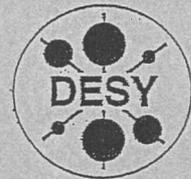


G



\*X1999-00912\*

# DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON



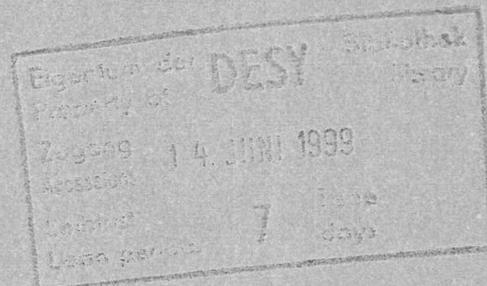
DESY-THESIS-1999-016

Mai 1999

## Aufbau und Charakterisierung des schnellen Kontrollsystems für das Experiment HERA-B

von

T. Fuljahn



ISSN 1435-8085

NOTKESTRASSE 85 - 22607 HAMBURG

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

To be sure that your reports and preprints are promptly included in the  
HEP literature database  
send them to (if possible by air mail):

DESY  
Zentralbibliothek  
Notkestraße 85  
22603 Hamburg  
Germany

DESY  
Bibliothek  
Platanenallee 6  
15738 Zeuthen  
Germany

# Aufbau und Charakterisierung des schnellen Kontrollsystems für das Experiment HERA – B

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von  
Thomas Fuljahn  
aus Hamburg

Hamburg  
1999

Gutachter der Dissertation: Dr. A. Schwarz  
Prof. Dr. W. Schmidt-Parzefall

Gutachter der Disputation: Prof. Dr. W. Schmidt-Parzefall  
Prof. Dr. P. Schmüser

Datum der Disputation: 17.05.1999

Dekan des Fachbereichs Physik und  
Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr. F.-W. Büßer

## Kurzfassung

Zur Untersuchung der  $CP$ -Verletzung in Zerfällen von  $B$ -Mesonen wird z.Zt. am Deutschen Elektronen Synchrotron DESY in Hamburg das Experiment HERA – B aufgebaut. Die zentralen Herausforderungen dieses Experimentes bestehen in einer hohen Dichte von Teilchenspuren im Detektor (ca. 200 Spuren pro Ereignis) und einem äußerst geringen Signal-zu-Untergrund-Verhältnis ( $10^{-11}$  für den Zerfallskanal  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^-$ ). Es ist notwendig, Daten aus ca. 540.000 Meßkanälen mit einer Ereignisrate von 10 MHz und einer Ausgangsrate der ersten Triggerstufe von 50 kHz totzeitfrei zu verarbeiten.

Zur Verteilung von Zeitreferenzen, Trigger-Informationen und Testsignalen an die Ausleseelektronik aller Detektorkomponenten sowie für einige Funktionen zur Kontrolle der ersten Triggerstufe wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges schnelles Kontrollsystem entwickelt.

In dieser Dissertation werden zunächst anhand einer Einführung in das Experiment und einer ausführlichen Beschreibung des Datennahmesystems die Anforderungen an dieses schnelle Kontrollsystem dargestellt. Der Motivation folgt eine Beschreibung der Hard- und Software des Kontrollsystems. Die Zeitreferenz- und Triggersignale, die durch das System verteilt werden, werden charakterisiert. Anhand von Meßdaten aus dem HERA – B -Datennahmebetrieb 1998 wird die gelungene Synchronisierung der Detektorkomponenten demonstriert. Abschließend werden Möglichkeiten zur Diagnose der ersten Triggerstufe gezeigt und potentielle Störeinflüsse des schnellen Kontrollsystems auf Messungen des Experimentes HERA – B diskutiert.

## Design, Implementation and Characterization of the Fast Control System for the HERA – B Experiment

### Abstract

The experiment HERA – B is currently under construction at the *Deutsches Elektronen Synchrotron* DESY in Hamburg and, upon completion, will investigate  $CP$ -violation in decays of  $B$ -mesons. The central challenges for this experiment are a high density of particle tracks in the detector (about 200 tracks per event) and an extremely small signal-to-background-ratio ( $10^{-11}$  for the decay channel  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^-$ ). Data from 540,000 channels must be processed an event rate of 10 MHz and a first level trigger rate of 50 kHz without deadtime.

A novel fast control system has been developed to distribute time references, trigger information and test signals to the front end electronics of all detector components as well as for some first level trigger control functions.

This thesis starts with an introduction to the experiment and a detailed description of the data acquisition system which leads to the requirements for the fast control system. The motivation is followed by a description of the fast control hard- and software. The time references and trigger signals, which are distributed by the system, are characterized. Successful synchronization of the detector components is shown by means of data from the 1998 HERA – B -operation. Finally some possibilities the system provides for investigating the first level trigger and potential biases the fast control system might give to HERA – B measurements are discussed.

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
<b>1 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1 Diskrete Symmetrien	3
1.1.1 Die Operationen $P$ , $C$ , und $T$	3
1.1.2 Das $CPT$ -Theorem	4
1.1.3 $CP$ -Verletzung im $K^0$ -System	5
1.2 $CP$ -Verletzung im Standardmodell	6
1.2.1 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	6
1.2.2 Lagrangedichte der elektroschwachen Wechselwirkung	7
1.2.3 Die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix	8
1.2.4 Ein Unitaritätsdreieck	9
1.2.5 Vorhersagen des Standardmodells	10
1.3 $CP$ -Verletzung im $B$ -System	12
1.3.1 Bedeutung der $B$ -Zerfälle	12
1.3.2 Der „goldene“ Zerfallskanal	13
1.3.3 Das weitere Meßprogramm von HERA – B	16
<b>2 Das Experiment HERA – B</b>	<b>18</b>
2.1 Überblick	18
2.2 Der HERA-Protonenspeicherring	19
2.3 Produktion der $B$ -Mesonen	20
2.4 Spurfindung	21
2.5 Teilchenidentifikation	26
<b>3 Datennahme und Trigger</b>	<b>29</b>
3.1 Anforderungen	29
3.2 Trigger-Strategien	30
3.3 Implementierung des Datennahmesystems	31
3.3.1 Front-End-Elektronik	33
3.3.2 Pretrigger	37
3.3.3 Erste Triggerstufe	40
3.3.4 Datenpuffer und Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe	42
3.3.5 Prozessoren und Algorithmen der zweiten Triggerstufe	43
3.3.6 Dritte Triggerstufe	44
3.3.7 Ereignisrekonstruktion und Massenspeicher	44
3.4 Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem	45
3.4.1 Anforderungen der Front-End-Systeme	45
3.4.2 Anforderungen der Link-Module	49
3.4.3 Anforderungen der ersten Triggerstufe	49
3.4.4 Anforderungen der zweiten Triggerstufe	51

