Treffer in der Spurkammer gefunden, nutzt man diese Information, um eine interessante Region für die nächste Superlage der Spurkammern vorherzusagen. Die Lage dieser Region wird an die nächste(n) Track–Finding–Unit(s) weitergeleitet. Jede Track–Finding–Unit steht mit bis zu vier weiteren Einheiten in Kontakt, um auch TFU–übergreifende Regions of Interest abdecken zu können. Dieser Prozeß der Spursuche läuft vom den Prozeß startenden Pretrigger bis zum Magneten durch, bis entweder die Suche erfolglos beendet wird oder der Kandidat durch alle beteiligten Spurkammern verfolgt wurde.

Die letzte Track–Finding–Unit übermittelt die Position und Richtung einer gefundenen Leptonenspur an weitere Spezialprozessoren, die Track–Parameter–Unit. Mit den ermittelten Daten und unter der Bedingung, daß eine Spur von der mittleren Targetposition ausgehen muß, berechnet die entsprechende Track–Parameter–Unit den primären Impulsvektor des Leptons. Hierbei können Schnitte auf den Gesamtimpuls P, den Polarwinkel ϑ und den Transversalimpuls p_t vorgenommen werden. Für Elektronen kann durch den Vergleich von Impuls und Kalorimeterenergie die Unterdrückung von fälschlich rekonstruierten Spuren gesteigert werden.

Die Trigger–Decision–Unit sammelt die Daten der Leptonkandidaten von den TPUs und sortiert sie, da der FLT als asynchrone Pipeline aufgebaut ist, entsprechend der Bunchnummer. Die Daten werden zu einer synchronen Datenstruktur zusammengefügt. Die invariante Masse von Leptonpaaren werden mit Hilfe von Tabellen berechnet, um den Massenbereich des J/ψ zu isolieren. Die Parameter aller Kombinationen von zwei Leptonen werden mit einer Tabelle verglichen, um eine Triggerentscheidung zu generieren. Spezielle Triggerbedingungen können durch Veränderungen in der Tabelle bestimmt werden.

Das Akzeptieren eines Ereignisses wird dem Fast–Control–System durch Übersendung eines FLT–Accept Signals mitgeteilt. Das FCS verteilt das FLT–Accept Signal an die Tochtereinheiten. Empfängt die Trigger–Decision–Unit das FLT–Accept Signal, leitet diese die für das Ereignis gewonnenen Triggerdaten an den Second–Level–Buffer weiter. Die TDU sendet die Daten nicht sofort an den Second–Level–Buffer, sondern wartet auf ein FLT–Accept, da

[13]TDU: Trigger–Decision–Unit

das FCS einen FLT–Accept verwirft, wenn dieses Signal mehr als 128 Bunchclockzyklen nach dem Ereignis auftritt. Die Speicher der einzelnen Front–End–Driver sind für eine maximale Verzögerung von 128 Bunchzyklen ausgelegt, so daß bei einem später eintretendem FLT–Accept schon Teile der Daten gelöscht wären. Aus dieser Beschränkung resultiert die für den First–Level–Trigger–Prozeß maximal zur Verfügung stehende Zeit von $128 \cdot 96\ ns = 12\ \mu s$. Durch das empfangene FLT–Accept Signal wird die Ereigniskontrolle angewiesen, alle Daten des entsprechenden Ereignisses aus dem Second–Level–Buffer an die nächste Triggerstufe zu übertragen. [29] [30] [31]

4.4 Das Fast Control System

Das Fast Control System (FCS) dient der Synchronisation aller HERA–B Front–End–Driver und der Markierung der Daten einzelner Detektorkomponenten, um zu einem Ereignis gehörende Daten zusammenfügen zu können. Weiterhin übermittelt das Fast–Control–System die Nummer der vom First–Level–Trigger akzeptierten Ereignisse an die Event–Controller, um die Übertragung der zu dem Ereignis gehörenden Daten aus dem Second–Level–Buffer zur zweiten Triggerstufe zu veranlassen.

Das Fast–Control–System ist in einem sogenannten Mutter–Tochter–Schema realisiert (siehe Abbildung 4.9). Eine zentrale Muttereinheit beherbergt die gesamte Intelligenz des Systems und benutzt Tochtereinheiten in jedem mit Front–End–Drivern bestücktem VME–Crate, um die Signale den FED zu übermitteln. Die Muttereinheit ist direkt mit der HERA–Bunchclock verbunden. Die Signale werden von der Muttereinheit über optische Links zu Verteilerkarten gesendet. Dort werden die optischen Signale in elektrische Signale umgewandelt und über differentielle Doppeldrahtleitungen[14] zu den Tochtereinheiten verteilt.

Die Tatsache, daß das FCS in Verbindung zu jedem Front–End–Driver hat, ermöglicht außerdem die Bereitstellung von Testsignalen und verschiedenen Triggersignalen für die FED.

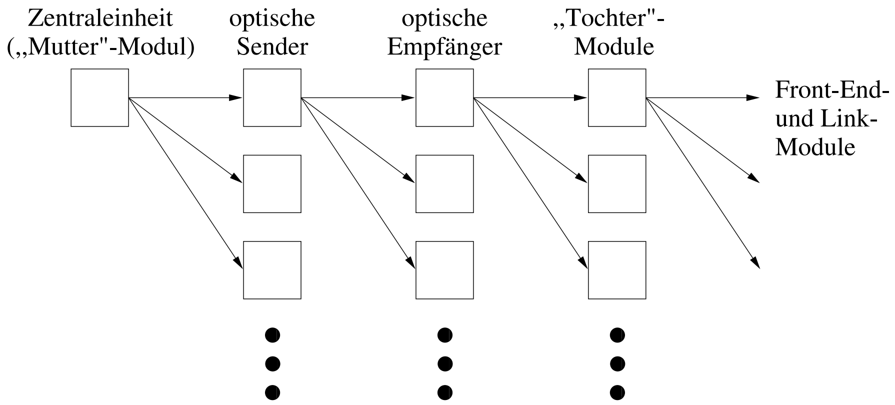

Abbildung 4.9: Schematischer Aufbau des FCS [34].

[14]twisted pair Kabel

4.4.1 Die Muttereinheit

Von HERA werden zwei Signale geliefert und der FCS–Muttereinheit zur Verfügung gestellt. Zum einen das Signal der HERA–Bunchclock (Bx–Signal) mit einer Frequenz von 10.417 MHz, zum anderen ein Signal für jeden Umlauf des ersten Buckets (1Bx–Signal) mit einer Frequenz von etwas 47 kHz (siehe Kapitel 1.1).

Über das FCS können Testtrigger an ausgewählte Tochtereinheiten geschickt werden. Diese können durch Eingangssignale auf der Vorderseite der Muttereinheit, duch VME–Befehle oder zufällig erzeugt werden.

4.4.2 Die Tochtereinheit

Von der zentralen Muttereinheit wird die Information an die Tochtereinheit gesendet. Jede Tochter hat eine eindeutige Adresse. Neben der Verzögerung des HERA–Bunchclocksignals in Schrittweiten von 0.5 ns kann ein Offset der BX–Nummer relativ zur Muttereinheit programmiert werden, um Verzögerungen innerhalb der Front–End–Driver so auszugleichen, daß den Daten die korrekte Bunchnummer zugeordnet wird. Mit einer Triggermaske wird selektiert, welche– von der Mutter– oder von der Tochtereinheit– generierten Triggersignale akzeptiert und auf die VME–Backplane[15] an die Front–End–Driver weitergeleitet werden.

Neben dem eventuell verzögerten BX–Signal stehen auf der Vorderseite der Tochtereinheit unter anderem Testsignale und das FLT–Accept Signal als differentielle TTL Signale[16] zur Verfügung. Das Zeitverhalten dieser Signale ist identisch mit den auf der Backplane generierten und zu den Front–End–Drivern übertragenen Signalen. Dies ermöglicht zum einen die Kontrolle der gesendeten Signale, zum anderen können diese Signale für Untersuchungen der Elektronik der EEI–Karte zum Beispiel als Trigger für ein Oszilloskop eingesetzt.

Durch einen an die Tochtereinheit gesendeten Befehl kann ein sogenannter Testpulstrigger ausgelöst werden. Ein weiterer Befehl erlaubt zu entscheiden, ob das Signal auf der Vorderseite der Tochtereinheit oder auf der VME–Backplane generiert werden soll. Die Erzeugung eines Testpulses erzeugt für die entsprechende Bunchnummer automatisch ein FLT–Accept–Signal, um die Daten der Front–End–Driver entsprechend auslesen zu können. Die Zeit zwischen Testpuls und FLT–Accept kann zwischen 0 und 31 Bunchclocksignalen gewählt werden.

4.5 Die Datenerfassung

Bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz und einem Signal–zu–Untergrund–Verhältnis von 10^{-11} ist neben dem in Kapitel 4.3 beschriebenen, leistungsfähigen und effektiven Triggersystem vor allem ein Datenerfassungssystem nötig, das die große Datenmenge bewältigen kann. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die für das Datennahmesystem sehr wichtigen SHARC–Prozessoren beschrieben sowie deren Einsatz im Datenerfassungssystem erläutert. Der Einsatz der SHARCs bei der Auslese der EEI–Karte wird im nächsten Kapitel detailliert beschrieben.

[15] Verbindung zwischen allen Karten in einem VME–Crate

[16] <0.8V= logisch 0, >2V= logisch 1

4.5.1 Die SHARC–Prozessoren

Die SHARC[17]–Prozessoren sind digitale Signalprozessoren (DSP), die sich besonders für die schnelle Verarbeitung großer digitaler Datenmengen eignen. Wesentlich sind in diesem Zusammenhang die große Bandbreite von bis zu 240 MByte pro Sekunde und die hohe Rechengeschwindigkeit von bis zu 120 Millionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde (MFLOPS, Million FLOating points Per Second). Der chipinterne Speicher von 4 Mbits ermöglicht die schnelle Zwischenspeicherung größerer Datenmengen [42].

4.5.1.1 Einsatz der SHARCs bei HERA–B

Die SHARC–Prozessoren finden beim HERA–*B* Experiment vielfältige Anwendung. Die etwa 1000 Prozessoren werden in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Second–Level–Buffer (Abbildung 4.1):
  Als Second–Level–Buffer bezeichnetes, direktes Bindeglied zwischen dem Detektor und der Datenerfassung lesen SHARCs die Daten nach einem FLT–Accept aus den Front–End–Drivern aus und speichern sie solange, bis die Daten entweder von der zweiten und dritten Triggerstufen verarbeitet oder aber verworfen wurden. Hierfür ist zum einen die große Bandbreite wichtig, um die Datenmengen schnell transportieren zu können, andererseits aber auch der in den SHARCs integrierte schnelle Speicher, um die Daten bis zur Entscheidung der zweiten und dritten Triggerstufe speichern zu können.

- Switch (Abbildung 4.1):
  Als schnelles, breitbandiges Netzwerk (Switch) werden die SHARC–Prozessoren zum Transfer der Daten vom Second–Level–Buffer zur SLT/TLT–Farm benutzt. Dazu ist der Switch sowohl mit jedem Second–Level–Buffer als auch mit jedem Computer der SLT/TLT–Farm verbunden. Der Switch wird über die Event–Controll gesteuert.

- Event–Controller (Abbildung 4.1):
  Als Event–Controller werden SHARCs eingesetzt, um die Verfügbarkeit der Computer der SLT/TLT–Farm zu verwalten. Den Daten der vom First–Level–Trigger akzeptierten Ereignisse weist der Event–Controller einen verfügbaren Computer der SLT/TLT–Farm zu und veranlaßt den Transport der Daten über den Switch zu dem entsprechendem Computer. Weiterhin verwaltet der Event–Controller die Second–Level–Buffer und löscht dort Daten von Ereignissen, um ein Überlaufen des Second–Level–Buffers zu verhindern. Dabei werden entweder die Daten gelöscht die bereits komplett zum Third–Level–Trigger übertragen wurden, oder aber Daten von Ereignissen die durch die Triggerstufen abgelehnt wurden.

- Verschiedenes:
  SHARCs werden zur Auslese der EEI–Karte eingesetzt. Dabei bieten sie den Vorteil, die Daten vor dem Versand über das Netzwerk verarbeiten zu können, und somit nur Ergebnisse der Analyse großer Datenmengen verschicken zu müssen. Weiterhin werden SHARCs zur Auslese von Front–End–Drivern über die VME–CPU während der Testphase eingesetzt.

[17]Super Harvard ARchitecture Computer

Die bei den SHARCs verwendete Harvard Architektur zeichnet sich durch voneinander getrennte Daten– und Programmbusse aus. Die Busse und die getrennt voneinander existierenden Daten– und Programmspeicher lassen sich durch Programmierung sehr flexibel den entsprechenden Bedürfnissen anpassen. Jeder SHARC–Prozessor besitzt 4 MBit (512 kByte) internes RAM, das beliebig in 32bit oder 48bit großen Worten konfiguriert werden kann. Pro SHARC–Prozessor stehen 6 sogenannte Linkports zur Verfügung, die mit einer Datenübertragungsrate von jeweils 40 MByte/s arbeiten und entweder als Sender, als Empfänger oder als Sender und Empfänger betrieben werden können. Der in jedem SHARC–Prozessor integrierte Ein–/Ausgabeprozessor bietet 10 DMA (Direct Memory Access) Kanäle zur vom Hauptprozessor unabhängigen Kommunikation an. Zwischen bis zu 6 SHARC–Prozessoren kann die Kommunikation neben den Linkports zudem über einen gemeinsamen Bus geschehen. Diese Möglichkeit führt zu der bei HERA–*B* verwendeten Implementierung des sogenannten HERA–*B* SHARC–Clusters (Abbildung. 4.10).

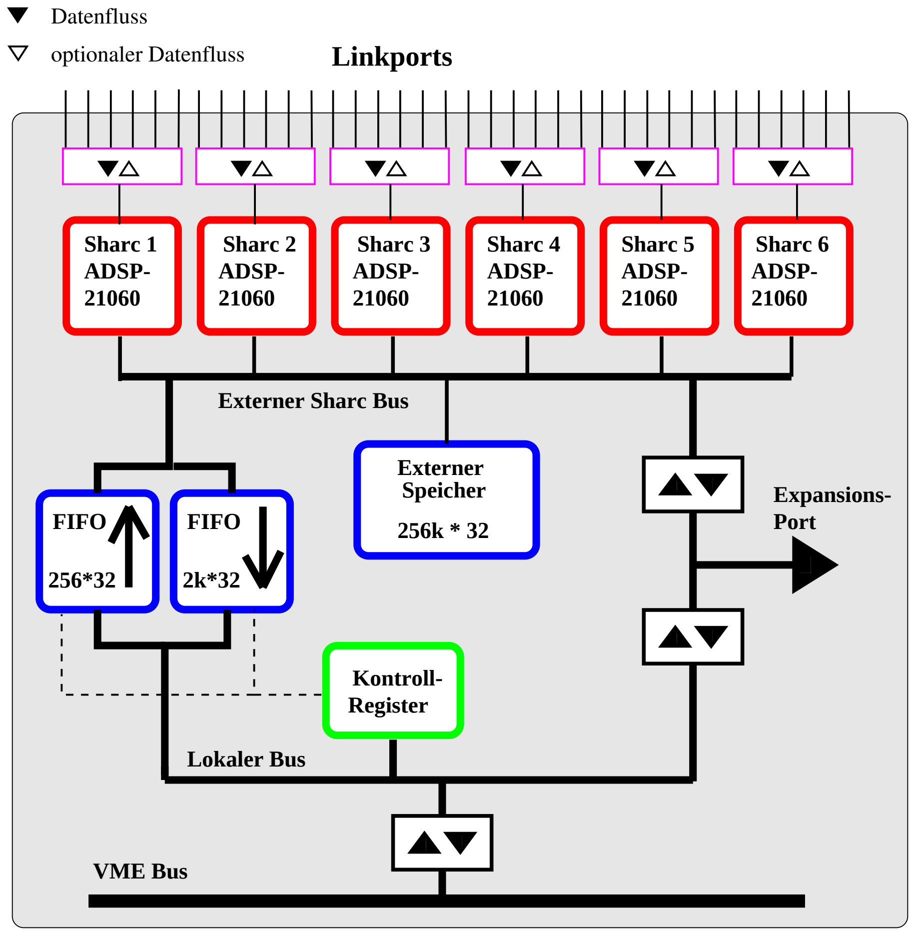

Abbildung 4.10: Das sechs SHARC–Prozessoren enthaltene HERA–*B* SHARC–Cluster.

Dabei sind 6 SHARC–Prozessoren auf einer VME–Karte untergebracht und durch einen gemeinsamen, internen Bus miteinander verbunden. Die Ausführung als VME–Karte ermöglicht den Zugriff auf den von den SHARCs und der VME–CPU schreib–/lesbaren FIFO sowie auf Kommunikations– und Kontrollregister von der VME–CPU aus. Jeder Prozessor kann mit 6 Linkports ausgerüstet werden[18], so daß pro SHARC–Cluster bis zu 36 Ein–/Ausgänge zur Verfügung stehen.

Neben diesen gerade für die Datenerfassung und die kurzzeitige Datenspeicherung wichtigen Eigenschaften bietet der SHARC–Prozessor eine hohe Rechengeschwindigkeit. Die mit 40 MHz getakteten Prozessoren garantieren durch die verwendete RISC–Architektur die Abarbeitung jedes Befehls innerhalb eines Taktzyklus. Die Abarbeitung eines Befehls erfolgt in einer dreistufigen Pipeline. Ein Befehl wird zunächst aus dem Programmspeicher gelesen, anschließend dekodiert und im dritten Schritt ausgeführt. Bis zu zwei Befehle können, falls sie nicht auf gleiche Register oder Speicherbereiche zugreifen, parallel ausgeführt werden.

Auf die Programmierung der SHARC–Prozessoren wird in Kapitel 8.1, am Beispiel der Auslesesoftware für die im nächsten Kapitel beschriebene EEI–Karte, eingegangen.

[18]über piggy–back–boards gennannte Aufsätze

Kapitel 5

Die ECAL Energy Inhibit Karte

In der ECAL Energy Inhibit (EEI) Karte werden die Analogsummen aller ECAL–Kanäle des inneren Teils des Kalorimeters aufsummiert. Die Gesamtsumme wird für jeden Bunch mit einem einstellbaren Wert, der INHIBIT–Grenze, verglichen. Das Überschreiten dieses Wertes führt zur Generierung des sogenannten INHIBIT–Signals als Veto–Signal für die Pretrigger. Die Energiesumme wird über eine Schnittstelle an ein SHARC–Cluster weitergeleitet.

Der Einsatz der EEI–Karte läßt sich in zwei Bereiche aufteilen, die im folgenden erläutert werden. Beide Einsatzgebiete basieren darauf, daß die im inneren Teil des Kalorimeters deponierte Energie in fester Relation zu der Anzahl gleichzeitig stattgefundener Wechselwirkungen von Protonen mit den Targetdrähten steht. Dies wurde in Kapitel 3.3 gezeigt (Abb. 3.3,3.4).

- Einsatz zur Unterstützung des Triggersystems:
  Für den Einsatz zur Unterstützung des Triggersystems ist die INHIBIT–Grenze, ab der die Energiesumme zu einem INHIBIT–Signal führt, von wesentlicher Bedeutung. Die INHIBIT–Grenze wird so gewählt, daß sie einer Anzahl von Teilchenspuren entspricht, die über der von den Triggerstufen zu bewältigenden Anzahl liegt. Das INHIBIT–Signal der EEI–Karte kennzeichnet also Ereignisse sehr hoher Multiplizität. Das INHIBIT–Signal wird von der EEI–Karte zu den Pretriggern (Kapitel 4.3.1) übertragen. Die Pretrigger generieren Nachrichten, um einen Triggerprozeß zu starten, falls Kandidaten für eine Ereignisrekonstruktion gefunden werden. Durch das INHIBIT–Signal werden diese Nachrichten unterdrückt und damit die Verarbeitung des Ereignisse durch die weiteren Triggerstufen verhindert. Ereignisse hoher Multiplizität beinhalten viele Spurkandidaten, die durch den First–Level–Trigger nicht rekonstruiert werden können und somit den FLT lange beanspruchen würden. Dadurch können nachfolgende Ereignisse nicht mehr bearbeitet werden. Diese Totzeit wird durch das INHIBIT–Signal verhindert. Die EEI–Karte stellt somit eine wesentliche Ergänzung des Triggersystems dar, die seine Einsatzfähigkeit wesentlich erhöht.