3.4.5	Möglichkeiten für Tests der Front-End-Elektronik . . . . .	51
3.4.6	Testbetrieb von Detektorkomponenten . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Das schnelle Kontrollsystem</b> . . . . .	<b>53</b>
4.1	Das HERA-Zeitreferenzsystem . . . . .	53
4.2	Aufbau des schnellen Kontrollsystems . . . . .	54
4.2.1	Überblick . . . . .	54
4.2.2	Funktionalität des Mutter-Moduls . . . . .	55
4.2.3	Verteilung der Signale an die Tochter-Module . . . . .	63
4.2.4	Die Tochter-Module . . . . .	66
4.3	Kontroll- und Überwachungssoftware . . . . .	72
4.3.1	Verwendete Funktionsbibliotheken . . . . .	73
4.3.2	Der Server FCS_server für das schnelle Kontrollsystem . . . . .	73
4.3.3	Die Client-Bibliothek libfcs.a . . . . .	75
4.3.4	Benutzerschnittstellen . . . . .	76
4.3.5	Ein Programm für direkte Hardware-Zugriffe . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Analyse der Zeitreferenz- und Triggersignale</b> . . . . .	<b>79</b>
5.1	Verzögerung des Taktsignals auf dem Tochter-Modul . . . . .	79
5.2	Präzision des Taktsignals . . . . .	82
5.3	Testpuls-Messungen . . . . .	85
5.3.1	Linearität der Verzögerung . . . . .	86
5.3.2	Präzision der Verzögerung . . . . .	87
5.4	Laufzeit von Triggersignalen . . . . .	88
5.5	Annahme von Nachrichten von der ersten Triggerstufe . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Das System im Datennahmebetrieb</b> . . . . .	<b>92</b>
6.1	Integration des schnellen Kontrollsystems . . . . .	92
6.2	Einbindung der Software . . . . .	93
6.3	Synchronisierung der Detektoren . . . . .	96
6.4	Trigger-Diagnose . . . . .	102
6.4.1	Einflüsse der Strahlstruktur auf die Trigger-Akzeptanz . . . . .	102
6.4.2	Latenzzeit der ersten Triggerstufe . . . . .	103
6.5	Mögliche Störeinflüsse auf das Experiment . . . . .	104
6.5.1	Die Trigger-Unterdrückungs-Mechanismen . . . . .	105
6.5.2	Einflüsse auf Ratenbestimmungen . . . . .	106
6.5.3	Verursachen von Ausfallzeiten . . . . .	107
6.5.4	Störung der Ereignisrekonstruktion . . . . .	108
	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>110</b>
<b>A</b>	<b>Glossar</b> . . . . .	<b>112</b>
<b>B</b>	<b>Der Front-End-Kontroll-Bus</b> . . . . .	<b>114</b>
<b>C</b>	<b>Das Server-Hauptprogramm</b> . . . . .	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>116</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Ein Unitaritätsdreieck der CKM-Matrix . . . . .	10
1.2	Einschränkungen der Parameter $\rho$ und $\eta$ . . . . .	11
1.3	Box-Diagramm der $B^0 - \bar{B}^0$ -Mischung . . . . .	12
1.4	Feynman-Diagramm des Zerfalles $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ . . . . .	13
1.5	Ein „goldenes“ Ereignis . . . . .	14
1.6	Prozesse, aus denen sich Winkel und Seitenlängen bestimmen lassen . . . . .	16
2.1	Die DESY-Beschleuniger . . . . .	19
2.2	Schema der Anordnung der Zieldrähte . . . . .	21
2.3	Der Detektor im Querschnitt . . . . .	22
2.4	Das HERA - B - Koordinatensystem . . . . .	23
2.5	Schema eines Gas-Mikrostreifenzählers mit GEM-Folie . . . . .	24
2.6	Segmentierung der Spurkammern . . . . .	25
2.7	Zelle und Segmentierung des Kalorimeters . . . . .	27
2.8	Schnitt durch eine Myon-Pad-Kammer . . . . .	28
3.1	Architektur des HERA - B - Datennahmesystems . . . . .	32
3.2	Querschnitt der Experimentierhalle . . . . .	34
3.3	Auslesesystem des Vertexdetektors und der inneren Spurkammern . . . . .	35
3.4	Vereinfachte Schemazeichnung eines Kanals im HELIX-Chip . . . . .	35
3.5	Ausleseelektronik des elektromagnetischen Kalorimeters . . . . .	36
3.6	Weg der Meßdaten durch ein TDC-Modul . . . . .	36
3.7	Spurensuche in der ersten Triggerstufe . . . . .	38
3.8	Koinzidenz-Schema für den Myon-Pretrigger . . . . .	39
3.9	Korrespondenz zwischen Trigger-Prozessoren und Detektorgeometrie . . . . .	41
3.10	Schnittstellen des schnellen Kontrollsystems . . . . .	46
4.1	Schema des HERA-Zeitreferenzsystems . . . . .	53
4.2	Prinzipieller Aufbau des schnellen Kontrollsystems . . . . .	55
4.3	Foto des Mutter-Moduls . . . . .	56
4.4	Blockschema des Mutter-Moduls . . . . .	57
4.5	Fotos des Sender- und des Empfängermoduls . . . . .	64
4.6	Das VME-Crate mit Mutter- und Sender-Modulen . . . . .	65
4.7	Foto eines Tochter-Moduls . . . . .	66
4.8	Foto eines TDC-Crates . . . . .	67
4.9	Überblick über die Funktionsblöcke eines Tochter-Moduls . . . . .	68
4.10	Adress-Prüfschaltung der Tochter-Module . . . . .	70
4.11	Flußdiagramm des Servers . . . . .	74
4.12	Flußdiagramm einer typischen Client-Funktion . . . . .	75
4.13	Hauptfenster der Grafischen Benutzerschnittstelle fcs . . . . .	76
4.14	Fenster für Kontrollparameter und Zähler des Mutter-Moduls . . . . .	77
4.15	Latenzzeit-Histogramm in der grafischen Benutzerschnittstelle . . . . .	77

4.16	Fenster mit Funktionen zur Konfiguration der Tochter-Module . . . . .	78
5.1	Aufbau für die Messung der Signalverzögerungen . . . . .	79
5.2	Übertragung des Taktsignals vom Mutter- zum Tochter-Modul . . . . .	80
5.3	Messung von verschiedenen Signalverzögerungen (grob) . . . . .	80
5.4	Messung von verschiedenen Signalverzögerungen (fein) . . . . .	81
5.5	Gemessene Zeitdifferenzen in Relation zur gewählten Verzögerungszeit . . . . .	82
5.6	Meßaufbau für die Präzision des Taktsignals . . . . .	83
5.7	Taktsignal vom Tochter- relativ zum Mutter-Modul (gut) . . . . .	84
5.8	Taktsignal vom Tochter- relativ zum Mutter-Modul (schlecht) . . . . .	84
5.9	Ein Testpuls mit Bezug zum Takt- und zum Triggersignal . . . . .	85
5.10	Zeitmessung in Relation zur jeweils eingestellten Verzögerungszeit . . . . .	86
5.11	Unsicherheit der Zeitmessung abhängig von der Verzögerung . . . . .	87
5.12	Messung der Signallaufzeit im schnellen Kontrollsystem . . . . .	88
6.1	Datennahmesystem mit Datenauslese durch VME-Kontrollrechner . . . . .	94
6.2	Datennahmesystem für die gemeinsame Datennahme mit dem Switch . . . . .	95
6.3	Wie der RICH die HERA-Strahlstruktur sieht . . . . .	96
6.4	Synchronisation der Detektorkomponenten - Run 1131 . . . . .	98
6.5	Korrelationen in Trefferzahlen der Detektorkomponenten - Run 1131 . . . . .	99
6.6	Synchronisation der Detektorkomponenten - Run 822 . . . . .	100
6.7	Korrelationen in Trefferzahlen der Detektorkomponenten - Run 822 . . . . .	101
6.8	Bunch-Beiträge zur Trigger-Akzeptanz - Run 1335 . . . . .	102
6.9	Beispiel eines Trigger-Latenzzeit-Histogramms . . . . .	103
6.10	Das selbe Histogramm nach der im Text beschriebenen Manipulation . . . . .	104

## Tabellenverzeichnis

1.1	Die Elementarteilchen . . . . .	6
1.2	Die Austauschteilchen der Wechselwirkungen im Standardmodell. . . . .	6
1.3	Zusammenhänge der Winkel des Unitaritätsdreiecks mit B-Zerfällen . . . . .	13
2.1	Anzahl „goldener“ Zerfälle im Verhältnis zur Anzahl der Ereignisse . . . . .	20
3.1	Übersicht über Eingangsraten und Latenzzeiten der Triggerstufen . . . . .	30
4.1	Die Zähler des Trigger-Sperr-Histogramms . . . . .	60
4.2	VME-schreib- und -lesbare Parameter des Mutter-Moduls . . . . .	62
4.3	Format der Übertragung zwischen Mutter- und Tochter-Modulen . . . . .	63
4.4	Kontrollregister der Tochter-Module . . . . .	69
5.1	Laufzeit eines Triggersignals im schnellen Kontrollsystem . . . . .	89
5.2	Nutzung der Speicherzeit der Front-End-Systeme . . . . .	90

# Einleitung

In der Elementarteilchenphysik werden die elementaren Bausteine der Materie und die Wechselwirkungen zwischen ihnen untersucht. Das sogenannte Standardmodell beschreibt die Wechselwirkungen im Rahmen einer Eichfeldtheorie. Bisher gibt es keine experimentellen Beobachtungen, die dem Standardmodell widersprechen.

Ein innerhalb dieses Modells noch nicht vollständig verstandenes Phänomen ist die Verletzung der Invarianz bestimmter Systeme unter der Transformation  $CP$ , der Kombination von Ladungskonjugation und Raumspiegelung. Man spricht von der  $CP$ -Verletzung. Diese wurde bisher nur in Zerfällen neutraler  $K$ -Mesonen beobachtet, wird aber auch für andere Systeme vorhergesagt. Eine vorläufige Beobachtung der  $CP$ -Verletzung in Zerfällen neutraler  $B$ -Mesonen wurde kürzlich berichtet [cdf99].

Das Experiment HERA - B wird z.Zt. am Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg aufgebaut, um  $CP$ -Verletzung in Zerfällen neutraler  $B$ -Mesonen zu untersuchen. Das Experiment wurde 1992 vorgeschlagen und erste Installationsarbeiten begannen im selben Jahr [alb92a]. 1995 wurde das Experiment endgültig genehmigt und das detaillierte Design veröffentlicht [har95]. Heute, sieben Jahre nach dem Beginn der Arbeiten an HERA - B, sind Teile des Detektors in Betrieb; die Fertigstellung wird im Laufe dieses Jahres angestrebt. Diese Arbeit ist Teil der Entwicklung des Experimentes.

Der Detektor wird in den bestehenden Protonenspeicherring HERA-p eingebaut. In einer nahezu überwältigenden Anzahl inelastischer Reaktionen der hochenergetischen Protonen mit Nukleonen in einem Drahttarget werden die sehr seltenen  $B$ -Mesonen mit geringer Rate erzeugt. Protonenpakete folgen einander in Abständen von 96 ns. Von den 220 durch die Beschleunigungsfrequenz definierten Plätzen sind dabei aus technischen Gründen nur 180 besetzt. Um eine für die angestrebten Messungen ausreichende Anzahl vollständig rekonstruierter  $B$ -Zerfälle zu gewinnen, muß jedes Protonenpaket vier bis fünf Wechselwirkungen hervorbringen. Eine solche Mehrfachwechselwirkung, die auch als Ereignis bezeichnet wird, bringt im Mittel ca. 200 geladene Teilchen hervor. Um diese voneinander trennen zu können und um die Belegungsdichte der Detektoren klein zu halten, wird der Detektor aus ca. 540.000 Meßkanälen bestehen.

Die Herausforderung an das Datennahmesystem ist eine totzeitfreie Auslese und *Online*-Analyse dieser großen Anzahl von Meßkanälen mit der Rate von 10,417 MHz. Während alle Daten eines Ereignisses in den *Front-End*-Systemen zwischengespeichert sind, soll die erste *Trigger*stufe Ereignisse selektieren, deren Daten an die zweite Stufe übergeben werden. Das Ziel ist, mit einer Frequenz von etwa 50 kHz Ereignisse zur Analyse an die zweite *Trigger*stufe zu übergeben.

Die *Front-End*-Systeme, das „vordere Ende“ des Datennahmesystems unmittelbar am Detektor, umfassen Elektronik zum Auslesen der Detektoren, zum Digitalisieren und Zwischenspeichern der Meßwerte. Diese Systeme, die in mehr als 200 *Crates* verteilt sind, benötigen eine gemeinsame Zeitreferenz, deren geforderte Präzision durch die angestrebten Driftzeitmessungen definiert wird. Alle Einzelmessungen müssen laufend markiert werden, so daß die Daten, die an die zweite *Trigger*stufe übergeben werden sollen, kor-

rekt identifiziert und zusammengeführt werden können. Die Entscheidungen der ersten Triggerstufe müssen an alle Front-End-Systeme übertragen werden, ohne dafür die Markierung neuer Ereignisse zu unterbrechen.

Ein schnelles Kontrollsystem (*Fast Control System, FCS*) sollte entwickelt werden um die Zeitreferenz, die Markierung der Daten und die Triggersignale an die Front-End-Systeme zu verteilen.

Im ersten Kapitel dieser Dissertation soll die Motivation zum Bau des Experimentes erläutert werden. Das zweite Kapitel beschreibt die Konzeption und den Aufbau des Experimentes. Im dritten Kapitel wird das Datennahmesystem beschrieben und die Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem daraus abgeleitet. Im vierten Kapitel erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Kontrollsystems, seiner elektronischen Komponenten und der zugehörigen Kontroll- und Überwachungssoftware, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Im fünften Kapitel wird die Verteilung der Zeitreferenz- und Triggersignale analysiert. Das abschließende sechste Kapitel enthält Messungen aus dem Datennahmehetrieb 1998 bezüglich der Synchronisierung der Teildetektoren und der Diagnose der ersten Triggerstufe sowie eine Diskussion potentieller Störeinflüsse des Kontrollsystems auf die bei HERA – B angestrebten Messungen.

Soweit wie möglich wurde die deutsche Sprache verwendet. Erklärungen von nach Meinung des Autors unvermeidlichen englischen Begriffen sowie in der Arbeit verwendete Abkürzungen finden sich im Glossar ab S. 112.

## Kapitel 1

# Theoretische Grundlagen

### 1.1 Diskrete Symmetrien

In der Physik spielen Invarianzen abgeschlossener Systeme unter bestimmten Transformationen eine wichtige Rolle. Solche Invarianzen werden als Symmetrien bezeichnet. Man unterscheidet zwischen kontinuierlichen und diskreten Symmetrien, die kontinuierlichen und diskreten Transformationen entsprechen.

Einer Invarianz der Bewegungsgleichungen eines Systems unter einer kontinuierlichen Symmetrietransformation entspricht gemäß dem Noether-Theorem [noe18] jeweils ein Erhaltungssatz für eine physikalische Größe dieses Systems. Beispiele für kontinuierliche Transformationen und die entsprechenden Erhaltungsgrößen sind die Verschiebung des Zeitnullpunktes und die Erhaltung der Energie, die Translation im Raum und die Erhaltung des Impulses sowie die Rotation im Raum und die Erhaltung des Drehimpulses.

Wie Systeme sich unter den diskreten Transformationen Raumspiegelung, Ladungskonjugation und Umkehrung der Zeitrichtung verhalten, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

#### 1.1.1 Die Operationen $P$ , $C$ , und $T$

Die Paritätsoperation  $P$  invertiert die Raumkoordinaten,  $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$ . Naiv würde man erwarten, daß Naturgesetze sich bei einer Spiegelung des Koordinatensystems nicht verändern.

Für Phänomene der elektromagnetischen und starken Wechselwirkung gibt es keine Hinweise auf Verletzungen dieser Invarianz. 1956 schlugen T. C. Lee und C. N. Yang vor, die Invarianz der schwachen Wechselwirkung unter Raumspiegelung experimentell zu überprüfen [lee56]. Daraufhin beobachteten C. S. Wu et al. [wu57] im darauffolgenden Jahr zum ersten Mal ein Phänomen, das nicht invariant unter Raumspiegelung ist.

Eine Probe des Beta-Strahlers  $^{60}\text{Co}$  wurde in diesem Experiment in einem Magnetfeld angeordnet, so daß die Kernspins ausgerichtet wurden. Die Elektronenemission beim Beta-Zerfall der Kerne erfolgt bevorzugt entgegen der Spinrichtung. Unter Raumspiegelung gilt für Polarvektoren:  $V(\vec{x}, t) = V(-\vec{x}, t)$ , während für Axialvektoren gilt:  $A(\vec{x}, t) = -A(-\vec{x}, t)$ . Da die Flugrichtung des Elektrons als Polarvektor, der Kernspin dagegen als Axialvektor transformiert wird, ergäbe eine Raumspiegelung der Anordnung bevorzugte Emission der Elektronen in Richtung des Spins. Die experimentelle Beobachtung schließt dieses aus.