- Einsatz zur Ratenmessung und zu Strahluntersuchungen:
  Der innere Teil des Kalorimeters stellt einen Zähler großer Akzeptanz dar, dessen feine Granularität nicht zu den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Sättigungseffekte der zur Ratenmessung verwendeten Szintillationszähler führt. Die Energiesumme des inneren Teils des Kalorimeters steht für jeden am HERA–B Experiment vorbeifliegenden Pro-

tonenbunch zur Verfügung. Dies ermöglicht den Aufbau eines Systems zur Messung der Beiträge einzelner Bunche und deren zeitlicher Veränderung. Aufgrund der großen Akzeptanz ist im Gegensatz zu dem bisher eingesetzten FADC–System (Kapitel 2.5) nicht die Bildung eines Mittelwerts über $\mathcal{O}(5000)$ Umläufe des Protonenstrahls notwendig. Der Beitrag eines einzelnen Bunches zur Wechselwirkungsrate steht für jeden Umlauf des Strahls zur Verfügung. Die EEI–Karte ermöglicht den Zugriff auf die große Datenmenge der 2000 Kanäle des inneren Bereichs ohne Beeinträchtigung des regulären Betriebs des Kalorimeters.

Im folgenden Teil dieses Kapitels wird die Funktionsweise der EEI–Karte erläutert, daran anschließend werden die technischen Details der Karte beschrieben. Es folgt eine Betrachtung der Auflösung und des dynamischen Bereichs der EEI–Karte in Verbindung mit den ECAL Front–End–Drivern sowie eine Diskussion der Möglichkeiten, die die EEI–Karte in Verbindung mit den SHARCs bietet. Zuletzt werden die benutzten Versuchsaufbauten beschrieben und das Meßprogramm vorgestellt.

5.1 Die Funktionsweise

In Abbildung 5.1 ist der Aufbau der ECAL–Energy–Inhibit–Karte schematisch dargestellt. Die von den 84 Front–End–Drivern des inneren Bereichs des Kalorimeters gelieferten Analogsummensignale werden, paarweise zusammengeführt, in die 42 Eingänge der EEI–Karte geleitet. Dort wird eine analoge Gesamtsumme aller Eingangssignale gebildet und diese mit einem ADC digitalisiert. Ein programmierbarer Logikbaustein vergleicht die Gesamtsumme mit der gewählten INHIBIT–Grenze und erzeugt gegebenenfalls ein digitales INHIBIT–Signal zur Weiterleitung an die Pretrigger. Zusätzlich wird beim Überschreiten der INHIBIT–Grenze den digitalisierten Daten ein sogenanntes INHIBIT–Bit zugefügt. Die Digitaldaten können im Diagnosemodus der Karte über die VME–Schnittstelle ausgelesen werden. Im regulären Betrieb werden diese Digitaldaten über die SHARC–Schnittstelle schnellen digitalen Signalprozessoren (SHARCs) zugeführt. Auf die SHARCs wurde in Kapitel 4.5.1 bei der Beschreibung der HERA–B Datenerfassung eingegangen. Zur Synchronisation der EEI–Karte mit dem HERA–B Detektor ist auf der Karte eine Schnittstelle zum Fast–Control–System integriert. Über das Fast–Control–System werden zur Zuordnung der Daten notwendige Informationen sowie das Signal der HERA–Bunchclock geliefert. Die Steuerung der Karte, wie zum Beispiel das Programmieren der INHIBIT–Grenze, geschieht über die erwähnte VME–Schnittstelle.

5.2 Der Aufbau

Die EEI–Karte ist als VME–Karte aufgebaut. Der in Abbildung 5.2 schematisch dargestellte Aufbau der Energy Inhibit Karte läßt sich in drei Funktionsgruppen einteilen: Signalverarbeitung, Steuerung und Kommunikation. Diese Funktionsgruppen werden im folgenden detailliert, beschrieben bevor auf das Zeitverhalten der EEI–Karte eingegangen wird.

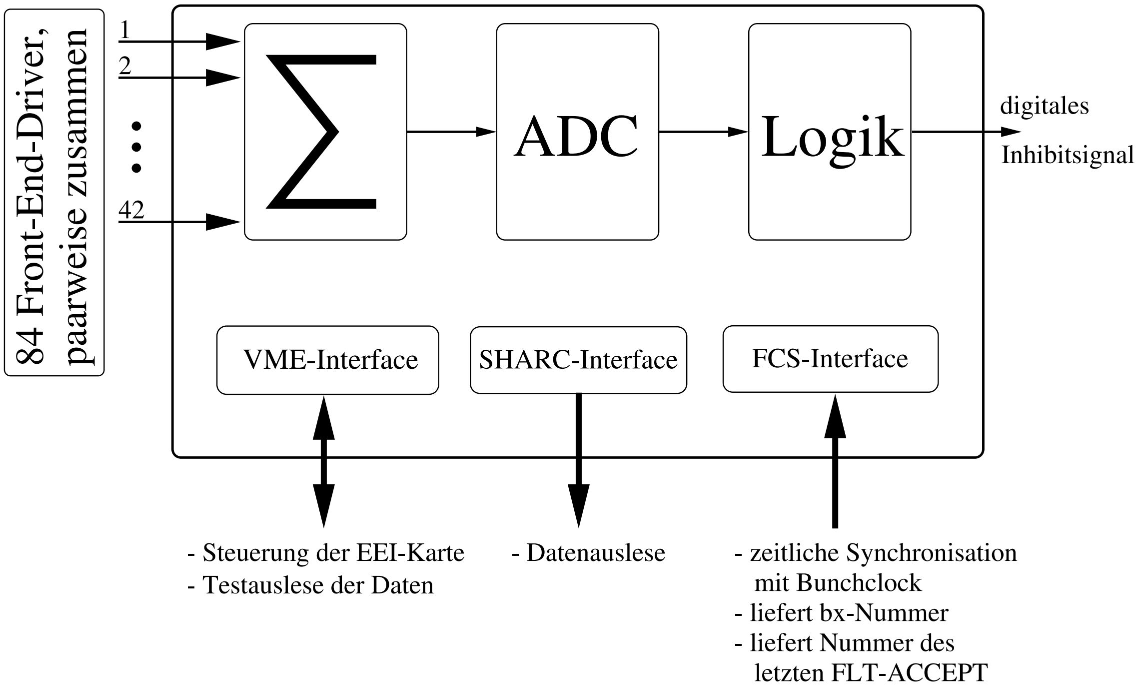

Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der ECAL–Energy–Inhibit–Karte.

5.2.1 Die Signalverarbeitung

Die Signalverarbeitung auf der EEI–Karte ist in zwei Bereiche unterteilt. Der eine Bereich dient der Bearbeitung des analogen Signals, der andere der Bearbeitung des daraus resultierenden Digitalsignals. Die Bearbeitung des Analogsignals umfaßt die Summierung der Signale und die Digitalisierung. Das Digitalsignal wird mit der INHIBIT–Grenze verglichen und um das INHIBIT–Bit ergänzt.

- Die analoge Signalverarbeitung:
  An der Vorderseite der EEI–Karte befinden sich 48 Eingänge. An 42 dieser Eingänge werden die paarweise zusammengeführten Analogsummenausgänge der 84 verwendeten Front–End–Driver, die die 2000 Kanäle des inneren Bereichs des Kalorimeters auslesen, angeschlossen. Je sieben Eingangskanäle werden auf die Eingänge eines der sechs Summierer geführt, der das analoge Summensignal der Eingänge des Summierers bildet. Die sechs Ausgangssignale der ersten Summationsstufe werden in einer zweiten Stufe summiert und ergeben so die analoge Summe aller Kanäle des inneren Bereichs des Kalorimeters. Die Eingangssignale werden durch die beiden Summationsstufen um einen Faktor $1/8 \cdot 1/8 = 1/64$ herunter skaliert. 64 identische Eingangssignale ergeben also nach der Summation ein Signal mit der Höhe eines Eingangssignals. Die Verstärkung der einzelnen Summierer wird so eingestellt, daß der dynamische Bereich des ADC von 2 V, bei einer mittleren Belegung des inneren Kalorimeterbereichs von 10%, erreicht wird. Das analoge Summensignal wird von einem 8 Bit ADC[1] mit der vierfachen Frequenz der Bunchclock digitalisiert. Zur weiteren Bearbeitung wird der jeweils vierte digitali-

[1] Typ AD9012, Hersteller: Analog Devices

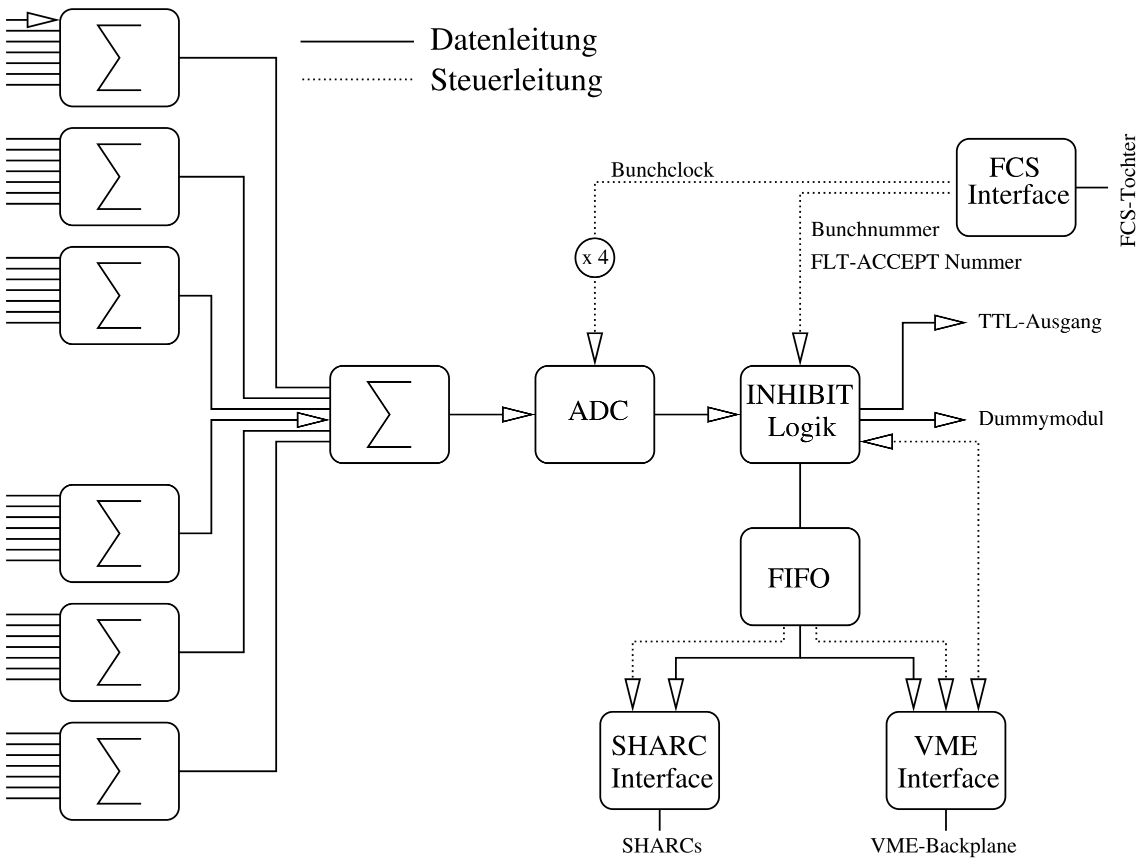

Abbildung 5.2: Blockschaltbild der ECAL Energy Inhibit (EEI) Karte

sierte Wert benutzt. Dieser repräsentiert aufgrund des Zeitverhaltens in Abbildung 5.3 den stabilen Teil des Analogsignals.

- Die digitale Signalverarbeitung:
  Die Ausgabe des ADC wird durch einen programmierbaren Logikbaustein[2] geleitet, welcher die digitale Energiesumme mit der eingestellten INHIBIT–Grenze vergleicht und das INHIBIT–Bit setzt, falls die Energiesumme größer als die INHIBIT–Grenze ist. Das INHIBIT–Bit wird den Digitaldaten als neuntes Bit angehängt.

5.2.2 Die Kommunikation

Die Kommunikation der EEI–Karte mit der Außenwelt umfaßt sowohl die Bereitstellung der Energiesumme und des INHIBIT–Signals als auch den Empfang der für die Synchronisation mit dem HERA–*B* Detektor notwendigen Daten des Fast–Control–Systems sowie die Steuerung der Karte.

- VME–Schnittstelle:
  Zur Initialisierung der EEI–Karte mit Hilfe schreib–/lesbarer Register (Tabellen 5.1

[2]PLD MAX7064–7, Hersteller: Maxim

und 5.2) ist die EEI–Karte über die VME–Schnittstelle an den VME–Bus angeschlossen. Befindet sich die EEI–Karte durch Setzen des entsprechenden Registerbits im Diagnosemodus, können durch die VME–Schnittstelle die gewonnenen Daten aus dem für die SHARC–Schnittstelle (siehe unten) zuständigem FIFO gelesen werden.

- Fast–Control–System–Schnittstelle:
Die FCS–Schnittstelle liefert für den Einsatz der EEI–Karte wichtige Informationen. Zum einen ist dies die in den Daten (Kapitel 5.3) enthaltene Nummer des am Target vorbeifliegenden Protonenbunches, zum anderen die im Kopf eines Datensatzes stehende Nummer des letzten, vom First–Level–Trigger akzeptierten Ereignisses. Weiterhin verteilt das Fast–Control–System die HERA–Bunchclock, woraus die Gatefrequenz des ADC generiert wird, um das Analogsignal zum richtigen Zeitpunkt zu digitalisieren.

- SHARC–Schnittstelle:
Über ein 12 poliges Flachbandkabel ist die EEI–Karte mit einem SHARC (Kapitel 4.5.1) verbunden. Eventuell auftretende Verzögerungen bei der Auslese werden durch einen 4096 Datenworte tiefen FIFO abgefangen.

- TTL–Inhibit–Ausgang:
Das INHIBIT–Signal wird als differentielles TTL–Signal auf der Vorderseite der EEI–Karte zur Verfügung gestellt, von wo aus es an die Pretrigger verteilt wird.

- Dummy–Modul:
Die acht Bit des digitalen Summensignals können zusammen mit dem als neuntes Bit angefügtem INHIBIT–Bit in einen Auslesekanal eines ECAL–Front–End–Drivers eingeschleust werden. Auf dem entsprechendem Front–End–Driver ist ein Auslesemodul gegen ein so genanntes Dummymodul ersetzt. Dieses Dummymodul ersetzt die ADC–Daten des ausgetauschten Auslesemoduls durch die digitalen Daten der EEI–Karte.Dadurch sind sie in die reguläre HERA–*B* Datenerfassung eingebunden und stehen später zu Diagnosezwecken zur Verfügung. Die Verzögerung, mit der das Digitalsignal inklusive INHIBIT–Flag an das Dummymodul geschickt wird, kann in verschiedenen Stufen durch Verändern der in den Tabellen 5.1 und 5.2 beschriebenen Register 0x22 und 0x24 eingestellt werden. Dies ist notwendig, um die Daten der EEI–Karte synchron mit den ECAL–Daten verarbeiten zu können.

5.2.3 Die Steuerung

Die Steuerung der EEI–Karte geschieht über die VME–Schnittstelle durch Setzen beziehungsweise Löschen der entsprechenden Werte in den Registern (Tabellen 5.1 und 5.2). Die für den regulären Betrieb notwendige Vorgehensweise wird im folgenden beschrieben:

Sobald im Konfigurationsregister das Bit für echte ADC–Daten eingeschaltet wird, werden die Signale der Front–End–Driver digitalisiert und als Ausgabewerte benutzt. Alternativ besteht durch Ausschalten dieses Bits die Möglichkeit, den Wert für die ausgegebene Energiesumme aus einem Register (FAKE ADC Data) zu lesen, wobei die Frequenz, mit der dies stattfindet[3], durch Wahl des Testpulsmodus festgelegt wird. Nach Einschalten der SHARC–

[3]alle 16 oder 220 Bunchclocksignale oder durch manuelle Testpulse vom Fast–Control–System

Offset	Bedeutung	Modus	Bits
0x24	Konfigurations–/Statusregister	S/L	8/10
0x22	Feinverzögerung Inhibit Signal	S	8
0x20	Grenzwert ab dem Inhibit gesetzt	S/L	8
0x2A	FLT Nummer während Diagnose	S	16
0x26	Testpuls BX Wert	S	8
0x2C	BX Startwert	S	8
0x28	FAKE ADC Data	S	8
0x2E	FAKE accept generation	S	-
0x30	M.S.B für header	S	8
0x48	FIFO to LATCH transfer	L	-
0x44	FIFO L.S.W	L	16
0x46	FIFO M.S.W	L	16

Tabelle 5.1: Übersicht aller Register der EEI–Karte. In der mit Offset beschrifteten Spalte ist die Adresse des entsprechenden Registers relativ zur Basisadresse der EEI–Karte angegeben. Der Zugriff auf die Register ist entweder schreibend (S) und/oder lesend (L) möglich, der mögliche Zugriffsmodus ist in der Spalte Modus angegeben. In der Spalte Bits ist die Größe des Registers, z.T. unterschieden nach dem Zugriffsmodus, in Bits angegeben.

	schreiben	lesen
Bit9	-	nFIFOFULL
Bit8	-	nFIFOEMPTY
Bit7	Diagnose BX	Diagnose BX
Bit6	Testpuls Modus 1	Testpuls Modus 1
Bit6	Testpuls Modus 0	Testpuls Modus 0
Bit4	Grobverzögerung Inhibit Modus 1	Grobverzögerung Inhibit Modus 1
Bit3	Grobverzögerung Inhibit Modus 0	Grobverzögerung Inhibit Modus 0
Bit2	SHARC aktiviert	SHARC aktiviert
Bit1	echte ADC Daten aktiviert	echte ADC Daten aktiviert
Bit0	Diagnosemodus aktiviert	Diagnosemodus aktiviert

Tabelle 5.2: Das Konfigurations–/Statusregister der EEI–Karte. Unterschieden wird die Bedeutung der einzelnen Positionen nach der Art des Zugriffs.

Schnittstelle (SHARC–ENABLE) kann das Schreiben der Daten in den FIFO beginnen. Gestartet wird das Schreiben der Daten nach dem nächsten empfangenen FLT–Accept. Falls kein SHARC die Daten ausließt, wird der FIFO gefüllt und der Schreibvorgang gestoppt; es werden keine Daten im FIFO überschrieben. Der Zustand des FIFO kann über das Statusregister abgefragt werden. Befindet sich die Karte im Diagnosemodus, kann der FIFO ausschließlich über die VME–Schnittstelle ausgelesen werden. Dazu werden die Register FIFO L.S.W und FIFO M.S.W eingelesen, die das niederwertige und das höchstwertige 16–Bit Wort des 32–Bit Datensatzes enthalten, bis der FIFO leer ist.

Im regulären Datennahmebetrieb sind folgende Einstellungen notwendig:

- Die INHIBIT–Schwelle (Register 0x20) muß auf den gewünschten Wert gesetzt werden.
- Die Verzögerung des INHIBIT–Signals (Register 0x22 und Konfigurationsregister 0x24) muß eingestellt werden.
- Die SHARC–Schnittstelle muß eingeschaltet sein (Konfigurationsregister 0x24).
- Die Benutzung echter ADC–Daten muß eingeschaltet sein (Konfigurationsregister 0x24).
- Der Diagnosemodus muß ausgeschaltet sein (Konfigurationsregister 0x24).

5.2.4 Das Zeitverhalten

In Abbildung 5.3 ist das Zeitverhalten der EEI–Karte zusammen mit den synchronisierenden Signalen des FCS dargestellt. Neben der HERA–Bunchclock wird von der EEI–Karte die von dem FCS gelieferte Nummer des aktuellen Bunches benötigt. Diese steht für einen Zeitraum von 96 ns ab dem Ende des vorherigen Bunchclocksignals zur Verfügung. Das zwischen den aufsteigenden Flanken zweier aufeinanderfolgender Bunchclocksignale erzeugte Analogsummensignal wird von dem ADC in dieser Zeit viermal digitalisiert. Weiterverwendet wird der zuletzt gewonnene Wert, da dieser im stabilen Bereich des Analogsignals ermittelt wird und den Wert der Energiesumme am besten wiedergibt. Dieser Wert wird mit der INHIBIT–Schwelle verglichen und beim Überschreiten der Schwelle das INHIBIT–Signal generiert. Das INHIBIT–Signal des Bunches Nummer N steht zu Beginn des Bunches N+2 zur Verfügung, die Energiesumme etwas früher.

5.3 Das Datenformat

In diesem Abschnitt wird das Format der von der EEI–Karte über die SHARC–Schnittstelle gesendeten Daten beschrieben.