Die Ladungskonjugation  $C$  ändert das Vorzeichen der additiven Quantenzahlen Ladung, Baryonzahl, Leptonenzahlen, Strangeness, Charm und Bottom. Durch diese Operation werden alle elektromagnetisch und stark wechselwirkenden Teilchen in ihre Antiteilchen verwandelt.

Für die ausschließlich schwach wechselwirkenden Neutrinos gilt dies nicht. Die Erklärung hierfür liegt in der sogenannten Helizität der Neutrinos. Man hat experimentell gefunden, daß Neutrinos immer longitudinal entgegen ihrer Flugrichtung polarisiert sind (negative Helizität) [gol58] [alb90], Antineutrinos in Flugrichtung (positive Helizität). Nun bleibt die Helizität unter der Transformation  $C$  unverändert. Die Ladungskonjugation eines Neutrinos führte also zu einem Antineutrino negativer Helizität, einem nicht erlaubten Zustand.

Unter Raumspiegelung wird der Spin eines Teilchens als Axialvektor und seine Flugrichtung als Polarvektor transformiert, so daß die Helizität umgekehrt wird. Die Kombination der Ladungskonjugation mit einer Raumspiegelung  $CP$  überführt also erst ein Neutrino in sein Antiteilchen.

Die Zeitumkehr  $T$  invertiert die Zeitrichtung:  $t \rightarrow -t$ . Ein experimenteller Hinweis auf Verletzung der Zeitumkehrsymmetrie ( $T$ -Verletzung) wäre z.B. der Nachweis eines elektrischen Dipolmoments des Neutrons. Dieses könnte aber kleiner sein kann als die bisher erreichte Nachweisempfindlichkeit [per90]. Experimentelle Möglichkeiten zur Überprüfung der Invarianz spezieller Prozesse der starken Wechselwirkung unter Zeitumkehr ergeben sich aus dem Prinzip des detaillierten Gleichgewichts. Dies besagt, daß das Betragsquadrat eines Übergangsmatrixelements gleich dem der Umkehrreaktion ist:  $|M_{if}|^2 = |M_{fi}|^2$  [per90].

Die ersten direkten experimentellen Nachweise für  $T$ -Verletzung wurden erst 1998 gewonnen [ang98a, ang98b, are98] (zit. nach [schu99]).

In den 1960er Jahren entstand die Idee, auf der Grundlage des  $CPT$ -Theorems [lue57] die  $T$ -Invarianz indirekt durch die Prüfung der  $CP$ -Invarianz zu prüfen.

### 1.1.2 Das $CPT$ -Theorem

Das  $CPT$ -Theorem [lue57] des Standardmodells besagt, daß eine weite Klasse von Feldtheorien, die invariant unter Lorentz-Transformationen sind, folglich auch invariant unter dem Produkt der Transformationen  $C$ ,  $P$  und  $T$  sind. Dieses Theorem ist mit allen bisherigen experimentellen Beobachtungen verträglich. Aus dem  $CPT$ -Theorem folgt: wenn ein Prozeß unter einer der Operationen  $C$ ,  $P$  und  $T$  nicht invariant ist, ist er ebenfalls nicht invariant unter einer der beiden anderen.

Für die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung gilt die Invarianz unter  $C$ ,  $P$  und  $T$  jeweils für sich. In den oben zitierten Experimenten beobachtet man Verletzungen der  $P$ - und  $C$ -Invarianz unter schwacher Wechselwirkung.

Invarianz eines Systems unter  $T$  würde Invarianz auch unter der kombinierten Transformation  $CP$  erfordern. Damit bietet  $CP$  eine indirekte Möglichkeit, die  $T$ -Invarianz experimentell zu überprüfen. Vor diesem Hintergrund untersuchten J. H. Christenson et al. Zerfälle neutraler Kaonen [chr64], um die  $CP$ -Invarianz zu testen. Überraschenderweise beobachteten sie jedoch eine Verletzung der  $CP$ -Invarianz in Zerfällen neutraler Kaonen.

### 1.1.3 $CP$ -Verletzung im $K^0$ -System

J. H. Christenson et al. untersuchten Zerfälle neutraler Kaonen. Zwei neutrale Kaonen  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  werden als Eigenzustände der Strangeness mit  $S = +1$  und  $S = -1$  unterschieden. Der Zerfall der neutralen Kaonen erfolgt, neben semileptonischen Kanälen, in zwei oder in drei Pionen. Beide neutralen Kaonen können sowohl in den Zweipion- als auch in den Dreipionzustand zerfallen. Damit können die Mesonen über virtuelle Zwei- oder Dreipionzustände ineinander übergehen:

$$K^0 \longleftrightarrow \begin{bmatrix} \pi^0\pi^0 \\ \pi^+\pi^- \\ \pi^0\pi^0\pi^0 \\ \pi^+\pi^-\pi^0 \end{bmatrix} \longleftrightarrow \bar{K}^0 \quad (1.1)$$

Der Zweipionzustand ist ein  $CP$ -Eigenzustand mit Eigenwert  $CP = +1$ , der Dreipionzustand ein  $CP$ -Eigenzustand mit Eigenwert  $CP = -1$  [loh92]. Man kann nun Linearkombinationen der  $K$ -Zustände bilden, die ebenfalls  $CP$ -Eigenzustände sind:

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{mit } CP = +1, \quad (1.2)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{mit } CP = -1. \quad (1.3)$$

Man erwartet dann wegen der  $CP$ -Erhaltung, daß  $K_1^0$  in zwei Pionen zerfällt und  $K_2^0$  in drei Pionen. Für diese beiden Zerfallsklassen werden erheblich unterschiedliche Lebensdauern erwartet, da für den Zwei-Pion-Zerfall mehr kinetische Energie und damit ein größerer Phasenraum zur Verfügung steht, als für den Drei-Pion-Zerfall. Die mittleren Lebensdauern sind  $0,89 \cdot 10^{-10}$  s für  $K_1^0 \rightarrow \pi\pi$  und  $0,53 \cdot 10^{-7}$  s für  $K_2^0 \rightarrow \pi\pi\pi$  [pdg98].

Christenson et al. [chr64] wiesen nach, daß das langlebige  $K_2^0$  ( $CP = -1$ ) zu einem kleinen Teil in zwei Pionen ( $CP = +1$ ) zerfällt. Diese Beobachtung war die experimentelle Entdeckung der Verletzung der  $CP$ -Invarianz, kurz:  $CP$ -Verletzung. Diese Entdeckung war noch weit überraschender und sensationeller als sieben Jahre zuvor die Entdeckung der Paritätsverletzung.

Die  $CP$ -Eigenzustände  $K_1^0$  und  $K_2^0$  entsprechen also nicht genau den experimentell beobachtbaren  $K$ -Mesonen mit definierter Lebensdauer. Man beschreibt daher ein kurzlebige  $K_S^0$  als  $K_1^0$  mit einer kleinen  $K_2^0$ -Beimischung ( $0 < \epsilon \ll 1$ ) und ein langlebiges  $K_L^0$  umgekehrt:

$$|K_S^0\rangle = (1 + |\epsilon|^2)^{-1/2} \cdot (|K_1^0\rangle + \epsilon|K_2^0\rangle), \quad (1.4)$$

$$|K_L^0\rangle = (1 + |\epsilon|^2)^{-1/2} \cdot (|K_2^0\rangle + \epsilon|K_1^0\rangle). \quad (1.5)$$

Der Entdeckung von Christenson et al. folgten verschiedene Versuche, die  $CP$ -Verletzung zu erklären. Der Ursprung der  $CP$ -Verletzung ist bis heute unbekannt. Innerhalb des Standardmodells der Elementarteilchenphysik mit drei Quarkfamilien existiert eine Beschreibung, deren experimentelle Prüfung das Ziel des Experimentes HERA - B ist.

## 1.2 CP-Verletzung im Standardmodell

### 1.2.1 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Die Physik der Elementarteilchen wird heute mit dem Standardmodell beschrieben. Das Standardmodell kennt zwölf Teilchen als Konstituenten der Materie. Diese werden in zwei Gruppen — Leptonen und Quarks — und in drei Familien eingeteilt (Tab. 1.1). Alle diese Teilchen sind Fermionen und besitzen einen halbzahligen Spin. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen, das sich im Vorzeichen der additiven Quantenzahlen unterscheidet.