Die gesendeten Daten sind 32 Bit lange Zahlen. Eine dieser Zahlen entspricht einem Wort im Speicher der SHARCs und wird daher SHARC–Wort genannt. Die Daten enthalten entweder einen Header[4] (Abbildung 5.4 oben) oder einen Datensatz (Abbildung 5.4 unten). Ein Header wird alle 32K[5] SHARC–Worte in den Datenstrom eingefügt. Dieser besteht aus einer 8bit langen, frei programmierbaren Kennung. Charakteristisch für einen Header sind an

[4]header engl., Kopfdaten

[5]$32 \cdot 1024 = 32768$

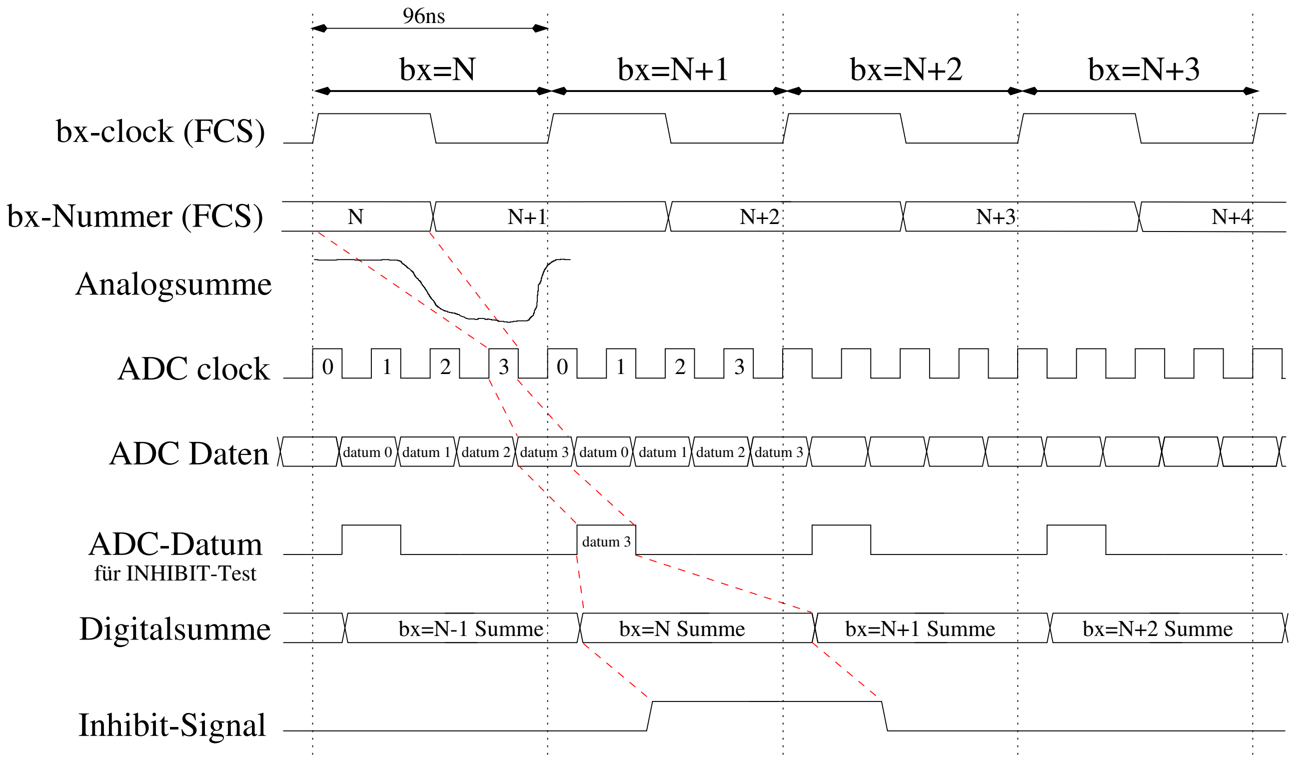

Abbildung 5.3: Das Zeitverhalten der EEI–Karte.

dieser Kennung die beiden auf 1 gesetzten höchstwertigen Bits. An diesen Wert schließt sich die aktuelle von der HERA–Uhr gelieferte Bunchnummer modulo 220 an. Zuletzt folgt als 16bit langer Wert die Nummer des letzten vom First–Level–Trigger akzeptierten Ereignisses, die sogenannte FLT–Accept–Nummer.

Die von der EEI–Karte an den SHARC gesendeten Datensätze haben das im folgenden beschriebene Format: Neben den Energiesummen der beiden letzten und des aktuellen Bunches wird ein Statusbyte gesendet. In diesem finden sich die einzelnen Inhibit–Bits der letzten drei Bunche, die Summe der Inhibit–Bits und ein Bit, das anzeigt, ob der FIFO auf der EEI–Karte seit Senden des letzten Headers übergelaufen ist. Die beiden höchstwertigen Bits dienen der Unterscheidung zwischen einem Header und einem Datensatz.

5.4 Leistungsfähigkeit der EEI–Karte

In diesem Abschnitt wird der dynamische Bereich und die Auflösung der EEI–Karte anhand einer Überschlagsrechnung bestimmt. Dazu wird die Spannung am ADC der EEI–Karte umgerechnet auf die Spannung am ADC der ECAL Front–End–Driver, deren Sollkalibration bekannt ist. Abbildung 5.5 zeigt die dafür notwendige Beschaltung der ECAL Front–End–Driver zwischen ADC und Analogsummenausgang, Abbildung 5.6 zeigt die Beschaltung der EEI–Karte zwischen ADC und Eingang.

Der dynamische Bereich des auf der EEI–Karte eingesetzten ADC umfaßt 2 V. Bei 2000 ECAL Kanälen, deren Energieinformation aufaddiert in die EEI–Karte gelangen, entspricht

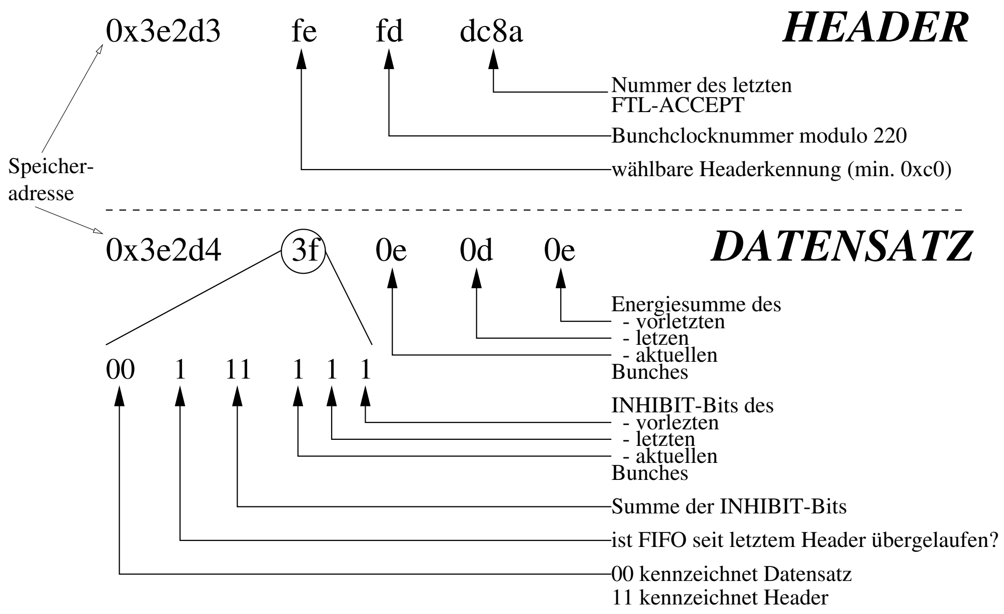

Abbildung 5.4: Format der von der EEI–Karte gesendeten Daten. Im oberen Teil des Bildes ist das Format eines Headers dargestellt, im unteren Teil des Bildes das eines Datensatzes.

einem ECAL Kanal eine Spannung von $U_{EEI} = 1\,\mathrm{mV}$ am ADC der EEI–Karte. Diese Spannung entsteht aus dem Eingangssignal, indem dieses durch die beiden Summationsstufen um einen Faktor $1/64$ herunter skaliert wird. Vom Summenausgang der ECAL Front–End–Driver zum Eingang der ADC ergibt sich durch die verwendeten Operationsverstärkerbeschaltungen eine Abschwächung des Signal um den Faktor $\nu \approx 8.96$. Ein Signal U_{EEI} am ADC der EEI–Karte bewirkt am ADC der Front–End–Driver ein Signal

$$U_{FED} = U_{EEI} \cdot 64 \cdot \nu. \tag{5.1}$$

Ein Signal $U_{EEI} = 1\,\mathrm{mV}$ bewirkt also an einem ADC der ECAL Front–End–Driver eine Spannung von $U_{FED} \approx 0.57\,\mathrm{V}$.

Der Nominalwert der Kalibration eines ADC der Front–End–Driver wurde auf

$$140\,\mathrm{GeV} \hat{=} U_{FED} = 5\,\mathrm{V} \tag{5.2}$$

festgelegt. Das heißt die Verstärkung der analogen ECAL–Signale wird so eingestellt, daß für eine Energiedeposition von 140 GeV pro Zelle eine Spannung U_{FED} von 5 V erreicht wird. Dies entspricht der maximalen, von dem verwendeten ADC zu digitalisierenden Spannung. Die Spannung von $U_{FED} = 0.57\,\mathrm{V}$ entspricht somit einer Energie von ungefähr 16 GeV. Damit beträgt der dynamische Bereich von 2 V des ADC auf der EEI–Karte 32 TeV. Die Auflösung der EEI–Karte beträgt, aufgrund des 8 Bit großen Wertebereich des ADC,

$$1\,\mathrm{ADC} - \mathrm{Kanal} = 125\,\mathrm{GeV}. \tag{5.3}$$

Unter der Annahme einer Energiedeposition im inneren Bereichs des Kalorimeters von etwa 500 GeV pro Wechselwirkung[39, 40] (Kapitel 3.3) ergibt sich damit ein Wert von 4 ADC–Kanälen pro Wechselwirkung und ein dynamischer Bereich der EEI–Karte von 64 gleichzeitigen Wechselwirkungen, die pro Bunchvorbeiflug aufgelöst werden können. Dies entspricht

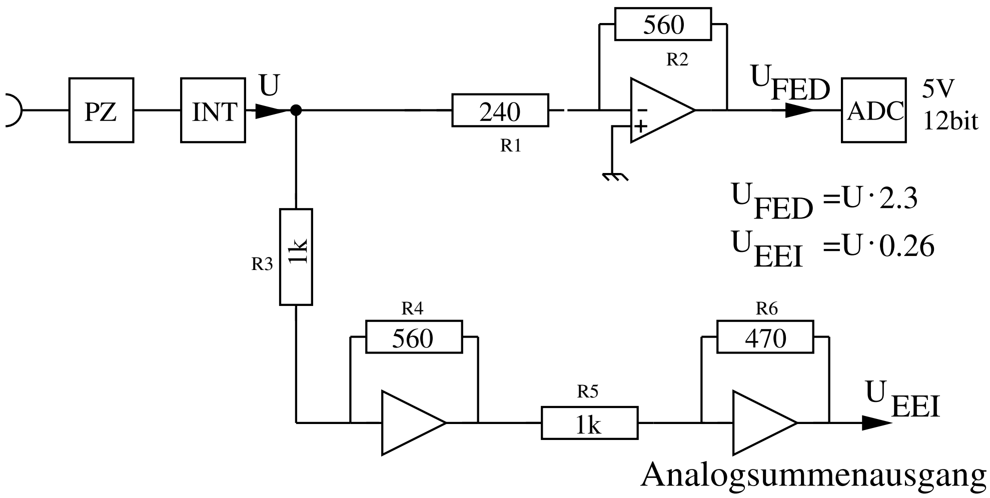

Abbildung 5.5: Beschaltung eines Kanals der ECAL Front–End–Driver vom Eingang bis zum ADC und Summenausgang.

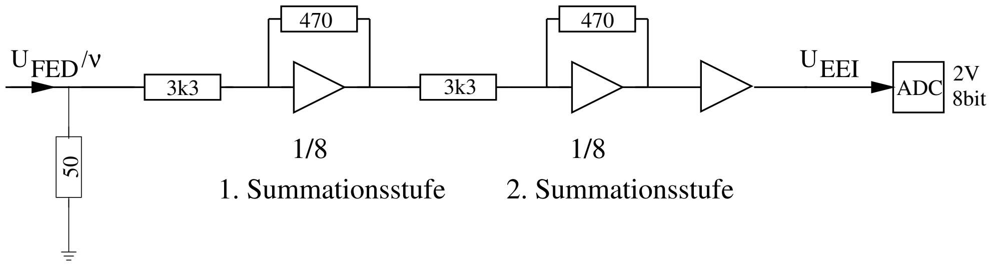

Abbildung 5.6: Beschaltung der EEI–Karte vom Eingang bis zum ADC.

einer Wechselwirkungsrate der gefüllten Protonenbunche von etwa 540 MHz, also etwa dem 13–fachen Wert der geforderten Wechselwirkungsrate von 40 MHz. Der dynamische Bereich der EEI–Karte bietet also die Möglichkeit, auch stärkere Fluktuationen der Wechselwirkungsrate aufzulösen.

5.5 Möglichkeiten der EEI–Karte mit den SHARCs

Die Kombination der EEI–Karte und der schnellen, digitalen Signalprozessoren (SHARCs) bietet weitreichende Möglichkeiten der Kontrolle und Optimierung des Targetbetriebs sowie der Untersuchung des Protonenstrahls. Die EEI–Karte liefert bei jedem Protonbunchvorbeiflug die Energiesumme des inneren Bereichs des Kalorimeters als 1 Byte lange Information. Mit der Bunchfrequenz von 10.417 MHz ergibt dies eine Datenrate von mehr als 10 MByte/s. Diese Datenmenge kann nicht über das Netzwerk zu einem externen Rechner übertragen und dort ausgewertet werden. Das HERA–*B* SHARC–Cluster bietet mit der hohen Bandbreite von 40 MByte/s pro Linkport und der hohen Rechenleistung der einzelnen SHARC–Prozessoren die Möglichkeit, die Daten zu verarbeiten und nur die wichtigen Ergebnisse der Datenverarbeitung über das Netzwerk zu übertragen. Da die sechs SHARCs eines SHARC–Clusters durch einen schnellen gemeinsamen Bus miteinander verbunden sind, können umfangreiche

Berechnungen über mehrere Prozessoren verteilt werden. Im folgenden werden die verschiedenen Möglichkeiten, die die Kombination aus EEI–Karte und SHARCs bietet, vorgestellt und in Hinblick auf die Realisierbarkeit diskutiert.

5.5.1 Ratenmessung

Die Bestimmung der Wechselwirkungsrate ist der zentrale Punkt beim Einsatz der EEI–Karte. Die auf diese Weise bestimmte Wechselwirkungsrate wird aufgrund der Komplexität des notwendigen Systems nicht zur Steuerung der Targetdrähte verwendet. Allerdings ist die mit dem Kalorimeter bestimmte Wechselwirkungsrate zur Kontrolle und Kalibration der verwendeten Szintillationszähler geeignet.

Zur Bestimmung der Wechselwirkungsrate wird für jeden Protonenbunch die im inneren Kalorimeterbereich deponierte Energie bestimmt. In Kenntnis der pro inelastischer Wechselwirkung eines Protons mit einem Targetdraht in diesem Bereich deponierten Energie kann aus der Gesamtenergie die Anzahl der gleichzeitigen Wechselwirkungen bestimmt werden.

5.5.2 Wechselwirkungsbeiträge

Der Beitrag zur Gesamtwechselwirkungsrate variiert zwischen den einzelnen Bunchen. Dies wurde in Kapitel 2.5 gezeigt. Die Messung der Bunchbeiträge ist mit der EEI–Karte unterschiedlich detailliert möglich. Die verschiedenen Methoden werden im folgenden beschrieben.

- Energieverteilung:
  Der Mittelwert der Verteilung der deponierten Energie entspricht der zu bestimmenden Wechselwirkungsrate. Mit der Breite der Verteilung kann eine Aussagen über die Größe der Ratenfluktuationen getroffen werden. In Abbildung 5.7 ist schematisch eine so gewonnenen Energieverteilung dargestellt. Diese Information wird etwa alle 10 Sekunden benötigt. Daraus ergibt sich der Speicherbedarf innerhalb der SHARCs. Die maximale Anzahl von Einträgen für einen Wert der Energiesumme ergibt sich als Produkt der Bunchfrequenz und der Meßzeit zu etwa $100 \cdot 10^6$. Dieser Wert läßt sich durch eine 32 Bit lange Zahl ausdrücken. Eine maximale Energiesumme pro Bunch von 8 Bit ergibt einen Speicherbedarf von etwas mehr als einem KByte. Nur diese Information wird alle 10 Sekunden über das Netzwerk übertragen. Diese Information ist primär für Diagnosezwecke erforderlich. Für den normalen Targetbetrieb werden nur der Mittelwert und die Breite der Verteilung, entsprechend der Wechselwirkungsrate und deren Fluktuationen, benötigt. Diese Werte werden innerhalb der SHARCs berechnet und mit etwa 1 bis 10 Hz über das Netzwerk übertragen.

- Beiträge einzelner Bunche:
  Die Relation der Beiträge einzelner Bunche zu den Wechselwirkungsratenbeiträgen der anderen Bunche wird bestimmt, indem die deponierte Energie für jeden Bunch einzeln aufaddiert wird. Abbildung 5.8 zeigt die dafür benötigten Daten schematisch. Daraus ergibt sich das Verhältnis der Beiträge der einzelnen Bunche. Diese Information wird etwa alle 10 Sekunden benötigt. Daraus ergibt sich der Speicherbedarf innerhalb der SHARCs. Mit einer maximalen Energiesumme von 255 ADC–Kanälen für einen Bunch während eines Strahlumlaufes wird für etwa 0.5 Millionen Umläufe des Strahls eine

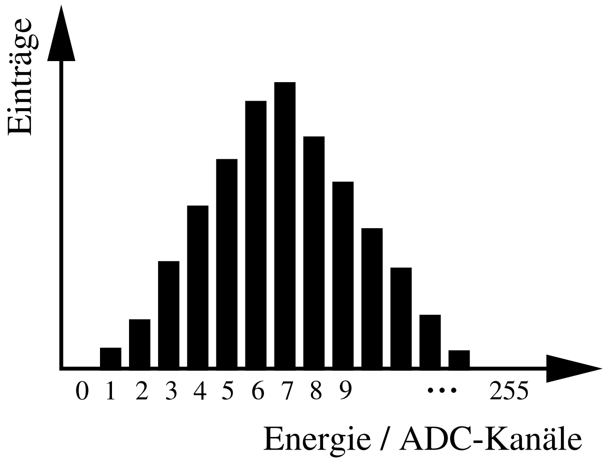

Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der mit der EEI–Karte und den SHARCs zu nehmenden Daten zur Bestimmung der Verteilungsbreite der Bunchbeiträge.

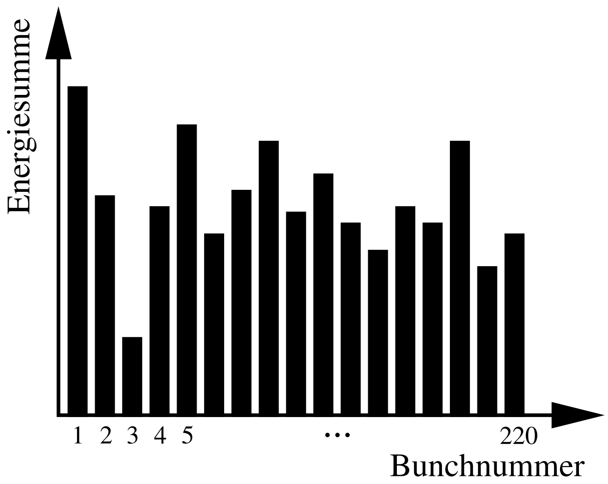

Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der mit der EEI–Karte und den SHARCs zu nehmenden Daten zur Feststellung der Relation der Beiträge einzelner Bunche.

32 Bit–Zahl zur Darstellung der maximalen Gesamtenergie eines Bunches benötigt. Für alle 220 Bunche ergibt sich also ein Speicherbedarf innerhalb der SHARCs von etwa einem KByte. Aus diesen Informationen kann sowohl der Beitrag der ursprünglich gefüllten als auch der ungefüllten Bunche unter Kenntnis des Protonenfüllschemas (Abbildung 1.3) bestimmt werden. Dadurch kann eine Verteilung der Beiträge der einzelnen Bunche gewonnen werden, die im Idealfall aus dem gleichen Beitrag für alle Bunche bestehen sollte. Die Breite der Verteilung gibt also die Variation der Bunchbeiträge wieder.

- vollständiges Monitoring:
  Das vollständige Monitoring der Bunchbeiträge ist eine Kombination der beiden vorherigen Methoden. Hierbei wird, wie in Abbildung 5.9 verdeutlicht, für jeden Bunch eine Verteilung der deponierten Energie gebildet. Diese Methode ist die speicherintensivste.

Ein vollständiger Datensatz ist etwa jede Minute erwünscht. Diese Anforderung ergibt eine maximale Anzahl von Einträgen pro Energiesumme, die durch eine 32 Bit lange Zahl erfaßt werden kann. Für 220 Bunche und einen 256 Werte umfassenden Bereich der Energiesumme ergibt sich ein Speicherplatzbedarf von mehr als 220 KByte. Die sechs SHARCs eines SHARC–Clusters beinhalten gemeinsam 3 MByte Speicher für Programme und Daten, so daß die Daten für ein vollständiges Monitoring gespeichert werden können.