Tabelle 1.1: Die Elementarteilchen

Familie	Leptonen	Quarks
1.	$e^-, \nu_e$	d, u
2.	$\mu^-, \nu_\mu$	s, c
3.	$\tau^-, \nu_\tau$	b, t

Die Teilchen wechselwirken über vier fundamentale Wechselwirkungen, von denen drei im Standardmodell in einer  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ -Eichfeldtheorie beschrieben werden. Dies sind die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung. Die vierte fundamentale Wechselwirkung, die Gravitation, konnte noch nicht in das Standardmodell eingebunden werden.

Die Wechselwirkung zwischen den Fermionen erfolgt bei allen im Standardmodell beschriebenen Wechselwirkungen durch den Austausch von Eichbosonen. Diese haben, im Gegensatz zu Fermionen, einen ganzzahligen Spin. Die Eichbosonen sind in Tab. 1.2 aufgelistet.

Tabelle 1.2: Die Austauscheteilchen der Wechselwirkungen im Standardmodell.

Wechselwirkung	Eichbosonen	el. Ladung	Farbladung	Masse $\frac{\text{Masse}}{\text{GeV}/c^2}$ [pdg98]
Stark	8 Gluonen	0	8 versch.	0 (theoretisch)
Schwach	$Z^0$	0	keine	$91,188 \pm 0,007$
Schwach	$W^\pm$	$\pm 1$	keine	$80,41 \pm 0,1$
Elektromagnetisch	$\gamma$	0	keine	$< 2 \cdot 10^{25}$

Das Standardmodell beinhaltet zwei verschiedene Feldtheorien. Eine ist die Quantenchromodynamik (QCD), die die starke Wechselwirkung beschreibt und invariant unter  $SU(3)$ -Symmetrietransformationen ist. Ihre Austauscheteilchen sind die Gluonen, die über Farbladungen aneinander und an die Quarks (Tab. 1.1) koppeln. Quarks können mit Hilfe der starken Wechselwirkung gebundene Zustände eingehen, die als Hadronen bezeichnet werden. Leptonen wechselwirken nicht stark. Die andere Feldtheorie ist die vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung, die invariant unter  $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrietransformationen ist. Ihre Austauscheteilchen sind die W- und Z-Bosonen sowie das Photon.

Zur Beschreibung der Wechselwirkungen verwendet man einen Lagrange-Formalismus. Man definiert eine Lagrange-Dichte  $\mathcal{L}(\phi(x), \partial_\mu \phi(x))$  als Funktional des Feldes  $\phi(x)$  und

seines Vierergradienten  $\partial_\mu \phi(x)$ . Die Lagrangefunktion  $L$  ergibt sich als Volumenintegral über die Lagrangedichte. Aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung folgen dann die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen.

Im folgenden soll näher auf die elektroschwache Wechselwirkung eingegangen werden, da diese zur Beschreibung der CP-Verletzung innerhalb des Standardmodells benötigt wird.

### 1.2.2 Lagrangedichte der elektroschwachen Wechselwirkung

Die Lagrangedichte der elektroschwachen Wechselwirkung setzt sich aus fünf verschiedenen Anteilen zusammen:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}(f, E) + \mathcal{L}(f, H) + \mathcal{L}(E, H) + \mathcal{L}(E) - V(H). \quad (1.6)$$

Dabei bezeichnen  $f$  die Fermionen,  $E$  die Eichbosonen und  $H$  das Higgs-Feld. Das Higgs-Feld ist ein Hintergrundfeld, das mit den Fermionen, den Eichbosonen und mit sich selbst wechselwirkt.

Sowohl die Fermionen als auch die Eichbosonen erhalten ihre Massen aus ihrer Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld. Die Wechselwirkung des Higgs-Feldes mit den Fermionen, beschrieben durch  $\mathcal{L}(f, H)$ , führt zur Erzeugung der Massen der Fermionen. Das Higgs-Feld ist ein  $SU(2)$ -Dublett:

$$H = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \text{ und } H^C = \begin{pmatrix} \phi^{0*} \\ -\phi^- \end{pmatrix}, \quad (1.7)$$

wobei  $H$  und  $H^C$  ladungskonjugierte sind. Das Higgs-Dublett repräsentiert vier reelle, skalare Felder. Man schreibt

$$\phi^+ = \frac{\phi_1 + i\phi_2}{\sqrt{2}} \text{ und } \phi^0 = \frac{\phi_3 + i\phi_4}{\sqrt{2}} \quad (1.8)$$

Die Erwartungswerte der Felder sind nicht eindeutig. Man nimmt willkürlich an, daß der Erwartungswert von  $\phi^+$  verschwindet und der von  $\phi^0$  ungleich null ist:  $V(\phi^0) = v$ .

Spontane Symmetriebrechung ist nun eine Verschiebung des Feldes  $\phi^0$  um seinen Vakuumerwartungswert (Higgs-Transformation). Die spontane Symmetriebrechung führt zu folgendem Aussehen des hadronischen Anteils von  $\mathcal{L}(f, H)$  [jar88]:

$$\mathcal{L}(f, H) \xrightarrow{sSb} \mathcal{L}^{sSb}(f, H) = - \sum_{j,k=1}^3 (m_{jk} \bar{q}_{jL} q_{kR} + m'_{jk} \bar{q}'_{jL} q'_{kR} + h.c.) (1 + \frac{1}{v} \phi^0). \quad (1.9)$$

Hierbei bezeichnen L und R links- und rechtshändige Quarks. Die Matrizen  $m_{jk}$  und  $m'_{jk}$  sind die Quarkmassenmatrizen. Sie sind proportional zum Vakuumerwartungswert  $v$  des neutralen Higgs-Feldes und hängen von Kopplungskonstanten  $Y_{jk}$  und  $Y'_{jk}$  ab:

$$m_{jk} = -\frac{v}{\sqrt{2}} Y_{jk} \text{ und } m'_{jk} = -\frac{v}{\sqrt{2}} Y'_{jk} \quad (1.10)$$

Die Massenmatrizen sind nicht diagonal. Um zu den physikalisch beobachtbaren Quarks, den Masseneigenwerten der Matrizen zu kommen, müssen die Matrizen diagonalisiert werden. Man benötigt dazu vier unitäre Matrizen so daß:

$$U_L m U_R^\dagger = U = \text{Diag.}(m_u, m_c, m_t), \quad (1.11)$$

$$U_L' m' U_R'^\dagger = D = \text{Diag.}(m_d, m_s, m_b). \quad (1.12)$$

Die Transformation auf Masseneigenzustände läßt sich auch für die übrigen Terme der Lagrangedichte durchführen.

Der Term  $\mathcal{L}(f, E)$  beschreibt die Wechselwirkung der Fermionen mit den elektroschwachen Eichbosonen. Dieser Term besitzt einen Anteil des schwachen geladenen Stromes, der die Kopplung von Quarks an die geladenen Eichbosonen  $W^\pm$  beschreibt. Bei dieser Kopplung erfordert die Erhaltung der elektrischen Ladung eine Kopplung unterschiedlicher Quarks aneinander. Der Anteil des schwachen geladenen Stromes an der Lagrangedichte  $\mathcal{L}(f, E)$  kann mit den Masseneigenzuständen wie folgt geschrieben werden:

$$J_\mu^{CC} = -\frac{g}{\sqrt{2}}(u_L^*, c_L^*, t_L^*)\gamma^\mu V_{CKM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

Dabei ist  $g$  die Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung.  $V_{CKM} = U_L' U_L^\dagger$  ist die Quark-Mischungs-Matrix, die die Kopplung unterschiedlicher Quarks aneinander beschreibt.  $V_{CKM}$  wurde von M. Kobayashi und T. Maskawa eingeführt [kob73].