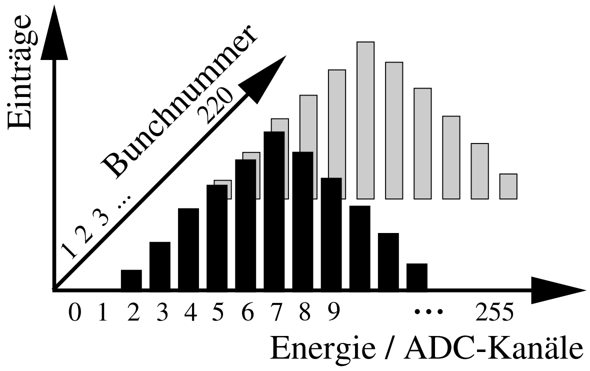

Abbildung 5.9: Mit der EEI–Karte und den SHARCs zu erfassende Daten für eine vollständige Beobachtung der Bunchbeiträge.

5.5.3 Zeitserien und Fourieranalyse

In Kapitel 2.4 wurden Schwingungen der Wechselwirkungsrate auf externe Störungen zurückgeführt. Deren Frequenzen wurden durch Fourieranalysen der Wechselwirkungsrate bestimmt. Ein Nachteil dieser Methode ist die kleine Akzeptanz der verwendeten Szintillationszähler. Die geringe Wahrscheinlichkeit, eine Wechselwirkung innerhalb dieser Zähler zu beobachten, bedingt die hohe Anzahl zu messender Bunchumläufe. Der innere Bereich des Kalorimeters als Zähler großer Akzeptanz ist während jedes Bunchvorbeiflugs in der Lage, die Anzahl gleichzeitig stattgefundener Wechselwirkungen aufzulösen.

Mit einer Abtastfrequenz f_{Tast} ist die maximale, durch eine Fourieranalyse zu bestimmende Frequenz f_{max} gegeben durch

$$f_{max} = \frac{f_{Tast}}{2}. \tag{5.4}$$

Mit der Anzahl n_{sample} der vorgenommenen Abtastungen folgt daraus für den kleinsten zu unterscheidenden Frequenzabstand

$$\Delta f = \frac{f_{max} \cdot 2}{n_{sample}}. \tag{5.5}$$

.

Die maximale Abtastfrequenz f_{Tast} der EEI–Karte entspricht der Bunchfrequenz von etwa 10 MHz, bei der die Energiesumme jedes Bunches als Abtastung benutzt wird. Kleinere

Abtastfrequenz f_{Tast}	Maximalfrequenz f_{max}	Frequenzauflösung Δf
10 MHz	5 MHz	2.5 kHz
200 kHz	100 kHz	50 Hz
4 kHz	2 kHz	1 Hz
800 Hz	400 Hz	0.2 Hz

Tabelle 5.3: Parameter für die Fourieranalyse mit der EEI–Karte.

Abtastfrequenzen werden durch Aufsummation der entsprechenden Anzahl von Energiesummen gebildet[6]. Die maximal aufzulösende Frequenz beträgt 5 MHz. Mit einer realistischen Anzahl von 4000 Abtastungen ergibt sich eine Auflösung von $\Delta f = 2.5$ kHz. Frequenzen kleiner als die Frequenzauflösung Δf können nicht unterschieden werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Abtastfrequenz in Schritten zu erniedrigen, um die Frequenzauflösung schrittweise zu verbessern. Dabei wird allerdings das Spektrum wesentlich kleiner. Tabelle 5.3 zeigt die Abtastfrequenz, die maximal aufzulösende Frequenz und die Frequenzauflösung für die notwendigen Messungen, um mindestens alle in Kapitel 2.4 aufgezählten Frequenzen unterscheiden zu können.

5.6 Die Versuchsaufbauten

Die beiden nachfolgend beschriebenen Versuchsaufbauten wurden für die Untersuchung und Kalibration der ECAL Front–End–Driver und der EEI–Karte benutzt. Diese Untersuchungen sowie die gewonnenen Resultate werden in den drei nächsten Kapiteln beschrieben.

5.6.1 Der Testaufbau

Der in diesem Abschnitt beschriebene und in Abbildung 5.11 dargestellte Testaufbau ist der für die nachfolgenden Untersuchungen verwendetet Grundaufbau.

Neben der EEI–Karte befinden sich in einem VME–Crate drei ECAL–Front–End–Driver, eine FCS–Tochtereinheit und ein SHARC–Cluster. Da HERA sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen nicht im Luminositätsbetrieb befand, stand das Signal der HERA–Bunchclock nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde ein Simulator der HERA–Bunchclock benutzt, der alle 96ns ein Signal erzeugt, das als Bunchclocksignal der FCS–Muttereinheit[7] zur Verfügung gestellt wird. Die optischen Ausgangssignale der FCS–Muttereinheit werden über einen Signalvervielfacher verteilt und anschließend in elektrische Signale umgewandelt, die über Flachbandkabel der benutzten FCS–Tochtereinheit zur Verfügung gestellt werden. Neben der HERA–Bunchclock werden zum Betrieb des Fast–Control–Systems die Signale des First–Level–Triggers benötigt. Da dieser im Testaufbau nicht existiert, werden stattdessen Testtriggersignale benutzt. Dafür wird an die FCS–Tochtereinheit ein Befehl geschickt, einen Testtrigger zu erzeugen. Dieses TTL–Signal wird an der Vorderseite der FCS–Tochtereinheit entnommen und der FCS–Muttereinheit als Triggersignal[8] zur Verfügung gestellt. Dies ist

[6]sogenanntes pre–sampling
[7]PBXI–Eingang (Primary Bunchcrossing Input)
[8]im TRIG2–Eingang

schematisch in Abbildung 5.10 verdeutlicht. Über Linearvervielfacher werden die Summensignale der Front–End–Driver so vervielfacht, daß 15 Eingänge der EEI–Karte belegt werden. Die EEI–Karte ist über ein Flachbandkabel mit dem Dummy–Modul (Kapitel 5.2.2) verbunden. Falls nicht anders beschrieben, sind die verwendeten Daten durch Auslese des Dummy–Moduls erfaßt worden.

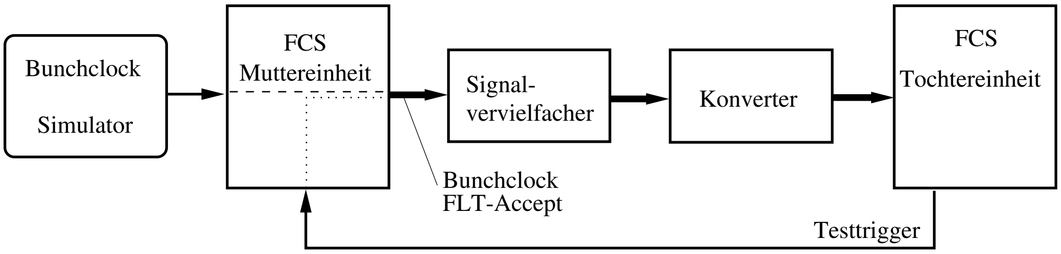

Abbildung 5.10: Erzeugung der zum Betrieb des Testaufbaus notwendigen Signale.

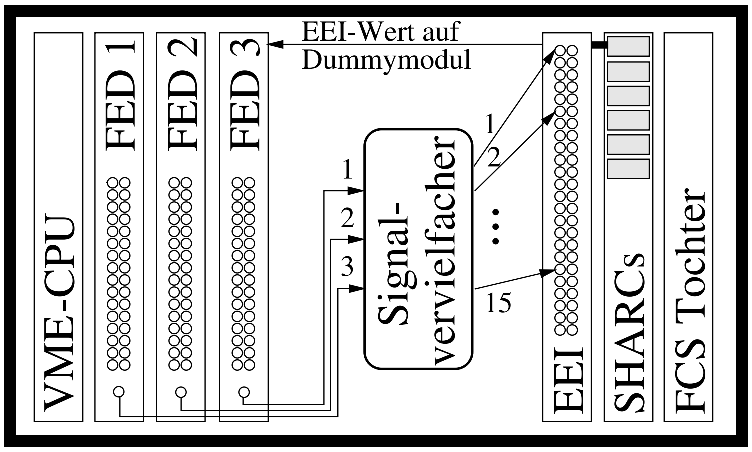

Abbildung 5.11: Testaufbau zur Untersuchung und Kalibration der Front–End–Driver und der EEI–Karte.

5.6.2 Der Aufbau der EEI–Karte im HERA–B Detektor

Ende 1998 konnte die EEI–Karte in die Elektronik des HERA–B Experimentes implementiert werden. Dazu wurde ein VME–Crate neben den Front–End–Drivern des inneren Teils des Kalorimeters mit den benötigten Komponenten bestückt. In Abbildung 5.12 ist der Aufbau der Elektronik dargestellt. Die Front–End–Driver des Kalorimeters sind in VME–Crates mit bis zu 16 FEDs untergebracht und nach der Lage der entsprechenden Kalorimeterzellen gruppiert. Abbildung 5.13 zeigt die Zuordnung der Front–End–Driver zu den einzelnen Zellen des elektromagnetischen Kalorimeters. Dabei ist die Nummer des VME–Crates und die hexadezimale Nummer des entsprechenden Front–End–Drivers angegeben. Die Analogsummenausgänge von jeweils zwei der 84 benutzten Front–End–Driver werden mit Lemo–T–Stücken zusammengeführt, und dieses analoge Summensignal über 4 m lange Lemo–Kabel in einen der 42 benutzten Eingänge der EEI–Karte geleitet. Neben der EEI–Karte befinden

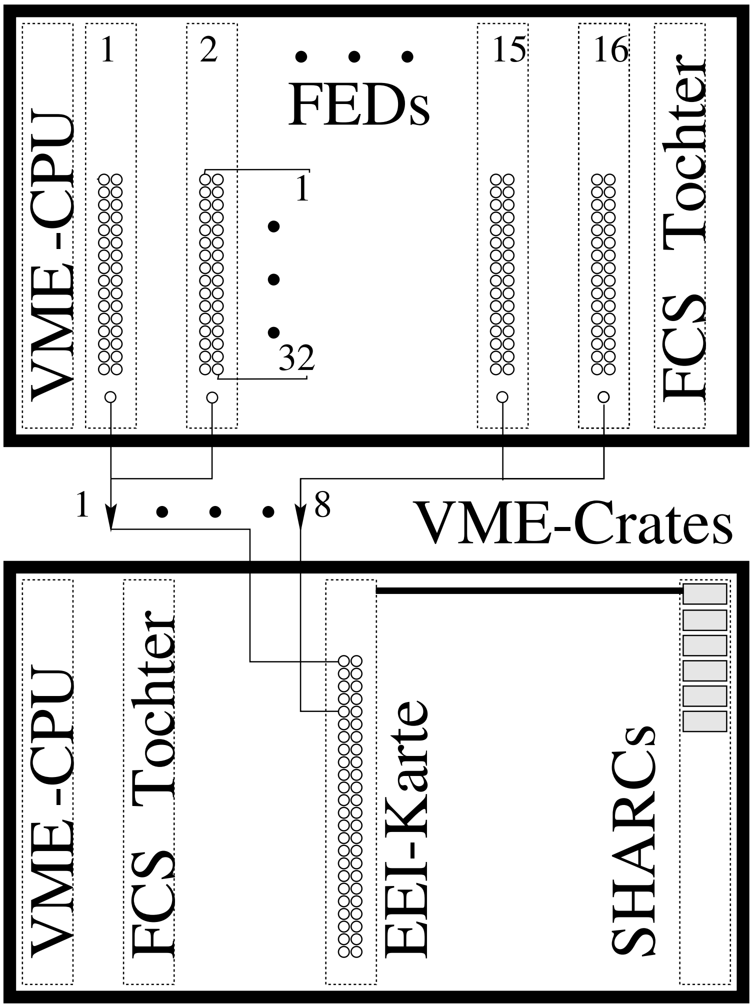

Abbildung 5.12: Aufbau zur Integration der Inhibit–Karte in das HERA–*B* Gesamtsystem.

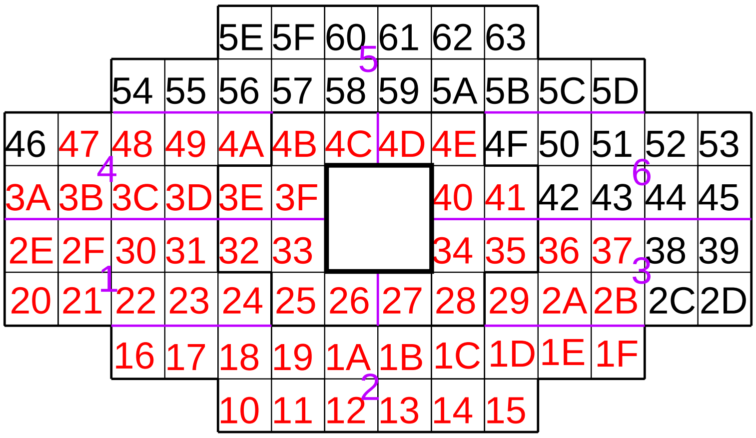

Abbildung 5.13: Zuordnung der Zellen des inneren Bereichs des Kalorimeters zu den Front–End–Drivern. Dargestellt sind die hexadezimalen FED–Nummern sowie die Crate–Nummern.

sich in dem VME–Crate eine Tochtereinheit des Fast–Control–Systems zur Synchronisation mit dem HERA–*B*–Detektor sowie zur Testpulserzeugung. Weiterhin ist in dem Crate ein SHARC–Cluster installiert, das mit der EEI–Karte über ein 12–poliges Flachbandkabel verbunden ist. Zum Zugriff auf die EEI–Karte, die FCS–Tochtereinheit und das SHARC–Cluster dient die ebenfalls in dem VME–Crate installierte VME–CPU. Im Gegensatz zum endgültigen Aufbau werden in den folgenden Untersuchungen nur die Front–End–Driver eines VME–Crates benutzt, da die Summenausgänge der anderen Front–End–Driver noch nicht kalibriert waren.

5.7 Das Meßprogramm

Da keine Daten des elektromagnetischen Kalorimeters zur Verfügung standen, wurden für die Untersuchungen der EEI–Karte die Testpulse der ECAL Front–End–Driver benutzt. Aus diesem Grund werden im nächsten Kapitel die Kalibration und die Untersuchung der ECAL Front–End–Driver beschrieben. In dem darauf folgendem Kapitel wird die Kalibration der EEI–Karte erläutert. Kapitel 8 beschreibt den Betrieb der EEI–Karte sowohl im Testaufbau als auch im HERA–*B* Detektor und die dabei zu beachtenden Besonderheiten.

Kapitel 6

Untersuchung und Kalibration der ECAL FED

In diesem Kapitel wird die Kalibration der Testpulse der ECAL Front–End–Driver beschrieben. Diese ist notwendig, da für alle folgenden Messungen Testpulse als Ersatz für reale ECAL Detektordaten benutzt werden. Die Testpulse müssen daher in allen ihren Eigenschaften bekannt sein, wie zum Beispiel Rauschen und Abhängigkeit der Ausgangspulshöhe vom Eingangssignal. Die drei im Testaufbau verwendeten ECAL Front–End–Driver werden komplett kalibriert, das heißt für jeden ADC der Front–End–Driver wird eine Kalibration durchgeführt.

Nach der Beschreibung der Auslese der ECAL Front–End–Driver Signale wird das Meßprogramm beschrieben. Dieses gliedert sich in folgende Schritte:

- Kalibration eines ADC: Die Untersuchung liefert das Rauschen und die Kalibrationskurve eines ECAL–Kanals.
- Kalibration aller Kanäle der verwendeten ECAL Front–End–Driver.
- Untersuchung des Rauschens der ECAL Front–End–Driver.
- Kalibration des Front–End–Driver Summenausgangs, der das Eingangssignal für die EEI–Karte bereitstellt.

6.1 Auslese der ECAL FED–Signale

Abbildung 6.1 zeigt schematisch die Auslese der ECAL Front–End–Driver. Jeder der 32 ADC eines Front–End–Drivers kann über den VME–Bus ausgelesen werden. Mit den drei verwendeten Front–End–Drivern stehen somit 96 ADC zur Verfügung. Ein ADC[1] wird durch das Dummy–Modul (siehe Kapitel 5) ersetzt, womit die von der EEI–Karte gebildeten Signale ebenfalls über den VME–Bus im Rahmen der ECAL–Datennahme erfaßt werden können. Somit stehen 95 ADC für die Kalibration zur Verfügung. Die verwendeten ADC besitzen eine Bandbreite von 12 Bit und stellen dementsprechend 4096 mögliche Ausgangssignale zur Verfügung.

[1] ADC Nummer 96

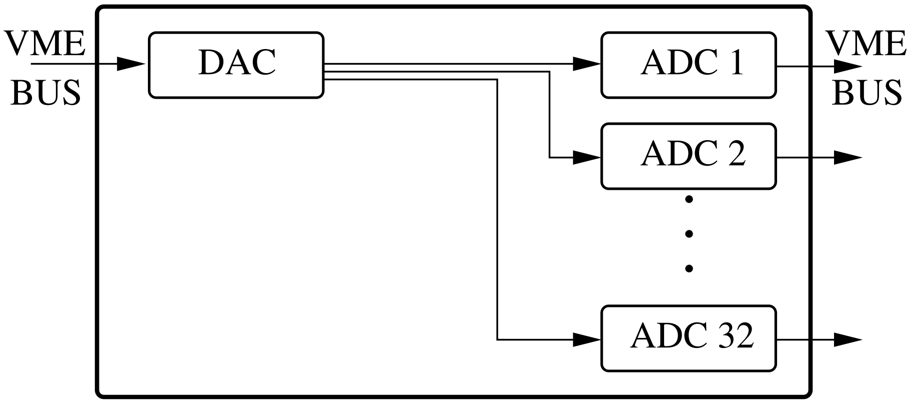

Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des ECAL Front–End–Drivers zur Kalibration der ADC.

Ein über den VME–Bus steuerbarer 12 Bit Digital–Analog–Konverter (DAC) generiert die Testpulse. Die Verwendung eines DAC mit 12 Bit Bandbreite ermöglicht $2^{12} = 4096$ mögliche Testpulse. Die analogen Testpulssignale gelangen in die Eingangsleitungen der ADC und werden von diesen wie reale Detektorsignale bearbeitet.

In Abbildung 6.2 ist die Funktionsweise des analogen Summenausgangs der ECAL Front–End–Driver schematisch dargestellt. Die in die ADC gelangenden Eingangssignale werden analog aufsummiert und als analoges Summensignal außerhalb der Front–End–Driver zur Verfügung gestellt. Im Betrieb der EEI–Karte werden die Summensignalausgänge der Front–End–Driver mit den Eingängen der EEI–Karte verbunden.

6.2 Kalibration eines FED–Kanals

Die Kalibration eines einzelnen Kanals der ECAL Front–End–Driver ist vorbereitend für die Kalibration der Front–End–Driver notwendig.

Es werden 2000 Testpulse bestimmter Höhe mit dem DAC erzeugt. Von den 2000 ADC–

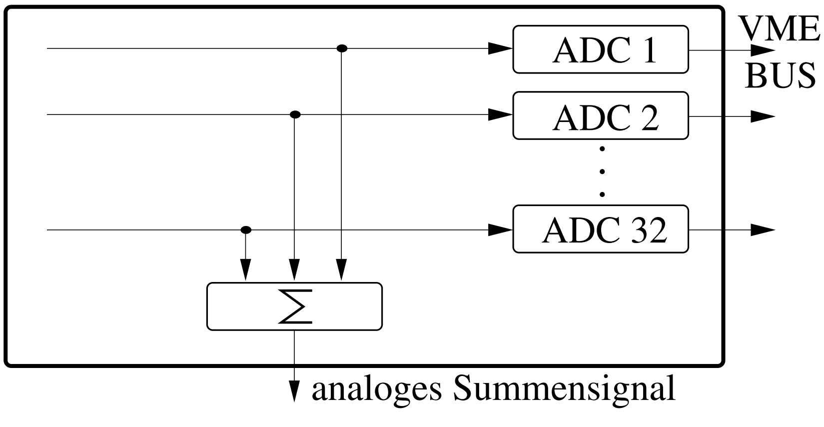

Abbildung 6.2: Schematische Darstellung des ECAL Front–End–Drivers zur Kalibration des Summenausgangs.