N. Cabibbo hatte vor der Entdeckung der dritten Quark-Generation eine Theorie zu den Zerfällen seltsamer Teilchen entwickelt. In seiner Theorie wird die Quark-Mischung für zwei Generationen durch eine  $2 \times 2$ -Matrix beschrieben, deren einziger freier Parameter der Cabibbo-Winkel  $\theta_{Cabibbo}$  ist. Die Kobayashi-Maskawa-Matrix läßt sich als Erweiterung der Cabibbo-Matrix auf drei Quark-Generationen verstehen. Deshalb wird die Quark-Mischungs-Matrix als Cabibbo-Kobayashi-Maskawa- (CKM)-Matrix bezeichnet.

### 1.2.3 Die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix

Bei der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix handelt es sich um eine unitäre, komplexe  $3 \times 3$ -Matrix. Sie beschreibt für drei Quark-Familien Übergänge zwischen den Quarks unter schwacher Wechselwirkung bei geladenen Strömen:

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}. \quad (1.14)$$

Eine komplexe  $3 \times 3$ -Matrix besitzt zunächst 18 Parameter. Aufgrund der Unitarität beschränkt sich die Zahl der unabhängigen Parameter auf neun. Durch geeignete Phasenkonventionen in den Wellenfunktionen der sechs Quarks können fünf Phasen eliminiert werden. Damit reduziert sich die Zahl der unabhängigen Parameter der CKM-Matrix auf vier.

Eine Entwicklung der Matrix nach  $\lambda = \sin \theta_{Cabibbo}$  von Wolfenstein [wol83] führte zu einer Darstellung mit drei reellen Parametern  $\lambda, \rho$ , und  $A$ , sowie einer imaginären Phase  $i\eta$ :

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & \lambda^3 A(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1 - \rho - i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4). \quad (1.15)$$

Man kann zeigen, daß der Term  $\mathcal{L}(f, E)$  in Gl. 1.6 und damit die Lagrangedichte nur dann invariant unter der Transformation  $CP$  ist, wenn die imaginäre Phase verschwindet [jar88].

$CP$ -Verletzung ist im Standardmodell also gleichbedeutend mit einer nichtverschwindenden imaginären Phase der CKM-Matrix,  $\eta \neq 0$  in der Wolfenstein-Parametrisierung. Die Parameter der CKM-Matrix gehören zu den freien Parametern des Standardmodells, können also nicht vorhergesagt werden und müssen experimentell bestimmt werden. Die Bestimmung der Phase  $\eta$  ist ein wesentliches Ziel des Experimentes HERA - B.

### 1.2.4 Ein Unitaritätsdreieck

Unitarität der Matrix bedeutet, daß das Produkt der transponierten und der konjugiert komplexen Matrix gleich der Einheitsmatrix ist:

$$V^t V^* = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{cd} & V_{td} \\ V_{us} & V_{cs} & V_{ts} \\ V_{ub} & V_{cb} & V_{tb} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{us}^* & V_{ub}^* \\ V_{cd}^* & V_{cs}^* & V_{cb}^* \\ V_{td}^* & V_{ts}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.16)$$

Diese Bedingung läßt sich komponentenweise schreiben als

$$\sum_{i=u,c,t} V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk}. \quad (1.17)$$

Jede der sechs Bedingungen mit  $\delta_{jk} = 0$  fordert, daß eine Summe dreier komplexer Zahlen verschwinden muß und läßt sich damit als Dreieck in der komplexen Ebene darstellen. Diese sechs Dreiecke sind flächengleich. Eine der Bedingungen lautet:

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0 \quad (1.18)$$

Sie enthält  $V_{ub}$  und  $V_{td}$ , die beiden Matrixelemente, in denen  $\rho$  und  $\eta$  auftauchen. Ein wenig umgeformt unter Berücksichtigung von  $V_{cd} \approx -\lambda$  und  $V_{tb}^* \approx 1$  lautet diese Bedingung:

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{td} = \lambda V_{cb}. \quad (1.19)$$

Mit der Näherung  $V_{ud} = 1 - \frac{\lambda^2}{2} \approx 1$  und Division durch  $\lambda V_{cb}$  zur Normierung ergibt sich:

$$\frac{V_{ub}^*}{|\lambda V_{cb}|} + \frac{V_{td}}{|\lambda V_{cb}|} = 1. \quad (1.20)$$

Diese Bedingung lautet mit den Parametern aus Gl. 1.15

$$(\rho + i\eta) + (1 - \rho - i\eta) = 1 \quad (1.21)$$

und läßt sich als Dreieck in der  $\rho - \eta$ -Ebene darstellen (Abb. 1.1).

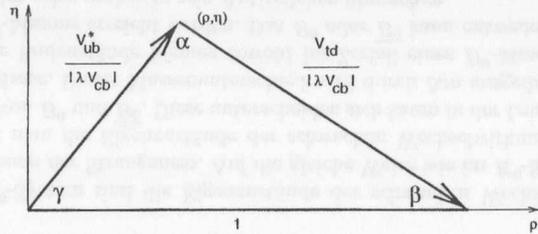


Abb. 1.1: Ein Unitaritätsdreieck der CKM-Matrix

In Abschnitt 1.2.3 wurde gesagt, daß  $CP$ -Verletzung gleichbedeutend ist mit  $\eta \neq 0$ .  $\eta$  gilt als Maß für die Stärke der  $CP$ -Verletzung. Die Fläche des Unitaritätsdreiecks ist proportional zu  $\eta$ . Damit ist die Fläche des Unitaritätsdreiecks ein Maß für die Stärke der  $CP$ -Verletzung. Hierin begründet sich ein großes Interesse, dieses Dreieck genau zu vermessen. Gl. 1.17 beschreibt sechs Unitaritätsdreiecke. Die folgenden Darstellungen sollen sich auf das eben erläuterte beschränken. Wenn also im folgenden von „dem Unitaritätsdreieck“ die Rede ist, ist immer dieses Dreieck gemeint.

Verschiedene Winkel und Seitenlängen des Dreiecks sind experimentell zugänglich. Durch die Normierung ist eine Seitenlänge des Dreiecks bereits festgelegt. Damit genügt nun die Messung zweier Parameter, um das Dreieck eindeutig zu bestimmen. Eine Überbestimmung des Dreiecks ist von Interesse, da dies ein Test des Standardmodells ist.

### 1.2.5 Vorhersagen des Standardmodells

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik ist bisher in dem Sinne erfolgreich als ihm keine experimentellen Beobachtungen entgegenstehen, es aber viele Beobachtungen richtig vorhersagt.

Für die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix macht das Standardmodell folgende einfache Aussagen, deren experimentelle Überprüfung einem Test des Standardmodells gleichkommt:

- Die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix hat eine komplexe Phase. Diese ermöglicht  $CP$ -Verletzung, falls  $\neq 0$ .
- Die Winkelsumme eines Unitaritätsdreiecks ist gleich  $\pi$ .

Obwohl das Unitaritätsdreieck noch nicht zufriedenstellend genau vermessen ist, gibt es bereits experimentelle Ergebnisse, die die Parameter  $\rho$  und  $\eta$  und damit die Lage der Spitze des Dreiecks einschränken. In folgenden werden einige dieser Ergebnisse kurz dargestellt. Die resultierenden Beschränkungen des Dreiecks sind in Abb. 1.2 eingezeichnet.

Die Seitenlänge  $V_{ub}/V_{cb}$  ist durch Messungen von  $V_{ub}$  und  $V_{cb}$  eingeschränkt.  $V_{ub}$  ist aus inklusiven Leptonenspektren in  $B$ -Zerfällen bestimmt (z.B. [bar93]) und  $V_{cb}$  aus der Rate von  $B \rightarrow D^* l \nu$ . Diese Messungen bestimmen zwei Halbkreise um  $(\rho, \eta) = (0, 0)$ , zwischen denen die Spitze des Dreiecks liegen muß. Aufgrund des Abbildungsmaßstabs erscheinen die Kreisbögen in Abb. 1.2 etwas verzerrt.

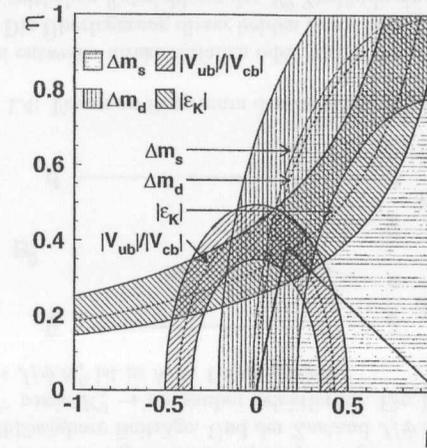


Abb. 1.2: Experimentell und theoretisch gefundene Einschränkungen für die Lage der Spitze des Unitaritätsdreiecks [mel98]. Erläuterungen dieser Einschränkungen und ihrer Aussage bezüglich der für HERA – B interessanten Größe  $\sin 2\beta$  im Text.

Die Messung des Mischungswinkels  $|\epsilon|$  zwischen den Eigenzuständen der Masse und denen der schwachen Wechselwirkung im  $K^0$ -System (siehe Gln. 1.4, 1.5) ergibt zwei verschobene Parabeln, zwischen denen die Spitze des Unitaritätsdreiecks liegen muß. Insbesondere wird  $\eta = 0$  durch diese Messung ausgeschlossen.

Die Massendifferenz  $\Delta M_d$  der  $B_d^0$ -Masseneigenzustände erlaubt eine indirekte Bestimmung der Seitenlänge  $V_{td}/V_{cb}$ , dargestellt durch zwei konzentrische Kreisbögen um  $(\rho, \eta) = (1, 0)$ .

Das Verhältnis  $\Delta M_s/\Delta M_d$  der Massendifferenzen der  $B_s^-$ - und  $B_d^-$ -Masseneigenzustände liefert eine strengere obere Grenze für  $V_{td}/V_{cb}$ , die durch den mittleren Kreisbogen um  $(\rho, \eta) = (1, 0)$  dargestellt ist.

Für den Parameter  $\sin 2\beta$ , der die HERA – B-Kollaboration insbesondere interessiert, wie in Abschnitt 1.3.2 dargelegt wird, ergibt sich aus diesen Einschränkungen der Wert  $0,75 \pm 0,09$  [mel98].

Mehrere Experimente wurden vorgeschlagen, um Zerfälle von  $B$ -Mesonen zu untersuchen. Für die Experimente BaBar am SLAC (USA) und Belle am KEK (Japan) werden asymmetrische  $e^+e^-$ -Speicherringe neu aufgebaut. Die HERA – B-Kollaboration will im Gegensatz dazu den Protonenstrahl des in Betrieb befindlichen  $ep$ -Speicherrings HERA bei DESY für ein spezialisiertes Experiment benutzen.

## 1.3 CP-Verletzung im B-System

### 1.3.1 Bedeutung der B-Zerfälle

Die Parameter der CKM-Matrix werden — ebenso wie die Quarkmassen — vom Standardmodell nicht vorhergesagt. Sie müssen experimentell bestimmt werden.

Nur das Element  $V_{ud}$  der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix kann aus Kernreaktionen bestimmt werden ( $V_{ud} = 0,9745$  bis  $0,9760$  [pdg98]). Für alle anderen Elemente benötigt man die schwereren Quarks der 2. und 3. Familie (vgl. Tab. 1.1). Insbesondere sind einige CKM-Matrixelemente aus B-Zerfällen bestimmbar. Dies betrifft nicht nur die Elemente  $V_{ub}$  und  $V_{cb}$ , an denen das b-Quark direkt beteiligt ist. Auch die t-Quark-Elemente  $V_{td}$  mit  $x = d, s, b$  sind über Zerfälle von B-Mesonen zugänglich, in denen virtuelle t-Quarks auftreten. Besonders interessant sind die Elemente  $V_{ub}$  und  $V_{td}$ , die als einzige die Parameter  $\rho$  und  $\eta$  enthalten. Dies sind die Koordinaten der Spitze des oben gezeigten Unitaritätsdreiecks und definieren somit die Fläche des Unitaritätsdreiecks, die Stärke der CP-Verletzung.

Seltene Zerfälle von B-Mesonen und Teilchen-Antiteilchen-Mischung entsprechen farbändernden neutralen Strömen. Diese sind im Standard-Modell auf Baumgraphenniveau nicht erlaubt. Die Übergänge erfordern Schleifen und müssen daher durch Feynman-Graphen höherer Ordnung dargestellt werden. Als Teilchen-Antiteilchen-Mischung bezeichnet man den Übergang eines neutralen Mesons in sein Antiteilchen:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ,  $D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0$ ,  $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$  und  $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$ . Auf die  $K^0 - \bar{K}^0$ -Mischung wurde in Abschnitt 1.1.3 bereits ausführlich eingegangen. Der Übergang  $B^0 - \bar{B}^0$  ist stellvertretend in Abb. 1.3 dargestellt. Die Mischung erfolgt durch den virtuellen Austausch von u-, c- und t-Quarks, wobei die t-Quarks dominieren. Dadurch tritt in diesem Graphen das Element  $v_{td}$  auf und ist durch eine Messung des Mischungsparameters  $x = \Delta m/\Gamma$  bestimmbar.

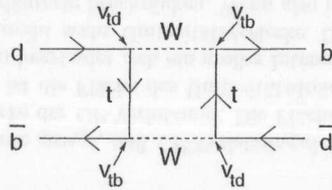


Abb. 1.3: Box-Diagramm der  $B^0 - \bar{B}^0$ -Mischung

Auch im  $B^0$ -System sind die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung nicht identisch mit denen der Strangeness. Auf die gleiche Weise wie im  $K^0$ -System (Gln. 1.2 und 1.3) erhält man die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung durch Linearkombinationen von  $B^0$  und  $\bar{B}^0$ . Diese unterscheiden sich kaum in der Lebensdauer, jedoch stärker in der Masse. Dieser Massenunterschied wird durch  $\Delta m$  ausgedrückt.

Verschiedene Endzustände können sowohl im Zerfall eines  $B^0$ -Mesons als auch im Zerfall eines  $\bar{B}^0$ -Mesons erreicht werden. Das  $B^0$  oder  $\bar{B}^0$  kann entweder direkt in diese Zustände zerfallen oder vorher in sein Antiteilchen übergehen.

Asymmetrien der Zerfallsraten solcher Zerfälle hängen direkt mit den Winkeln des Unitaritätsdreiecks zusammen. Die Messung einer solchen Asymmetrie erlaubt dann die

Tabelle 1.3: Zusammenhänge der Winkel des Unitaritätsdreiecks mit B-Zerfällen

Winkel	Bestimmung z.B. aus
$\alpha$	$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \pi\pi$
$\beta$	$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K_s^0$
$\gamma$	$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow D^0 K^-$

Bestimmung eines Winkels im Unitaritätsdreieck. Einige Beispiele sind in Tab. 1.3 zusammengestellt. Man definiert diese Asymmetrien wie folgt:

$$A = \frac{\Gamma(B \rightarrow X) - \Gamma(\bar{B} \rightarrow X)}{\Gamma(B \rightarrow X) + \Gamma(\bar{B} \rightarrow X)} \quad (1.22)$$

Betrachtet man Zerfälle in einen Endzustand  $X$ , der CP-Eigenzustand ist, so bedeutet eine Asymmetrie der Zerfallsraten eine Verletzung der CP-Invarianz.

Um diese Asymmetrien messen zu können, muß in jedem beobachteten Zerfall eindeutig bestimmbar sein, ob im Ausgangszustand ein  $B^0$ - oder ein  $\bar{B}^0$ -Meson vorhanden war. Die beiden Mesonen lassen sich anhand ihrer Produktion unterscheiden. b-Quarks können nicht alleine entstehen. Wegen der Erhaltung der Bottom-Quantenzahl können ein b und ein  $\bar{b}$  nur jeweils paarweise erzeugt werden. Wenn eines der beiden Quarks ein neutrales  $B_d$ -Meson bildet, läßt sich durch die Identifizierung des anderen B-Hadrons feststellen, ob ein  $B_d^0$ - oder ein  $\bar{B}_d^0$  erzeugt wurde. Diese Bestimmung bezeichnet man als Tagging.