Werten wird der Mittelwert und die Standardabweichung der Verteilung bestimmt. Dies wird für 21 verschiedene Testpulshöhen durchgeführt. Abbildung 6.3 zeigt die Auftragung des mittleren ADC–Wertes (ADC–Wert) gegen die Testpulshöhe (DAC–Wert). Als Fehler

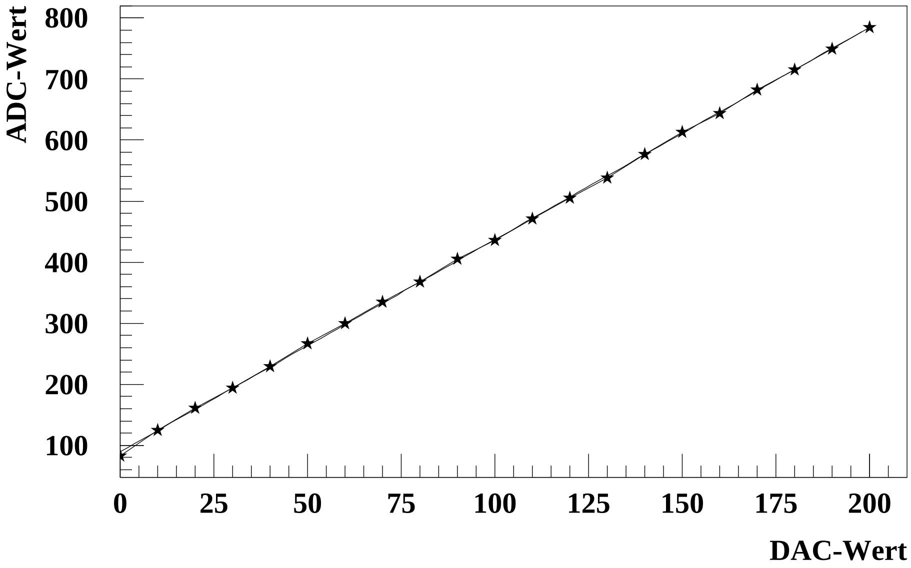

Abbildung 6.3: Bestimmung der Kalibrationskonstante und der Nullpunktverschiebung eines ADC.

der mittleren ADC–Werte wird die Standardabweichung benutzt. Diese Fehler sind in der Abbildung aufgrund der geringen Größe nicht zu erkennen. Eine lineare Regression der Meßwerte liefert für die Ausgleichsgerade die Funktion

$$\begin{aligned} \text{ADC–WERT} &= np + m \cdot \text{DAC–WERT} \\ &= 89 + 3.48 \cdot \text{DAC–WERT}. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Daraus ergibt sich die Nullpunktverschiebung np des ADC zu

$$np = (89 \pm 1)\text{ADC} - \text{Kanäle} \tag{6.2}$$

und die Kalibrationskonstante m zu

$$m = (3.48 \pm 0.01)\frac{\text{ADC–Kanäle}}{\text{DAC-Kanäle}}. \tag{6.3}$$

Die Nullpunktverschiebung beschreibt das ohne Testpuls gemessene Signal des ADC. Die Kalibrationskonstante beschreibt die Abhängigkeit des ADC–Ausgangssignal von dem DAC–Eingangssignal.

6.3 Kalibration aller FED–Kanäle

Für die Kalibration aller ADC der verwendeten ECAL Front–End–Driver werden die im vorherigen Abschnitt bestimmten Nullpunktverschiebungen und Kalibrationskonstanten der ADC benutzt.

In Abbildung 6.4 sind die Nullpunktverschiebungen aller 95 ADC dargestellt. Die Fehlerbalken sind aufgrund ihrer geringen Größe nicht zu erkennen, entsprechen aber dem Fehler der einzelnen Nullpunktverschiebung aus der oben beschriebenen linearen Regression. Als

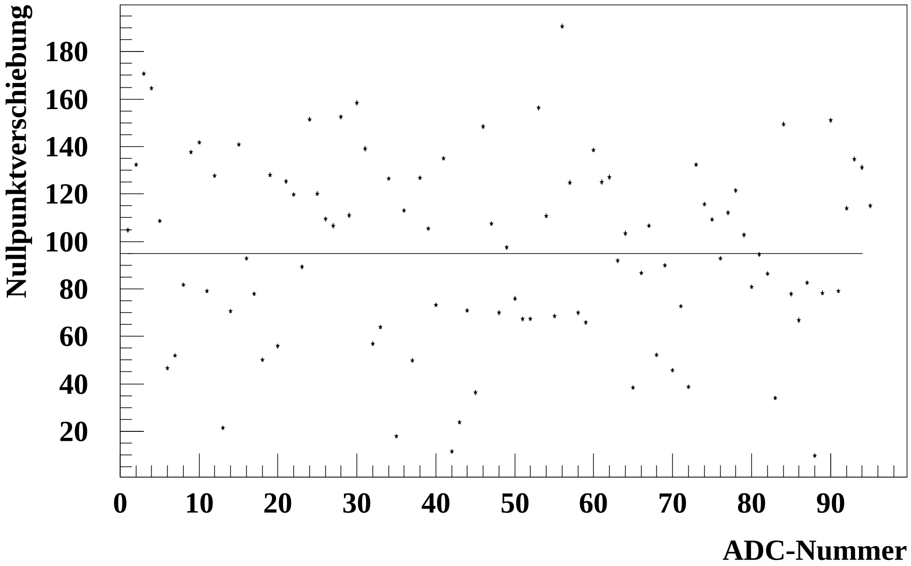

Abbildung 6.4: Nullpunktverschiebungen aller ADC. Die eingezeichnete Gerade entspricht dem Mittelwert der Nullpunktverschiebungen.

mittlere Nullpunktverschiebung der ADC erhält man

$$\overline{np} = (97 \pm 39)\text{ADC–Kanäle}. \tag{6.4}$$

Die Variation der Nullpunktverschiebungen resultiert aus Bauteilabweichungen, vor allem in den Eingangsverstärkern, der einzelnen ADC–Module [39]. Aufgrund der breiten Streuung der Nullpunktverschiebungen muß bei weiteren Untersuchungen die Nullpunktverschiebung der einzelnen ADC anstatt der mittleren Nullpunktverschiebung benutzt werden.

Abbildung 6.5 zeigt die Kalibrationskonstanten der 95 verwendeten ADC. Die eingezeichneten Fehlerbalken entsprechen den Fehlern auf die Kalibrationskonstante aus der im Abschnitt 6.2 durchgeführten linearen Regression. Als mittlere Kalibrationskonstante aller ADC ergibt sich

$$\overline{m} = (3.6 \pm 0.1)\frac{\text{ADC} - \text{Kanäle}}{\text{DAC} - \text{Kanäle}}. \tag{6.5}$$

Die Streuung der Kalibrationskonstanten um den Mittelwert von etwa 3% ermöglicht die Verwendung der mittleren Kalibrationskonstanten $\overline{m}$ zur Vereinfachung der Kalibration.

6.3.1 Überprüfung der Kalibration

Zur Überprüfung der Kalibration der ECAL Front–End–Driver werden um die Nullpunktverschiebung korrigierte und unkorrigierte Signale miteinander verglichen.

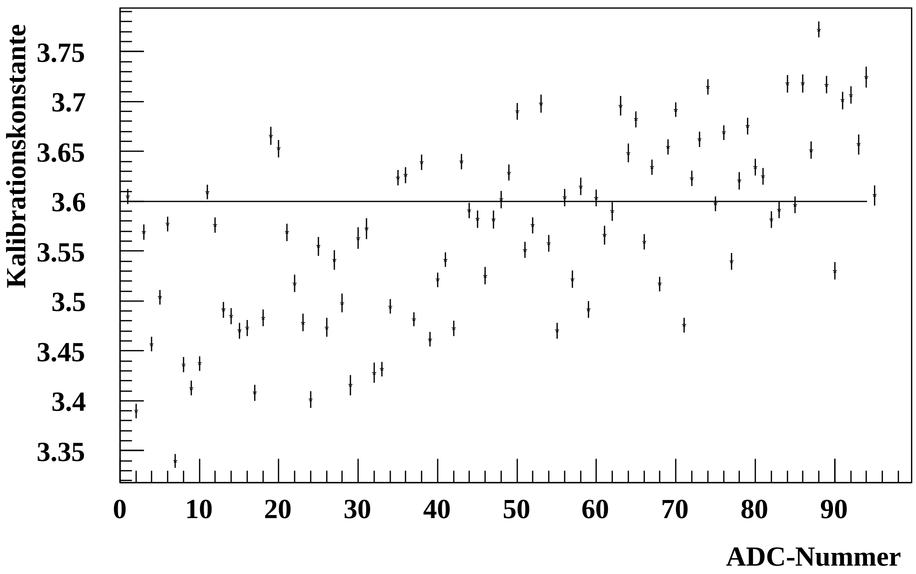

Abbildung 6.5: Kalibrationskonstanten aller ADC. Die Gerade entspricht dem Mittelwert aller Kalibrationskonstanten.

Abbildung 6.6 zeigt für Testpulse eines DAC–Wertes von 120 die Verteilung der Mittelwerte für alle ADC. Für das obere Bild wurden die reinen Mittelwerte ohne Korrektur um die Nullpunktverschiebung benutzt, für das untere Bild die korrigierten Werte. Mit einer Standardabweichung von 11 ADC–Kanälen um den Mittelwert von 427 ADC–Kanälen ist die korrigierte Verteilung wesentlich schmaler als die der unkorrigierten Werte mit einer Breite von 40 ADC–Kanälen um den Mittelwert von 524 ADC–Kanälen.

Nach Gleichung 6.5 beträgt die Standardabweichung der mittleren Kalibrationskonstante

$$\Delta m = 0.1. \tag{6.6}$$

Dies wird von der verwendeten Kalibrationsmethode nicht berücksichtigt. Die Breite s der korrigierten Verteilung ergibt sich also aus dem Fehler Δm der Kalibrationskonstanten $\overline{m}$ sowie der Höhe des DAC–Eingangssignals zu

$$s = \Delta m \cdot \text{DAC–Wert} = 12\,\text{ADC} - \text{Kanäle}. \tag{6.7}$$

Die korrigierte Verteilung ist wesentlich schmaler als die unkorrigierte Verteilung. Die Kalibration der ECAL Front–End–Driver wird daher bei den weiteren Untersuchungen verwendet.

war daher erfolgreich und kann bei weiteren Untersuchungen eingesetzt werden.

6.4 Rauschen der FED

Als Rauschen der ECAL Front–End–Driver wird die Breite der Verteilung der ADC–Werte bei einem konstanten Eingangssignal bezeichnet.

In Abbildung 6.7 ist die Verteilung der ADC–Werte eines ADC für einen konstanten Testpuls dargestellt. Der Mittelwert des Ausgangssignals beträgt 574 ADC–Kanäle. Für die

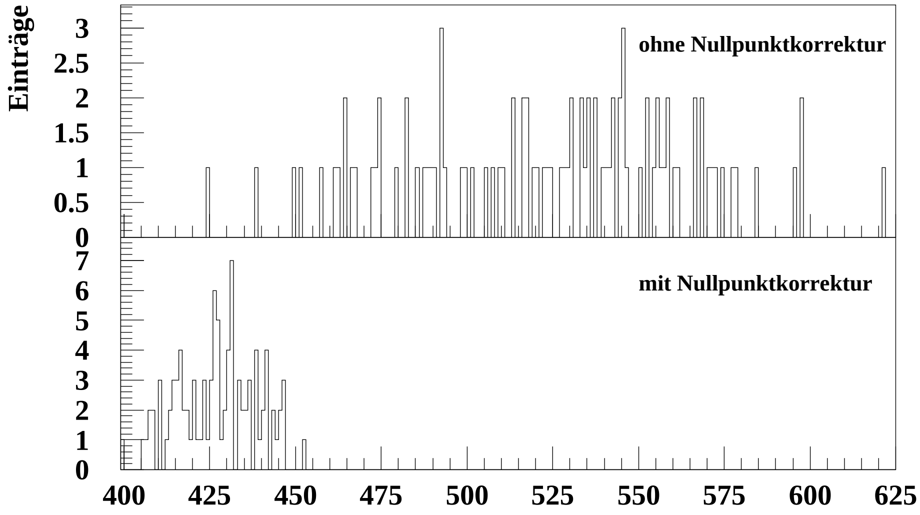

Abbildung 6.6: Verteilung der Mittelwerte aller in den FED generierten Testpulse bei einer gewählten Amplitude von 120 ADC–Kanälen sowohl mit als auch ohne Subtraktion der Nullpunktverschiebung.

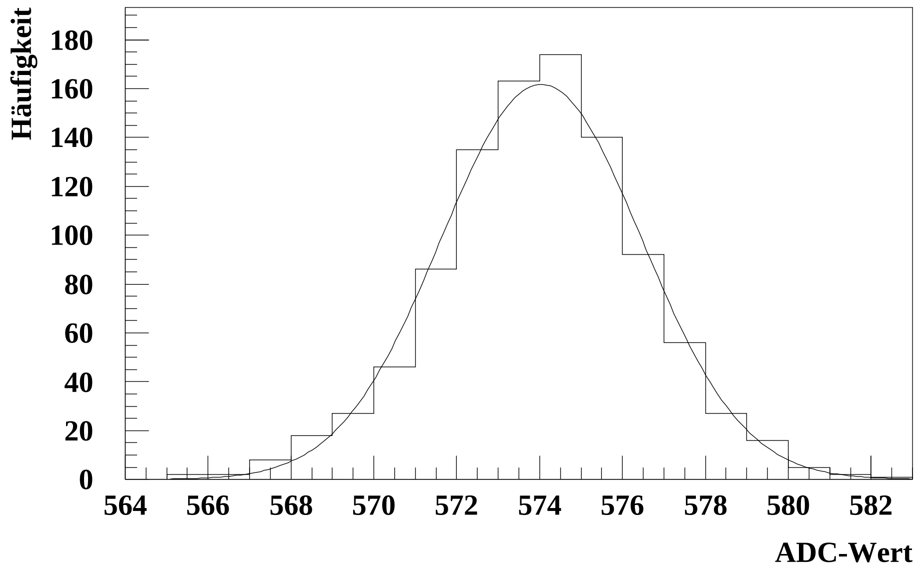

Abbildung 6.7: Verteilung der ADC–Werte eines ADC. Die eingezeichnete Kurve stellt die Anpassung einer Gaußfunktion an die Verteilung dar.

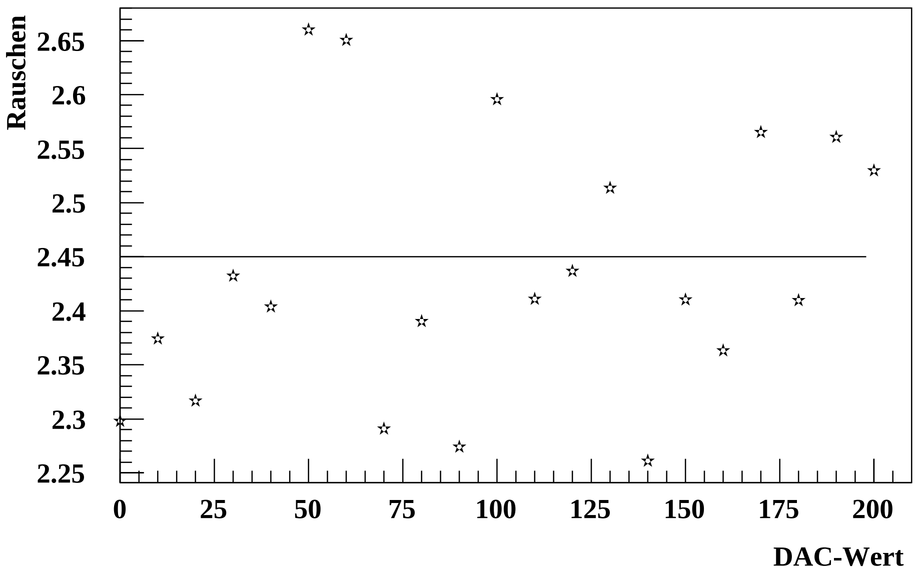

Abbildung 6.8: Darstellung des Rauschens gegen den DAC–Wert. Die eingezeichnete Gerade stellt den Mittelwert des Rauschen von 2.45 ADC–Kanälen dar.

Breite der an die Verteilung angepaßten Gaußfunktion und somit für das Rauschen erhält man:

$$\text{Rauschen} = (2.43 \pm 0.06)\text{ADC–Kanäle.} \tag{6.8}$$

Um die Abhängigkeit des Rauschens von der Eingangssignalamplitude zu untersuchen, wird das Rauschen eines ADC bei verschiedenen DAC–Werten untersucht. Abbildung 6.8 zeigt die Größe des Rauschens gegen die Höhe des Testpulses, sowie den als Gerade eingezeichneten Mittelwert der Verteilung. Als Mittelwert des Rauschens ergibt sich ein Wert von

$$\overline{\text{Rauschen}} = (2.45 \pm 0.15)\text{ADC–Kanäle.} \tag{6.9}$$

Es existiert kein systematischer Zusammenhang der Streuung des Rauschens um den Mittelwert mit dem DAC–Wert.

Die Abhängigkeit des Rauschens von der ADC–Nummer ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Es ist der oben bestimmte Mittelwert des ADC–Rauschens gegen die entsprechende ADC–Nummer aufgetragen. Die Zugehörigkeit der ADC zu den einzelnen ECAL Front–End–Drivern ist durch vertikale Striche sowie der Bezeichnung des Front–End–Drivers verdeutlicht. Innerhalb eines Front–End–Drivers steigt das Rauschen mit steigender ADC–Nummer von etwa 2 auf etwa 3 ADC–Kanäle an. Der Anstieg des Rauschens ist durch die unterschiedliche Kühlung der verschiedenen ADC zu erklären: Von den Eingängen der ECAL–Front–End–Driver führen Signalkabel zu den entsprechenden ADC. Die näher an den Eingängen der ECAL Front–End–Driver liegenden ADC sind durch mehr Kabel verdeckt als die weiter entfernten ADC. Die vorderen ADC (mit höherer Nummer) werden dadurch von der zur Kühlung eingesetzten Luftströmung schlechter gekühlt, der Anstieg des Rauschens ist im Wesentlichen ein thermischer Effekt. Das Rauschen sinkt ohne Testpulsgenerator, bei Beibehaltung des Anstiegs, auf einen Bereich von 1 bis 2 ADC–Kanälen [39]. Dadurch kann der

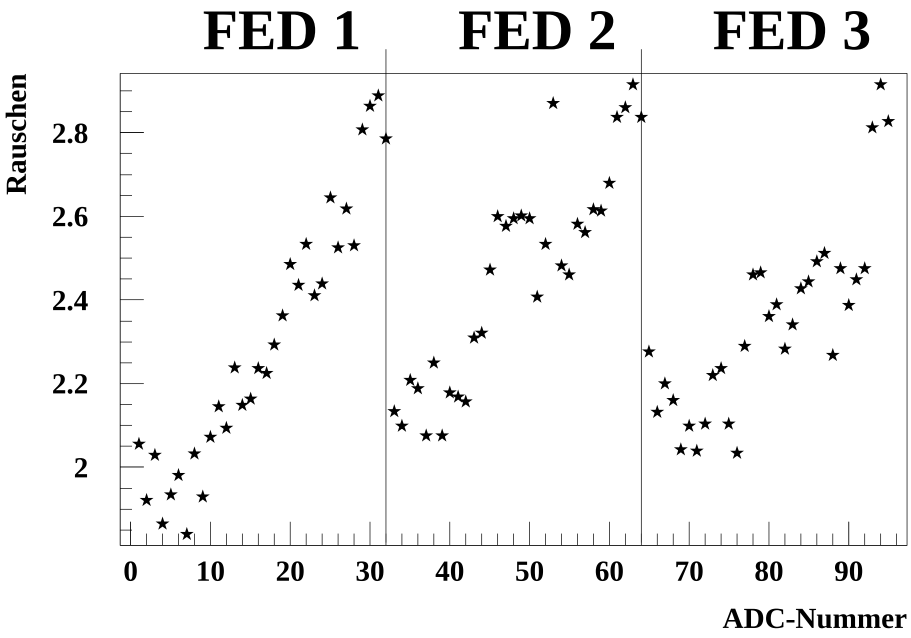

Abbildung 6.9: Rauschen gegen ADC–Nummer.

Anteil des DAC am Rauschen bestimmt werden. Das gesamte Rauschen σ_{ges} setzt sich zusammen aus dem Rauschen des DAC σ_{DAC} und dem auch ohne DAC vorhandenen Rauschen σ_{ohne}:

$$\sigma_{ges}^2 = \sigma_{DAC}^2 + \sigma_{ohne}^2. \tag{6.10}$$

Die quadratische Addition ist gerechtfertigt, da die einzelnen Rauschanteile normalverteilt (siehe Abbildung 6.7) und nicht miteinander korreliert sind. Das gesamte Rauschen σ_{ges} liegt nach obigen Messungen im Bereich von

$$2 < \sigma_{ges} < 3 \tag{6.11}$$

ADC–Kanälen, das Rauschen ohne DAC σ_{ohne} im Bereich von

$$1 < \sigma_{ohne} < 2 \tag{6.12}$$

ADC–Kanälen. Damit ergibt sich für das Rauschen des DAC σ_{DAC}

$$\sqrt{3} < \sigma_{DAC} < \sqrt{5} \tag{6.13}$$

in Einheiten von ADC–Kanälen.

6.5 Kalibration des Summenausgangs der FED

Ausgangspunkt dieser Untersuchung sind die von den Front–End–Drivern generierte Testpulse im kontinuierlichen Modus. In Abbildung 6.10 ist die Amplitude des am Analogausgang des Front–End–Drivers anliegenden Signals gegen den gewählten DAC–Wert des Testpulses aufgetragen. Hierzu wurden Testpulse mit verschiedenen DAC–Werten auf dem Front–End–

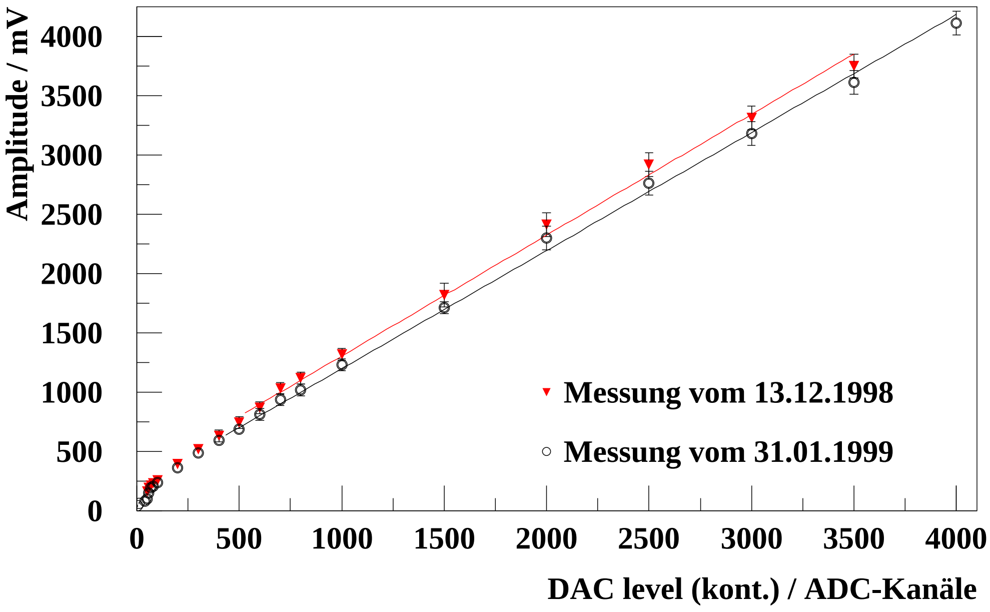

Abbildung 6.10: Amplitude des generierten Testpulses im kontinuierlichen Modus als Funktion der gewählten DAC–Amplitude.

Driver generiert und die Amplitude U des analogen Summensignals mit Hilfe eines Oszilloskops bestimmt. Die Fehler sind aufgrund der Ableseungenauigkeit auf 10% der gewählten Spannung pro Skalenteil gewählt. Bei den Messungen mit einem DAC–Wert unterhalb von 100 wurde der Fehler auf 15% festgelegt, da sich kleine Signale nur sehr schwer unterscheiden lassen. Weiterhin geht in die Festlegung der Fehler die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Signalen geringfügig unterschiedliche Amplitude ein. Die Abweichung der Amplituden liegen im Bereich weniger Prozent. In der Abbildung sind zwei verschiedene Meßreihen aufgetragen, die mit einem zeitlichen Abstand von etwa sechs Wochen aufgenommen wurden, um die Reproduzierbarkeit der Signale zu untersuchen. Oberhalb eines DAC–Wertes von 500 läßt sich die Signalamplitude in Abhängigkeit vom DAC–Wert durch eine Gerade beschreiben. Die lineare Regression dieser Werte liefert für die Messung vom 13.12.1998 die Ausgleichsgerade

$$U = (1.02 \pm 0.03) \cdot \text{DAC–Wert} + (286 \pm 34) \tag{6.14}$$

und für die Messung vom 31.01.1999 die Funktion

$$U = (0.995 \pm 0.007) \cdot \text{DAC–Wert} + (203 \pm 17). \tag{6.15}$$

In dem für weitere Untersuchungen interessanten Bereich von 500 bis 3000 DAC–Kanälen sind die beiden Funktionen im Rahmen der Fehler gleich. Damit ist die Reproduzierbarkeit der Testpulse über einen längeren Zeitraum gewährleistet.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Kalibration der ECAL Front–End–Driver durchgeführt. Die Nullpunktverschiebungen der einzelnen ADC weichen erheblich voneinander ab. Bei der

Verwendung von Front–End–Driver Daten sind deshalb die individuellen Nullpunktverschiebungen der einzelnen ADC zu berücksichtigen. Die Kalibrationskonstanten der verschiedenen ADC zeigen eine nur geringe Streuung, die mittlere Kalibrationskonstante wird daher zur Vereinfachung der Kalibration verwendet. Das Rauschen der ECAL Front–End–Driver ist unabhängig von der Höhe des DAC–Wertes. Ein Ansteigen des Rauschens in Abhängigkeit von der ADC–Nummer ist auf unterschiedliche Kühlung der einzelnen ADC zurückzuführen, der Anteil des DAC am Rauschen liegt zwischen $\sqrt{3}$ und $\sqrt{5}$ ADC–Kanälen. Die analogen Summensignale der ECAL Front–End–Driver sind linear abhängig von der Testpulsamplitude. Dies gilt ab einer Testpulsamplitude von 500 DAC–Werten. Eine Reproduzierbarkeit der analogen Summensignale über einen Zeitraum von mehreren Wochen wurde gezeigt.

Kapitel 7

Untersuchung und Kalibration der EEI–Karte

In diesem Kapitel werden die quantitativen Untersuchungen der EEI–Karte beschrieben, die durchgeführt wurden, um die Funktions– und Leistungsfähigkeit der EEI–Karte beurteilen zu können. Nach der Beschreibung der Auslese der EEI–Karte werden die Ergebnisse des Meßprogramms dargestellt. Dieses gliedert sich in folgende Schritte:

- Die Kalibration, um das Rauschen und die Kalibrationskurve der EEI–Karte im Testaufbau zu bestimmen.
- Überprüfung der Kalibration im HERA–B Detektor.
- Untersuchung der Generierung des INHIBIT–Signals

7.1 Kalibration

Die Kalibration der EEI–Karte ist für die Bewertung der erhaltenen Signale notwendig. Zur Kalibration wird die Abhängigkeit der EEI–Werte von den Eingangssignalen betrachtet. Als Eingangssignale dienen die vom DAC generierten und vom Summenausgang der Front–End-Driver an die EEI–Karte weitergeleiteten Testpulse (Kapitel 6.1). Die Größe Eingangssignal (ES) ist folgendermaßen definiert:

$$1\,\text{Eingangssignal} \equiv \text{Signal eines Front-End–Drivers mit DAC–Wert=1.} \tag{7.1}$$

Als Beispiel liefern 16 Front–End–Driver mit dem DAC–Wert 600 ein Eingangssignal von $16 \cdot 600 = 9600\,\text{ES}$.

Es wird ein Eingangssignal bestimmter Größe erzeugt. Aus der EEI–Karte werden für dieses Eingangssignal 500 EEI–Werte ausgelesen. Aus der Verteilung der EEI–Werte werden der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Dies wird für 11 verschiedene Eingangssignale durchgeführt. In Abbildung 7.1 ist der EEI–Wert gegen das Eingangssignal aufgetragen. Als Fehler der EEI–Werte wird die Standardabweichung der Verteilung benutzt. Eine lineare Regression der Meßwerte liefert für die Ausgleichsgerade die Funktion

$$\begin{aligned} \text{EEI–Wert} &= np_{EEI} + k_{EEI} \cdot ES \\ &= -0.9 + 0.0058 \cdot ES. \end{aligned} \tag{7.2}$$

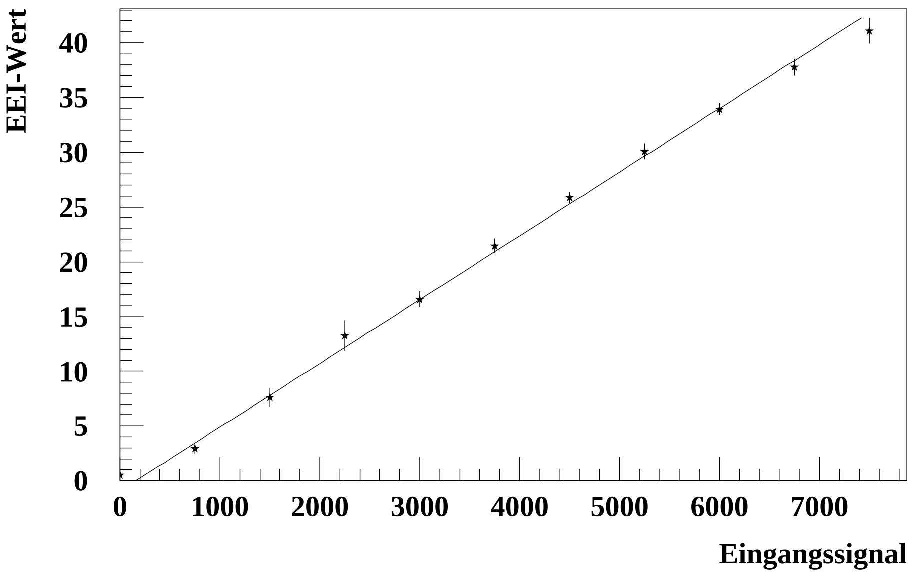

Abbildung 7.1: Kalibration der EEI–Karte. Aus der eingezeichneten Kurve erhält man die Nullpunktverschiebung np_{EEI} und die Kalibrationskonstante k_{EEI} der EEI–Karte.

Damit ergibt sich die Nullpunktverschiebung np_{EEI} der EEI–Karte zu

$$np_{EEI} = (-0.9 \pm 0.5) \text{ EEI–Werte} \tag{7.3}$$

und die Kalibrationskonstante k_{np} der EEI–Karte zu

$$k_{EEI} = (5.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{EEI–Werte}}{\text{ES}}. \tag{7.4}$$

Die Nullpunktverschiebung np_{EEI} entspricht dabei dem ohne Eingangssignal gemessenen EEI–Wert, die Kalibrationskonstante k_{EEI} beschreibt das Verhältnis der gemessenen EEI–Werte zu den Eingangssignalen.

7.1.1 Rauschen der EEI–Karte

Das Rauschen der EEI–Karte, also die Breite der Verteilung eines EEI–Wertes, wird in diesem Abschnitt untersucht. Dazu wird ein Eingangssignal konstanter Größe verwendet und die Verteilung des daraus erzeugten EEI–Wertes über 500 Ereignisse untersucht. Als Eingangssignal dient das Signal des Summenausgangs eines ECAL Front–End–Drivers. Nach Kapitel 6.5 kann die Amplitude dieses Signals für einen festen DAC–Wert als konstant angesehen werden. Der DAC–Wert wird dabei aufgrund der in Abbildung 6.7 gezeigten, schmalen Verteilung, als konstant betrachtet. Abbildung 7.2 zeigt die Verteilung des EEI–Wertes für dieses konstante Eingangssignal. Der Mittelwert der Verteilung beträgt 16.6 EEI–Werte. Die Standardabweichung, und damit das Rauschen beträgt

$$\text{Rauschen} = 0.7 \text{ EEI–Werte}. \tag{7.5}$$

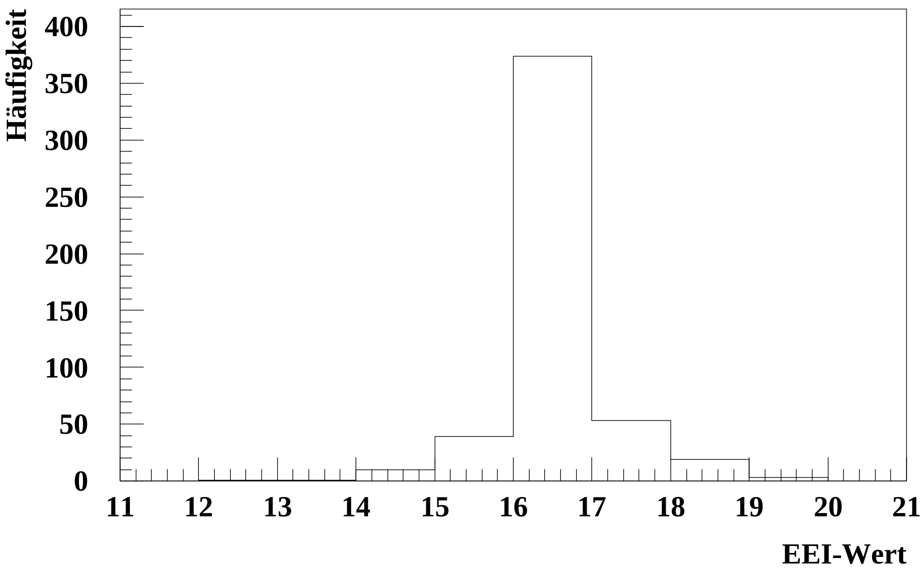

Abbildung 7.2: Rauschen der EEI–Karte

Für die Beurteilung der EEI–Werte ist die Abhängigkeit des Rauschens von der Höhe des Eingangssignals wichtig. Zu dessen Untersuchung ist in Abbildung 7.3 das Rauschen des EEI–Wertes gegen die Höhe des Eingangssignals dargestellt.

Aus dem Meßwerten wird das mittlere Rauschen zu

$$\overline{Rauschen} = (0.7 \pm 0.3)\ \text{EEI–Werte} \tag{7.6}$$

bestimmt. Hierbei wurde der einem Eingangssignal von 0 ES entsprechende EEI–Wert von der linearen Regression ausgeschlossen, da für den Einsatz der EEI–Karte das Rauschen für Eingangssignale ungleich 0 von Bedeutung ist.

7.2 Test der Kalibration im HERA–B Detektor

Für den Test der Kalibration im HERA–B Detektor werden die Daten der EEI–Karte über die SHARC–Schnittstelle ausgelesen. Für jedes Eingangssignal werden etwa 5000 EEI–Werte bestimmt. Aus den Verteilungen der EEI–Werte werden die mittleren EEI–Werte bestimmt. Tabelle 7.1 zeigt die für diese Untersuchung benutzten Meßreihen. Das angegebene Rauschen bestätigt die zuvor durchgeführten Untersuchungen. Die 7 gemessenen EEI–Werte aus Tabelle 7.1 sind gegen die Eingangssignale in Abbildung 7.4 aufgetragen. Die dargestellten Fehlerbalken der einzelnen Meßpunkte entsprechen der Standardabweichung der Verteilungen der EEI–Werte. Auf das Problem der geringen Anzahl von Meßwerten wird in Kapitel 8.3 eingegangen. Die lineare Regression liefert für die Ausgleichsgerade die Funktion

$$\begin{aligned}\text{EEI–Wert} &= np'_{EEI} + k'_{EEI} \cdot ES \\ &= (7.6 + 5.3) \cdot 10^{-3} \cdot ES. \end{aligned} \tag{7.7}$$

Diese Ausgleichsgerade ist als durchgezogene Linie eingezeichnet. Die nach der Kalibration der EEI–Karte im Testaufbau (Abschnitt 7.1) erwartete lineare Abhängigkeit des EEI–

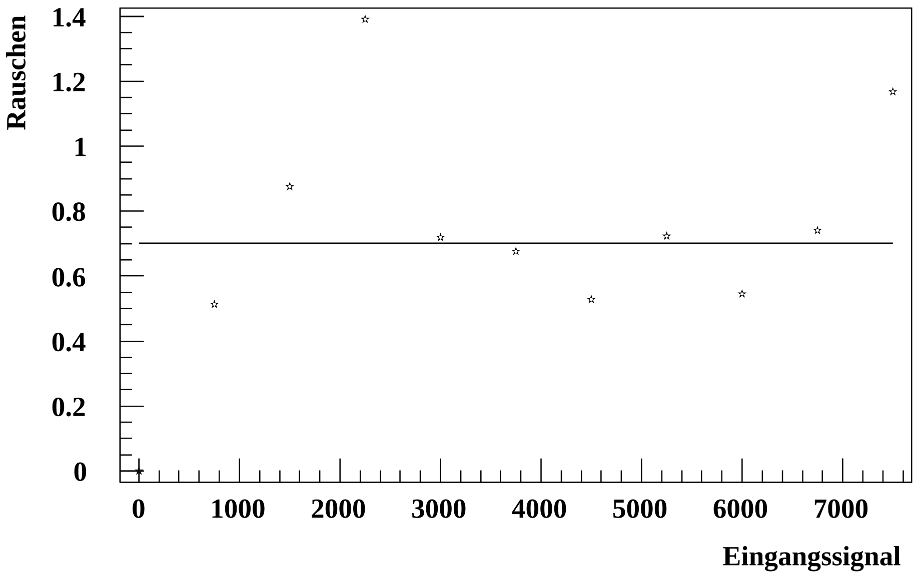

Abbildung 7.3: Rauschen der EEI–Karte gegen Eingangssignal. Die eingezeichnete Gerade entspricht dem Mittelwert des Rauschens.

Messung	Eingangssignal	EEI–Wert	Rauschen
1	6000	2.91	0.64
2	6000	12.91	0.35
3	6000	12.82	0.45
4	6000	12.92	0.34
5	48000	33.31	0.59
6	48000	33.38	0.59
7	9600	2.55	0.60

Tabelle 7.1: Übersicht über die mit der EEI–Karte durch SHARC–Auslese genommenen Daten.

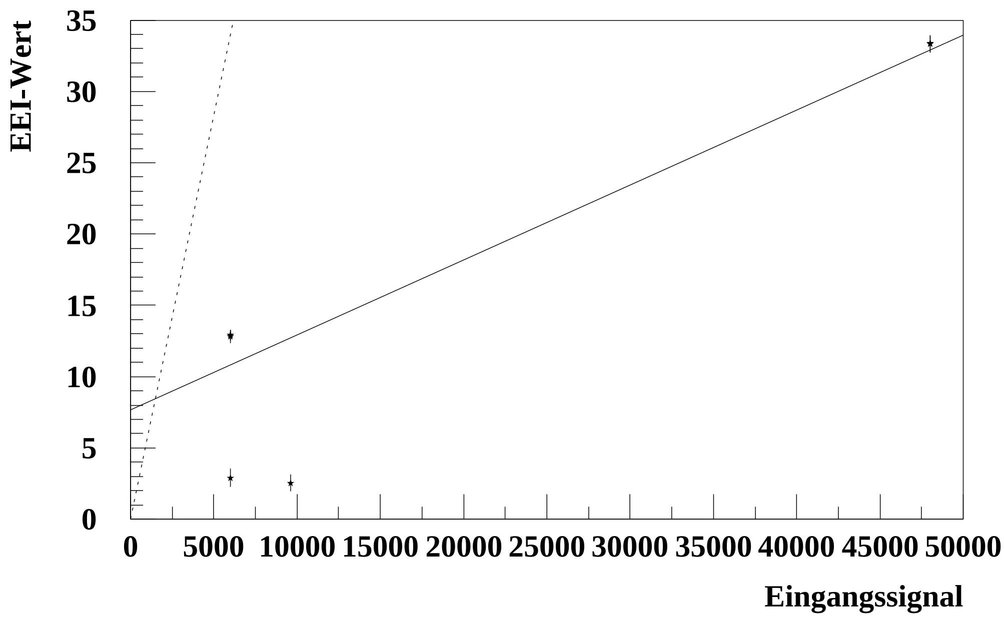

Abbildung 7.4: Darstellung der gemessenen EEI–Werte gegen die Eingangssignale. Die gestrichelte Linie entspricht der ursprünglichen, die durchgezogene Linie der neu bestimmten Kalibration.

Wertes von dem Eingangssignal ist durch die punktierte Gerade verdeutlicht. Die Kalibrationskonstante k'_{EEI} ist etwa um einen Faktor 10 kleiner als die im Testaufbau bestimmte Kalibrationskonstante k_{EEI}. Die Nullpunktverschiebung hat sich ebenfalls wesentlich verändert. Hinzu kommt, daß die Meßwerte erheblich fluktuieren. Dies ist besonders deutlich bei den zu einem Eingangssignal von 6000 ES gehörenden Meßwerte zu erkennen.

Abbildung 7.5 verdeutlicht diese Fluktuationen der EEI–Werte. Dargestellt sind zwei Messungen, bei denen die Eingangssignale der Höhe 6000 ES mit den gleichen ECAL Front–End–Drivern erzeugt wurden. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Meßreihen besteht in einem unterschiedlichen Wert für die Grenze, ab der das INHIBIT–Signal erzeugt wird. Für die obere Meßreihe wurde die INHIBIT–Grenze auf einen Wert von 5 ADC–Kanälen eingestellt, für die untere Meßreihe auf einen Wert von 1 ADC–Kanal. Diese Variation darf nach den Spezifikationen der EEI–Karte [26] keinen Einfluß auf den EEI–Wert haben. Der mittlere EEI–Wert der ersten Messung beträgt 2.91, der der zweiten Messung 12.91. Der Mittelwert der beiden Meßreihen unterscheiden sich um mehr als einen Faktor 4.

Die Messungen zeigen, daß die Kalibration der EEI–Karte im HERA–B Detektor vollkommen verschieden von der Kalibration im Testaufbau ist. Dies, und die Fluktuation der von der EEI–Karte gebildeten EEI–Werte erlauben zum jetzigen Zeitpunkt keine eindeutige Zuordnung der Eingangs– zu den Ausgangssignalen der EEI–Karte im HERA–B Detektor.

7.3 Das INHIBIT–Signal

Die Einsatzfähigkeit der EEI–Karte im HERA–B Experiment wird durch zwei Faktoren bestimmt: Der richtigen Generierung des EEI–Wertes und der richtigen Generierung des INHIBIT–Signals. Der zweite der beiden Punkte wird hier untersucht.

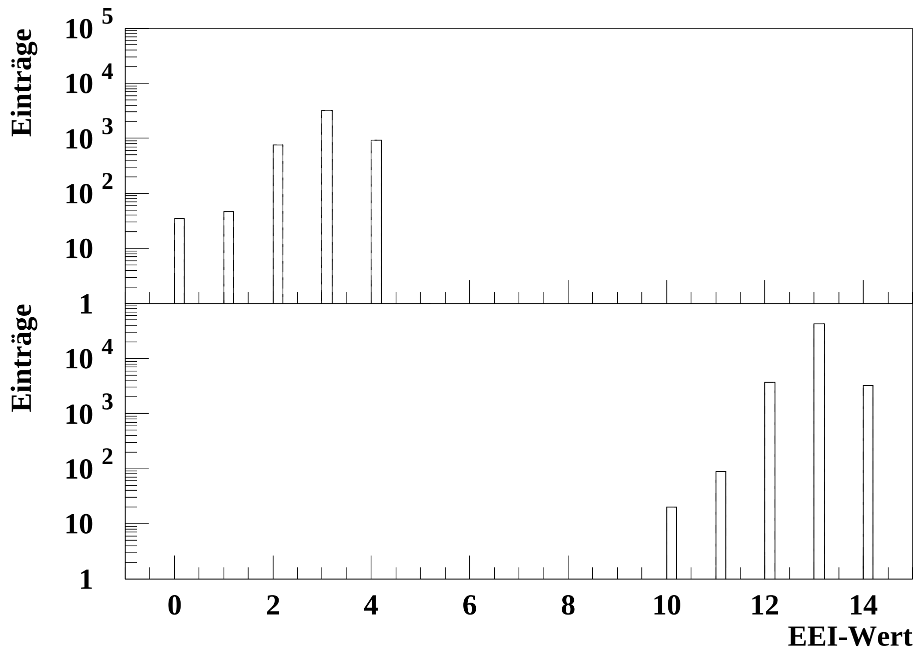

Abbildung 7.5: Fluktuation der gebildeten Energiesumme für gleiche Eingangssignale (6000 ES) in zwei verschiedenen Messungen. Bei der oberen Meßreihe ist die INHIBIT–Grenze auf einen Wert von 5 ADC–Kanälen eingestellt, bei der unteren Messung auf einen Wert von 1 ADC–Kanal.

Das INHIBIT–Signal als Veto-Signal für die Trigger wird generiert, wenn der EEI–Wert oberhalb einer wählbaren Inhibit–Grenze liegt. Zur Untersuchung dieser Eigenschaft wird ein Eingangssignal in die EEI–Karte geführt und die Inhibit–Grenze auf einen Wert innerhalb der Verteilung des aus dem Eingangssignal gebildeten EEI–Wertes gelegt. Damit muß innerhalb einer Meßreihe das INHIBIT–Signal in Abhängigkeit von dem EEI–Wert gesetzt oder gelöscht sein. Abbildung 7.6 zeigt im oberen Teil die Verteilung des EEI–Wertes. Entsprechend dazu ist im unteren Teil des Bildes der Zustand des INHIBIT–Signals gezeigt. Der Wert 0 steht hierbei für ein nicht generiertes INHIBIT–Signal, der Wert 1 für ein generiertes. Die Inhibit–Grenze ist durch die punktierte Linie angedeutet. Oberhalb dieser Grenze wird das INHIBIT–Signal generiert, unterhalb und auf der Grenze wird das INHIBIT–Signal nicht generiert. Dies entspricht den Anforderungen an die EEI–Karte. Für weitere INHIBIT–Werte konnten aus den in Kapitel 8.3 beschriebenen Gründen keine weiteren Daten erfaßt werden.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Kalibration der EEI–Karte durchgeführt. Dabei zeigt sich eine lineare Abhängigkeit des EEI–Wertes von der Höhe des Eingangssignals. Das Rauschen der EEI–Karte ist gering und nicht mit der Höhe des Eingangssignals korreliert (Kapitel 7.1). Die Generierung des INHIBIT–Signals als Veto–Signal für die Pretrigger funktioniert wie benötigt. Die im HERA–B Detektor bestimmte Kalibration der EEI–Karte weicht erheblich von der ursprünglichen Kalibration ab. Zudem zeigen sich deutliche Fluktuationen der EEI–

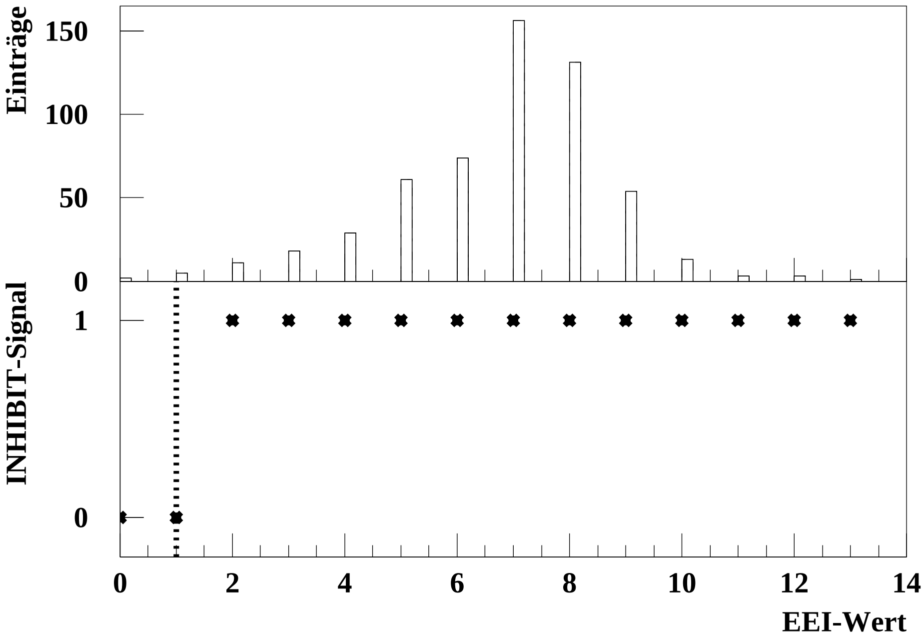

Abbildung 7.6: Verteilung der EEI–Werte und Generierung des Inhibit–Signals. Die gestrichelte Linie stellt die gewählte INHIBIT–Grenze dar.

Werte bei gleicher Höhe des Eingangssignals. Damit ist der Prototyp der ECAL Energy Inhibit Karte in diesem Stadium nicht für die Messung der ECAL–Energiesumme im HERA–B Detektor einzusetzen.

Kapitel 8

Der Betrieb der EEI–Karte

In den beiden vorherigen Kapiteln wurden quantitative Ergebnisse der Untersuchungen der ECAL Front–End–Driver und der EEI–Karte beschrieben. In diesem Kapitel wird der Betrieb der EEI–Karte qualitativ betrachtet. Der Betrieb der EEI–Karte ist nicht trivial. Neben umfangreicher Software ist die Konfiguration und Initialisierung der verwendeten Elektronik von entscheidener Bedeutung. Daher wird in diesem Kapitel erläutert, wie bei der Inbetriebnahme der EEI–Karte vorzugehen ist. Dafür wird zunächst die entwickelte Software vorgestellt. Anschließend wird auf eine im Rahmen der Arbeit entwickelte Prozedur, wie die Auslese der EEI–Karte mit den SHARCs zu aktivieren ist, eingegangen. Des weiteren wurden im Betrieb der EEI–Karte Probleme aufgedeckt, die zur Zeit noch nicht vollständig gelöst sind. Die Probleme sowie die zur Behebung vorgenommenen Untersuchungen werden beschrieben und zusammengefaßt.

8.1 Die verwendete Software

In Kapitel 5.5 wurden die Möglichkeiten der EEI–Karte in Kombination mit den SHARCs diskutiert. Hier wird die zur Auslese der Daten der EEI–Karte entwickelte Software beschrieben. Um das Prinzip des SHARC–Einsatzes zu verdeutlichen wird als Beispiel ein einfaches SHARC–Programm beschrieben, das die Möglichkeit, Daten in den SHARCs zu verarbeiten, nicht ausnutzt. Das im folgenden beschriebene Programm dient nur dem Transport der unveränderten, von der EEI–Karte gelieferten Daten.

In Abbildung 8.1 ist die Vorgehensweise bei der Entwicklung von SHARC–Programmen und die Kommunikation der einzelnen Programme untereinander verdeutlicht. Entwickelt wird die SHARC–Software auf dem im folgenden hb–sun genannten Rechner. Dabei werden C–Programme für die Initialisierung der SHARCs und Assemblerprogramme für die zeitkritischen Routinen wie Datenauslese, Weiterverarbeitung der Daten und Senden der Daten benutzt. Aus dem kompilierten Programm wird eine sogenannte Loaderdatei erzeugt, die auf die VME–CPU übertragen wird und die den in die SHARCs zu ladenden Programmcode enthält. Um die auf den SHARCs laufenden Prozesse anderen Rechnern zur Kommunikation bekannt zu machen, ist auf der hb–sun ein Programm namens scn_sun zu starten, das diese Prozesse in den Namensserver einträgt. Hierbei wird jedem zu startenden SHARC–Prozeß die Nummer des SHARCs in dem SHARC–Cluster sowie die Nummer des SHARC–Clusters, auf dem die Prozesse gestartet werden sollen, zugeordnet. Zur Kommunikation von SHARC–

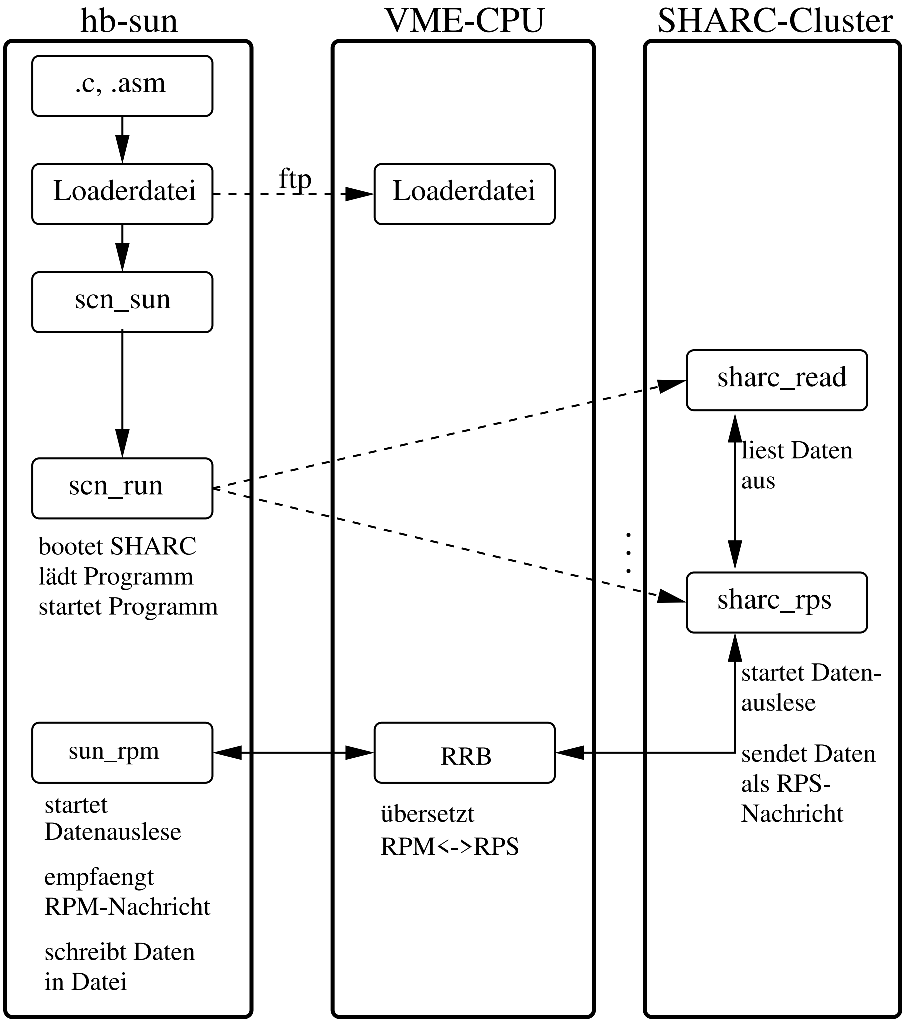

Abbildung 8.1: Vorgehensweise bei der Entwicklung von SHARC–Software sowie Interaktion der einzelnen Programme miteinander.

Programmen mit anderen Rechnern ist auf der VME–CPU das Programm RRB[1] notwendig. Dieses übersetzt RPM–Nachrichten in das RPS–Format und umgekehrt. Dabei ist RPS[2] [44] das zwischen den SHARCs eingesetzte Nachrichtenprotokoll während RPM[3] [43] auf IP[4]–basierten Rechnern eingesetzt wird. Nach dem Start des Programms RRB kann auf dem hb–sun–Rechner das Programm scnrun gestartet werden, das das Zurücksetzten und Starten einzelner SHARC–Prozesse erlaubt. Zur Auslese und Speicherung der Rohdaten der EEI–Karte sind drei gleichzeitig laufende Programme notwendig:

- sharc_read: Dieser Prozeß läuft auf dem direkt mit der EEI–Karte verbundenen SHARC. Sobald dieser Prozeß durch ein Signal des Prozesses sharc_rps gestartet wird, beginnt er, eine definierte Anzahl von Datenworte aus dem FIFO der EEI–Karte zu lesen und in

[1]RRB: RPS to RPM Bridge
[2]RPS: Really Powerful SHARC messaging
[3]Really Powerful Messaging
[4]Internet Protocol

dem internen SHARC–Speicher abzulegen. Ist die definierte Anzahl von Datenworten gelesen, signalisiert dieser Prozeß dem Prozeß sharc_rps, daß Daten vorhanden sind.

- sharc_rps: Dieser Prozeß dient einerseits der Kommunikation mit dem lesenden SHARC, andererseits mit dem die Daten sichernden Programm sun_rpm. Empfängt sharc_rps von sun_rpm eine Datenanforderung, wird dem Prozeß sharc_read signalisiert mit der Datennahme zu beginnen. Ist die Datennahme abgeschlossen, werden die Daten in RPS–Nachrichten umgeformt und über das RRB–Programm an sun_rpm gesendet.

- sun_rpm: Dieses Programm läuft im Gegensatz zu den beiden anderen Prozessen auf dem Rechner hb–sun. Nach der Benutzeraufforderung wird an den Prozeß sharc_rps eine RPM–Nachricht geschickt, um diesem mitzuteilen, daß Daten geliefert werden sollen. Die von dem Prozeß zurückgeschickten Daten werden empfangen und in eine Datei geschrieben, von wo aus sie weiter verarbeitet werden können.

Zu Diagnosezwecken wird der lesende SHARC nicht mit der EEI–Karte, sondern mit einem anderen SHARC verbunden. Dieser sendet kontinuierlich Daten an den lesenden Prozeß, so daß auch ohne EEI–Karte die Entwicklung der Software möglich ist.

8.2 Inbetriebnahme der SHARC–Schnittstelle

Die Auslese der EEI–Karte mit den SHARCs ist die einzige Möglichkeit, die große Datenmenge von

$$\text{Bunchfrequenz} \cdot 1\,\text{Byte Energiesumme} \approx 10\,\frac{\text{MByte}}{\text{s}} \tag{8.1}$$

auszulesen. Die Daten müssen vor der Übertragung zu anderen Rechnern verarbeitet werden, da $10\,{}^{\text{MByte}}/_{\text{s}}$ sich über das Netzwerk nicht übertragen lassen. Aus diesem Grund wird die SHARC–Schnittstelle im Testaufbau geprüft. Der für die hier beschriebenen Untersuchungen benutzte Testaufbau weicht von dem in Abschnitt 5.6.1 beschriebenen ab. Die von der EEI–Karte gebildete Energiesumme wird nicht über ein Flachbandkabel dem Dummy–Modul auf einem Front–End–Drivern zugeführt. Stattdessen werden die Daten der EEI–Karte an die integrierte SHARC–Schnittstelle weitergeleitet und von den über eine Flachbandleitung angeschlossenen SHARCs auf dem SHARC–Cluster ausgelesen.

Um die Funktionsfähigkeit der SHARC–Schnittstelle zu überprüfen, werden Testsignale auf der EEI–Karte generiert. Diese werden zunächst über die VME–Schnittstelle ausgelesen, während sich die EEI–Karte im Diagnosemodus befindet, um die über die SHARC–Schnittstelle ausgelesenen Daten beurteilen zu können. Der Diagnosemodus wurde während der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen immer wieder erfolgreich zur Kontrolle der Meßdaten eingesetzt und gilt somit als funktionstüchtig. Anschließend wird die EEI–Karte in den regulären Datennahmemodus geschaltet und über die SHARC–Schnittstelle ausgelesen, wobei die Testpulseinstellungen unverändert bleiben. Die Übereinstimmung beider Datensätze spricht für eine funktionsfähige SHARC–Schnittstelle.

Die EEI–Karte wird für die Erzeugung von Testpulsen und die Aktivierung des Diagnosemodus entsprechend konfiguriert. Dazu werden entsprechend der Übersicht der Register der EEI–Karte in Kapitel 5.2.3 folgende Einstellungen vorgenommen:

- Testpuls alle 16 bx erzeugen
- SHARC–Schnittstelle aktiviert
- ADC deaktiviert
- Testpuls–Daten aus Register 0x28 lesen
- Diagnosemodus aktiviert

Dadurch wird alle 16 Bunchclocksignale eine Energiesumme der in Register 0x28 angegebenen Höhe generiert und in den FIFO übertragen. Dieser wird durch Aktivieren der SHARC–Schnittstelle zurückgesetzt und kann im Diagnosemodus über die VME–Schnittstelle ausgelesen werden.

Für die Auslese der Daten über die SHARC–Schnittstelle gelten obige Einstellungen, allerdings muß der Diagnosemodus deaktiviert sein. Bei der SHARC–Auslese zeigt sich, daß die SHARC–Prozessoren nur dann initialisiert werden dürfen, wenn die SHARC–Schnittstelle auf der EEI–Karte nicht aktiviert ist. Andernfalls stürzt die mit dem SHARC–Cluster verbundene VME–CPU beim Starten der SHARC–Programme ab und muß mitsamt EEI–Karte neu gestartet werden.

Dies läßt sich umgehen, indem folgender Weg der Initialisierung von EEI–Karte und SHARCs genutzt wird:

1. Konfiguration aller notwendigen Einstellungen der EEI–Karte.
2. Deaktivierung der SHARC–Schnittstelle auf der EEI–Karte.
3. Laden der Programme in die SHARCs.
4. Aktivierung der SHARC–Schnittstelle auf der EEI–Karte.
5. Start der Auslese.

Zur SHARC–Auslese der EEI–Karte werden mehrere Programme benutzt. Auf dem SHARC wird ein Programm gestartet, welches kontinuierlich Daten aus dem FIFO ausließt und diese im internen SHARC–Speicher ablegt. In einem Nachrichtenregister des SHARCs wird die Startposition des die Daten enthaltenen Speicherbereichs abgelegt. Von der VME–CPU kann der Wert dieses Nachrichtenregisters ausgelesen werden. Dadurch ist der Zugriff auf die Daten im SHARC–Speicher möglich.

Der Vergleich der mit dem SHARC ausgelesenen Daten mit den über die VME–CPU ausgelesenen Daten zeigt vollständige Übereinstimmung der Werte. Die SHARC–Schnittstelle funktioniert im Testaufbau einwandfrei.

8.3 Test des FIFO

Die Untersuchungen der EEI–Karte im HERA–*B* Detektor zeigten sich einige Schwierigkeiten bei der Datenauslese, die im folgenden zusammengefaßt und diskutiert werden.

8.3.1 Die VME–Auslese

Der Diagnosemodus der EEI–Karte erlaubt das Auslesen des FIFO über den VME–Bus und ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Diagnose eventueller Probleme bei der SHARC–Auslese. Die zur Auslese verwendete Software setzt den FIFO durch Aktivierung der SHARC–Schnittstelle zurück und liest nach Beginn der Datenübertragung in den FIFO regelmäßig dessen Status aus. Sobald der FIFO voll ist, wird sein Inhalt über den VME–Bus ausgelesen, bis das Statusregister der EEI–Karte den Zustand des FIFO als leer meldet. Die Auslese der EEI–Karte über den VME–Bus wurde neben der Auslese über das Dummy–Modul bei den Untersuchungen zu Kapitel 7 im Testaufbau ausgiebig und erfolgreich benutzt. Beim Einsatz der EEI–Karte im HERA–*B* Detektor zeigten sich jedoch Probleme mit dem Füllstatus des FIFO. Ohne SHARC–Auslese wird der FIFO mit dem Beginn der Datenübertragung gefüllt. Der Schreibvorgang in den FIFO wird beendet, wenn dieser voll ist; es werden keine Daten im FIFO überschrieben. Dies funktioniert bei Testpulsen, die eine kleinere Amplitude als 60 DAC–Werte haben einwandfrei, bei größeren Amplituden wird der FIFO nicht gefüllt, so daß keine Daten ausgelesen werden können. Eine Testpulsamplitude von 60 DAC–Kanälen entspricht aber einer Signalamplitude von wenigen mV, so daß diese Messungen keine verwertbaren Daten liefern. Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Leerung des FIFO auf. Die Auslese der Daten über den VME–Bus wird beendet, sobald der FIFO als leer gekennzeichnet ist. Wird dieser Zustand nicht durch das entsprechende Bit im Statusregister der EEI–Karte markiert, wird die Auslese nicht beendet. Beide Effekte wurden durch Überprüfung der elektrischen Signale auf der EEI–Karte mit Hilfe eines Oszilloskops eingegrenzt. Die den Schreibvorgang in den FIFO steuernden Signale werden entsprechend dem Sollzustand gesetzt und gelöscht. Der Fehler tritt höchstwahrscheinlich beim Schreiben der Registerinformationen auf, dies muß in weiteren Tests untersucht werden.

8.3.2 Die SHARC–Auslese

Die Auslese der EEI–Karte mit Hilfe der SHARCs ist die im regulären Betrieb verwendete Art der Datenerfassung. Nur diese Art der Auslese bietet die erforderliche Bandbreite, um die von der EEI–Karte gelieferten Datenmengen auslesen und verarbeiten zu können. Nach Einschalten der SHARC–Schnittstelle wird der FIFO zurückgesetzt. Die Datenübertragung von der EEI–Karte zu den SHARCs beginnt mit Eintreffen des nächsten FLT–Accept–Signals und läuft von da an kontinuierlich weiter. Der FIFO sollte während der Auslese nicht gefüllt werden, da die Daten von den SHARCs schneller gelesen als in den FIFO geschrieben werden.

Zunächst wurde bei diesen Untersuchungen deutlich, daß eine Konfiguration der EEI–Karte mit angeschlossenen SHARCs nur möglich ist, wenn diese sich im zurückgesetzten Zustand befinden und noch keine Programme in den SHARC–Speicher übertragen sind. Dieser Effekt ist in der aktuellen Version der EEI–Karte noch nicht behoben. Zur Initialisierung der SHARC–Auslese wird die in Kapitel 8.2 beschriebene Vorgehensweise verwendet.

Ein weiterer Effekt betrifft den Start der Datenübertragung mit Empfang eines FLT–Accept–Signals. Unabhängig davon, ob das FLT–Accept–Signal von der FCS–Tochtereinheit gesendet, oder von der EEI–Karte als "fake accept" generiert wurde, wird bis auf wenige Ausnahmen die kontinuierliche Datenübertragung durch das Signal nicht gestartet. Die Daten dieser Ausnahmen sind für Teile der Untersuchungen in Kapitel 7 benutzt worden.

Überwiegend folgt auf den Start einer Datenauslese mit Senden eines FLT–Accept–Signals die Sendung von Null bis fünf Datenworten. Diese Reaktion läßt sich zur Gewinnung eines vollständigen Datensatzes nutzen, indem solange FLT–Accept–Signale gesendet werden, bis die erforderliche Anzahl von Daten empfangen wurde. Diese Daten bestehen allerdings zum überwiegenden Teil aus Headerinformationen, obwohl dieser nur alle 32768 Datenworte in den Datenstrom eingefügt werden soll (siehe Kapitel 5.3). Die Zeit zum Senden von 32768 Datenworten ist aber kleiner als die benötigte Zeit, um zwei aufeinanderfolgende FLT–Accept–Signal zu Testzwecken zu generieren. Dies kann bedeuten, daß tatsächlich alle Daten aus dem FIFO entfernt werden, diese Daten aber nicht korrekt zur SHARC–Schnittstelle gelangen. Das Einfügen der Headerinformation in den Datenstrom wäre in diesem Fall richtig.

Der Rest der Daten besteht aus fast identischen Datenworten, in denen keine Korrelation mit dem erzeugten Testpuls zu erkennen ist, da das Bitmuster auch nach Variation der Testpulsamplitude bis hin zur Amplitude Null keine Änderungen aufwies. Dies weist auf eine Fehlfunktion des ADC oder der Übertragung der Daten zum oder vom FIFO hin. Bei den wenigen brauchbaren Datensätzen, bei denen die Datenübertragung mit Senden eines FLT–Accept–Signals startete, sind diese falschen Datenworte ebenfalls enthalten, allerdings im Gegensatz zu den mißglückten Versuchen nicht im gesamten Datenbestand, sondern nur in einer der drei pro Datenwort gesendeten Energiesummen (Kapitel 5.3). Da die Energiesumme in aufeinanderfolgenden Datenworten redundant vorhanden ist, können diese Daten verwendet werden. Das in Kapitel 7.2 beschriebene Problem der deutlich vom Testaufbau abweichenden Kalibration der EEI–Karte im HERA–B Experiment könnte durch die fehlerhaft arbeitende SHARC–Auslese erklärt werden. Dies muß in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

8.4 Verbesserungsmöglichkeiten

Nach Inbetriebnahme des Prototypen der EEI–Karte durch Behebung der im vorherigen Abschnitt aufgeführten Probleme sind für eine endgültige Version Verbesserungen möglich. Im folgenden sollen die möglichen Verbesserungen vorgestellt und begründet werden.

Eine Möglichkeit des Einsatzes der EEI–Karte ist die Messung der Verteilung der Wechselwirkungen über die verschiedenen Targetdrähte. Dafür muß eine Ortsabhängigkeit der Energiedeposition in Abhängigkeit von der Targetdrahtposition existieren, wie dies analog bei den eingesetzten Szintillationszählern der Fall ist [15]. Zur Bildung von Asymmetrien der Art

$$A = \frac{Energiedeposition_{oben} - -Energiedeposition_{unten}}{Energiedeposition_{oben} + Energiedeposition_{unten}} \tag{8.2}$$

ist die Unterteilung des inneren Kalorimeterbereichs in vier Teilbereiche (oben, unten, links, rechts) sinnvoll. Die hierfür benötigten vier statt sechs Summierer auf der EEI–Karte müßten weiterhin jeweils mit Digitalisierern und SHARC–Schnittstellen, sowie Zugriff auf die VME–Schnittstelle und das Fast–Control–System ausgerüstet werden. Durch Veränderungen des Datenprotokolls zumindest der vier neuen Digitalsummen besteht die Möglichkeit, SHARC–Schnittstellen einzusparen, indem das redundante Senden der Energiesummen unterbleibt. Weiterhin muß das digitale Gesamtsummensignal für die Ratenmessung erhalten bleiben; die erhöhte Komplexität, aus vier einzelnen Energiesummen innerhalb von 96 ns eine Gesamtsumme zu berechnen, wird nicht durch die Einsparung einer SHARC–Schnittstelle gerechtfertigt. Neben der zusätzlichen Ausgabe digitaler Signale ist auch die Ausgabe der analogen Gesamtenergiesumme vorgesehen. Dies ermöglicht die Nutzung des Kalorimeters als Zähler großer Akzeptanz zur Ratenmessung und Kalibration anderer Zähler. Dabei wird, wie in Kapitel 2 beschrieben, in der Targetelektronik das analoge Summensignal mit einer Diskriminatorschwelle verglichen und beim Überschreiten dieser Schwelle ein Signal definierter Länge erzeugt. Dieses Signal kann zur Ratenmessung eingesetzt werden.

8.5 Zusammenfassung

Zur Inbetriebnahme der SHARC–Schnittstelle ist eine Prozedur entwickelt worden, die den problemlosen Einsatz dieser Auslesemethode ermöglicht. Die Auslese der EEI–Karte, sowohl über die VME– als auch über die SHARC–Schnittstelle (mit oben beschriebener Prozedur) funktioniert im Testaufbau einwandfrei. Im HERA–*B* Detektor weisen beide Komponenten der EEI–Karte Mängel auf, die bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht beseitigt werden konnten. Dies ist der Grund für die in dem vorherigen Kapitel nur geringe Statistik und Systematik der durchgeführten Messungen; die benutzten Daten entstammen den wenigen funktionierenden Auslesen. Weitere Untersuchungen müssen folgen, um die Einsatzbereitschaft der EEI–Karte sicherzustellen. Eingeschränkt werden konnte ein Problem auf den in die EEI–Karte integrierten FIFO beziehungsweise die Übertragung des FIFO–Status in das Statusregister. Geprüft werden muß, ob die vom ADC gebildeten Signale den Erwartungen entsprechen und ob die Übertragung zum FIFO oder vom FIFO zu der SHARC–Schnittstelle funktioniert. Weiterhin muß die Reaktion der EEI–Karte auf das FLT–Accept Signal genauer untersucht werden, um die Auslese der Daten über die SHARCs zu ermöglichen.

Kapitel 9

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Notwendigkeit einer präzisen Ratenmessung anhand der im Jahre 1998 durchgeführten Messungen begründet und die diesbezügliche Einsatzfähigkeit des elektromagnetischen Kalorimeters zusammen mit der EEI–Karte untersucht.

Es wurde gezeigt, daß die Energieinformation des inneren Teils des Kalorimeters zur Ratenmessung geeignet ist.

Die verwendeten ECAL Front–End–Driver wurden untersucht und kalibriert. Dies umfaßt sowohl den integrierten Testpulsgenerator als auch die ADC. Eine Kalibration der ECAL Energy–Inhibit Karte wurde durchgeführt. Dabei wurde die EEI–Karte in ihrer kompletten Funktionalität getestet und in den HERA–B Detektor integriert. Die Funktionalität im Testaufbau wurde gezeigt, ebenso wie die Einsatzfähigkeit der Elektronik zur Generierung des Veto–Signals. Bei der Untersuchung der EEI–Karte im HERA–B Detektor zeigten sich Probleme mit der Datenauslese, die den Einsatz der EEI–Karte zur Ratenmessung zur Zeit nicht erlauben. Die Grundfunktionalität der EEI–Karte ist sichergestellt, die erweiterten Funktionen sind noch mit einigen Problemen behaftet. Diese Probleme erscheinen jedoch lösbar, entsprechende Untersuchungen werden aufgrund der Resultate dieser Arbeit bereits durchgeführt.

Wenn die EEI–Karte in naher Zukunft fehlerfrei funktioniert, bietet diese vielfältige Möglichkeiten: Neben der Messung der Wechselwirkungsrate stellt die EEI–Karte ein hervorragendes Instrument zur Untersuchung des Protonenstrahls dar. Grundlegende Untersuchungen, wie zum Beispiel die Überprüfung der Poissonverteilung der Wechselwirkungsrate, sind mit dieser Elektronik möglich.

Die zur Zeit stattfindenden Untersuchungen rechtfertigen die Annahme, daß die ECAL Energy Inhibit Karte in der Datennahmeperiode 1999 zur vollen Einsatzbereitschaft gelangt.

Glossar

4LT Fourth Level Trigger, vierte Triggerstufe

ADSP Advanced Digital Signal Processor, fortschrittlicher, digitaler Signalprozessor

DSP Digital Signal Processor, Digitaler Signalprozessor

EVC Event Controll, Ereigniskontrolleinheit des Datennnahmesystems

EEI ECAL Energy Inhibit, Bestandteil des Pretriggersystems

FCS Fast Control System, schnelles HERA–B Kontrollsystem

FED Front End Driver, erste Stufe der Ausleseelektronik

FLT First Level Trigger, erste Triggerstufe

ROI Region Of Interest, interessanter Bereich für Spurensuche im FLT und SLT

RPM Real Powerful Messaging, HERA–B Nachrichtensystem

RPS Real Powerful SHARC Messaging, zwischen den SHARCs benutztes Nachrichtensystem

RRB RPM to RPS Bridge, übersetzt RPM– in RPS–Nachrichten und umgekehrt

SHARC Super Harvard ARchitecture Computer, ADSP von Analog Devices

SHARC Cluster VME–Karte mit sechs SHARCs

SLB Second Level Buffer, Zwischenspeicher fr zweite und dritte Triggerstufe

SLT Second Level Trigger, zweite Triggerstufe

TDU Trigger Decision Unit, Bestandteil des FLT, fällt Triggerentscheidung

TFU Track Finding Unit, Bestandteil des FLT, findet Spuren im Detektor

TLT Third Level Trigger, dritte Triggerstufe

TPU Track Parameter Unit, Bestandteil des FLT, berechnet Spurparameter

VME VersaModule Eurocard bus, Bus für schnelle Elektronik

Literaturverzeichnis

[1] CDF Collaboration, A Measurement of $\sin 2\beta$ from $B \rightarrow J/\psi K_S^0$ with the CDF Detector, Preliminary result for Distribution, 5. Februar 1999

[2] O. Nachtmann, Phänomene und Konzepte der Elementarteilchenphysik, Vieweg, 1986

[3] F. Halzen, A. D. Martin, QUARKS AND LEPTONS: An Introductory Course in Modern Particle Physics, John Wiley & Sons, Inc, 1984

[4] H. Albrecht et al., An Experiment to Study CP Violation in the B System Using sn Internal Target at the HERA Proton Ring, Letter of Intent, DESY–PRC 92/04, Oktober 1992

[5] H. Albrecht et al. (ARGUS), Phys. Lett. B 192 (1987) 245.

[6] K. Ehret, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[7] K. Ehret, Das HERA–B Target am HERA–Protonenstrahl: Eigenschaften und Wechselspiel mit Protonstrahldynamik, Graduiertenkolleg der Universität Dortmund, Februar 1999

[8] M. Funcke, Alignement der HERA–B Targetmechanik, Diplomarbeit, Universität Dormund, März 1999

[9] J.A. Ellison, Noise Effects in Beam Dynamics, HERA Betriebsseminar in Bad Lauterberg, 1998

[10] K. Ehret et al., Observation of coasting beams at the HERA Proton–Ring, Universität Dortmund, in Vorbereitung

[11] T. Jagla, Untersuchung der Target-Strahl Wechselwirkung im HERA-B Experiment, Diplomarbeit, Universiät Dortmund (1998), nicht publiziert

[12] K. Ehret, persönliche Mitteilung

[13] S. Spratte: Untersuchung zu den Eigenschaften eines internen Drahttargets für das HERA-B Experiment, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1996), nicht publiziert.

[14] V. Aushev, persönliche Mitteilung, Januar 1999

[15] M. Bräuer: Aufbau und Untersuchung der Eigenschaft des Targets für den HERA-B Detektor, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1997), nicht publiziert

[16] S. Spratte, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[17] C. Knierim, persönliche Mitteilung, März 1999

[18] J. Klenner: Verhalten des HERA-B Drahttargets im HERA Protonstrahl, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1998), nicht publiziert

[19] S. Schaller: Untersuchung der Beiträge einzelner Protonenbündel zur Wechselwirkungsrate des HERA–B–Experiments, Diplomarbeit, Ruprecht-Karl-Universität Heidelberg (1998), nicht publiziert

[20] K. Ehret, Coasting beam, Vortrag am DESY Hamburg, Februar 1999

[21] R. Mankel, How Deadly is a Coasting Beamfor the HERA–B Outer Tracker?, HERA-B-note 99-007

[22] R. Mankel et al., HERA–B Physics Options in the 1998 Run, HERA-B note 98-132

[23] K. Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner Studienbücher, Stuttgart 1992

[24] O. Igonkina, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[25] B. Schwenninger, Untersuchungen der Myon–Pretrigger–Elektronik für das HERA–B Experiment, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1997)

[26] A. Cotta Ramusino, The ECAL Energy Inhibit card : preliminary specifications, Electronic Group internal note, I.N.F.N. Bologna

[27] G. Avoni et al., The ECAL readout board, Hera–B 96-182

[28] S. Scharein, A Third Level Trigger for HERA–B, Vortrag an der Humboldt Universität Berlin, 1998

[29] J. Gläß et. al.,DESIGN OF THE HERA–B FIRST LEVEL TRIGGER, proceedings IEEE nuclear science symposium, San Fransisco, Oktober 1995

[30] T. Fuljahn et al., Implementation of the HERA–B First Level Trigger, procedding Computing in High Energy Physics, Berlin, April 1997

[31] T. Fuljahn et al., Concept of the First Level Trigger for HERA–B, IEEE transaction on nuclear science 45, 1998

[32] T. Lohse et al.,An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Proposal, DESY–PRC 94/02, Mai 1994

[33] H. Albrecht et al., An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Design Report, DESY–PRC 95/01, Januar 1995

[34] T. Fuljahn, Aufbau und Charakterisierung des schnellen Kontrollsystems für das Experiment HERA-B, Dissertation (in Vorbereitung), Hamburg 1999

[35] Fuljahn T., Ressing D., FCS documentation, 23. November 1998, HERA-B-note 98-212

[36] S. Issever, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[37] C. Knierim, Diplomarbeit in Vorbereitung

[38] G. Wagner, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[39] M. Bruschi, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[40] A. Somov, persönliche Mitteilung, Februar 1999

[41] M. Bruschi, persönliche Mitteilung, März 1999

[42] Analog Devices, ADSP–2106x SHARC User's Manual, Mai 1997

[43] HERA–*B* DAQ–Gruppe, Proposal for a HeraB Message Handler Interface (Draft), Juni 1998,

`ftp://ftp.desy.de/pub/herab/daq/rpm_doc.ps`

[44] HERA–*B* DAQ–Gruppe, SHARC Krnl Documentation,

`ftp://ftp.desy.de/pub/herab/daq/krnl-doc.ps`

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern Ursula und Alfons, sowie meinem Bruder Christian danken. Durch Unterstützung jeglicher Art haben sie mir das Studium ermöglicht und erleichtert; diese Arbeit ist ihnen ganz bewußt und in vollster Überzeugung gewidmet.

Herrn Prof. Dr. D. Wegener danke ich dafür, daß er mir diese interessante Diplomarbeit in dem faszinierendem Umfeld der Hochenergiephysik ermöglicht hat. Er vermittelt jedem seiner Studenten das Gefühl, etwas wichtiges zu leisten, und spornt dadurch zu immer besseren Leistungen an.

Herrn Prof. Dr. T. Weis danke ich dafür, die Aufgabe des Zweitgutachters übernommen zu haben.

Den Mitgliedern der Targetgruppe gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit und eine ausgesprochen nette und unterhaltsame Zeit. Vor allem Dr. Klaus Ehret sei an dieser Stelle für seine unendliche Geduld und seine immer gute Laune gedankt, mit der er jede noch so angespannte Situation immer wieder auflockert. Wie auch unsere beiden Doktoranden, Selim İşsever und Stefan Spratte, hat er immer Zeit, einem jungen Diplomanden selbst auf die naivsten Fragen eine ausführliche und hilfreiche Antwort zu geben. Allen drei möchte ich für die Korrektur dieser Arbeit danken, vor allem Selim hat die letzten Tage vor der Abgabe mit unglaublichem Geschick noch strukturelle Fehler gefunden. Aber auch der Rest der Targetgruppe war stets mit Rat und Tat zur Stelle, wenn irgendwo Hilfe benötigt wurde.

Für meine Arbeit von besonderer Bedeutung waren die Mitglieder der ECAL– und der DAQ–Gruppe. Stellvertretend für alle möchte ich hier namentlich Gulio Avoni, Dr. Marco Bruschi, Angelo Cotta Ramusino, Dr. Dominik Ressing und Gregor Wagner erwähnen, die mir bei den vielen kleinen und großen Problemen im Laufe der Zeit mit Ihrer Erfahrung immer helfen konnten.

Eine experimentelle Arbeit der Hochenergiephysik entsteht nicht durch die Leistung weniger. All denen, die sich vergessen fühlen, sei versichert, daß ich mir Ihrer Hilfe bewußt und Ihnen dafür dankbar bin.

Letztendlich sei den Menschen gedankt, die die Arbeit am DESY jeden Tag aufs Neue witzig und unterhaltsam sein ließen. Da es unmöglich ist, alle zu erwähnen, sei hier nur den Eisprinzessinnen für viele unterhaltsame Schnäppchen gedankt.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter der Vertragsnummer 05 7Do 55P gefördert.