### 1.3.2 Der „goldene“ Zerfallskanal

Besonders vielversprechend ist die Bestimmung des Winkels  $\beta$  aus dem Zerfall von  $B^0(\bar{B}^0)$ -Mesonen in den CP-Eigenzustand  $J/\psi K_s^0$ . Diagramme höherer Ordnung liefern hier nur vernachlässigbare Beiträge. Und der Zustand  $J/\psi K_s^0$  ist über die weiteren Zerfälle  $J/\psi \rightarrow l^+ l^-$  sowie  $K_s^0 \rightarrow \pi\pi$  sauber selektierbar. Ein Feynman-Diagramm für den Übergang  $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$  ist in Abb. 1.4 dargestellt.

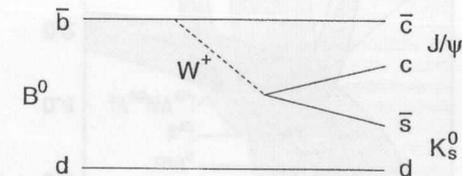


Abb. 1.4: Feynman-Diagramm des Zerfalles  $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$

Ein  $B^0(\bar{B}^0)$  kann entweder direkt zerfallen oder vorher durch Mischung in sein Antiteilchen übergehen. Die Überlagerung dieser beiden Zerfallsamplituden führt zu CP-Verletzung. Wegen der zeitlichen Entwicklung der  $B^0$ -Zustände sind auch die Zerfallsraten zeitabhängig. Man definiert deshalb zunächst eine zeitabhängige Asymmetrie der Zerfallsraten:

$$a_{CP}(t) = \frac{\frac{\partial \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)}{\partial t} - \frac{\partial \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)}{\partial t}}{\frac{\partial \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)}{\partial t}} \quad (1.23)$$

Eine Integration über die Flugzeitintervalle führt zu der zeitintegrierten Asymmetrie

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0) - \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)}{\Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0) + \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0)} \quad (1.24)$$

Die zeitintegrierte Asymmetrie ist in diesem Fall gegeben durch [loh94]

$$A_{CP} = \frac{x}{1+x^2} \sin(2\beta). \quad (1.25)$$

Dabei ist  $x$  der oben genannte Mischungsparameter und  $\beta$  der Winkel im Unitaritätsdreieck. Mit  $x = 0,72$  [pdg98] wird der Vorfaktor  $\frac{x}{1+x^2} = 0,47$ . Dies läßt mit  $0,28 \leq \sin 2\beta \leq 0,88$  [nir97] eine zeitintegriert meßbare Asymmetrie von  $13\% \leq A_{CP} \leq 41\%$  erwarten. Diese Asymmetrie ist viel größer als die im  $K^0$ -System, die durch den Mischungsparameter  $\epsilon'/\epsilon = 1,5 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$  beschrieben wird [loh92, pdg98].

Für die angestrebte Messung müssen also  $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ -Zerfälle und  $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ -Zerfälle identifiziert und gezählt werden. Alle Asymmetrien, die nicht von der  $CP$ -Verletzung herrühren, müssen bekannt sein und herausgerechnet werden. Dies können z.B. unterschiedliche Nachweis- oder Tagging-Wahrscheinlichkeiten für  $B^0$  und  $\bar{B}^0$  sein. Es werden  $B^0$ - und  $\bar{B}^0$ -Mesonen erzeugt. Zerfälle in den Zustand  $J/\psi K_s^0$  müssen identifiziert werden. Und für jeden identifizierten Zerfall muß durch Tagging bestimmt werden, ob ein  $B^0$  oder  $\bar{B}^0$  erzeugt wurde.

Die Zerfallskette  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$  mit einem Beispiel einer Tagging-Zerfallskaskade ist in Abb. 1.5 dargestellt. Die mittlere Zerfallslänge des  $B^0$ - und des  $K_s^0$  sind eingezeichnet.

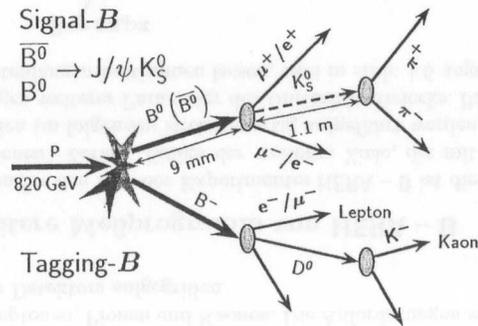


Abb. 1.5: Zerfall  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$  mit einem Beispiel für einen Tagging-Zerfallskanal. In diesem Fall liefert die Identifikation des  $B^-$  die Information, daß das neutrale Meson als  $B^0$  erzeugt wurde.

Für den Nachweis der Signal-Zerfallskette ist es zunächst nötig, Leptonen und Pionen identifizieren zu können. Außerdem muß ein  $J/\psi$ -Meson aus einem  $B^0$ -Zerfall von einem großen Untergrund direkt erzeugter  $J/\psi$ -Mesonen ( $pN \rightarrow J/\psi X$ ) unterschieden werden. Hier möchte man ausnutzen, daß die Zerfallslänge des  $B$ -Mesons groß gegen die des  $J/\psi$  ist, das  $J/\psi$ -Meson aus dem  $B^0$ -Zerfall also im Gegensatz zum direkt erzeugten  $J/\psi$  in einiger Entfernung vom Primärvertex erzeugt wird und zerfällt. Man verlangt, daß der Dileptonvertex einen Mindestabstand  $c \cdot t_0$  vom Primärvertex hat, der der Flugzeit  $t_0$  im Laborsystem entspricht. Durch diesen Schnitt verliert man jedoch auch Sensitivität bei der Messung der Asymmetrie. Die meßbare Asymmetrie verringert sich auf

$$A_{CP,t}(t_0) = f_t(t_0) A_{CP} \quad (1.26)$$

mit

$$f_t(t_0) = \frac{\sin(x, t_0) + \cos(x, t_0)}{1 + x^2}. \quad (1.27)$$

Der Einfluß dieses Schnittes auf die meßbare Asymmetrie ist gering, da die Mesonen bei kleinen Flugzeiten noch nicht gemischt haben.

Neben der Verringerung der meßbaren Asymmetrie verkleinert man durch diesen Schnitt auch die Anzahl der gemessenen Zerfälle. Durch die verminderte Statistik wird der Fehler der Asymmetriemessung größer:

$$\Delta A_{CP,t} = \frac{1}{f_t(t_0)} \frac{1}{\sqrt{N(t_0) + \bar{N}(t_0)}}. \quad (1.28)$$

Das zweite  $B$ -Hadron muß zum Tagging identifiziert werden. Dies ist z.B. über die Zerfälle  $b \rightarrow c l \nu$  (Lepton-Tag) oder  $B \rightarrow c X \rightarrow K X'$  (Kaon-Tag) möglich. Für den Kaon-Tag müssen im Experiment neben Leptonen und Pionen auch Kaonen eindeutig identifiziert werden. Wenn das  $B$ -Hadron, das zum Tagging verwendet wird, ein  $B^0$ -Meson ist, kann es natürlich auch durch Mischung in sein Antiteilchen übergehen, bevor es zerfällt. Dadurch kann die Ladung des Ausgangszustandes falsch bestimmt werden. Außerdem ist eine falsche Bestimmung durch Fehlidentifikation von Zerfallsprodukten oder Ambiguitäten der Signaturen möglich. Die Wahrscheinlichkeit  $e_T$  einer Mißidentifikation des Signal- $B$ -Mesons beeinträchtigt ebenfalls die Messung der  $CP$ -Asymmetrie. (Man spricht von *Dilution*.) Die insgesamt gemessene Asymmetrie ist dann

$$A_{CP,t,T}(t_0) = f_T f_t(t_0) A_{CP} \quad (1.29)$$

mit

$$f_T = (1 - 2e_T) \cdot \frac{1}{1 + x^2}. \quad (1.30)$$

Fehlerhaftes Tagging vergrößert natürlich auch den Fehler der Asymmetriemessung. Der Gesamtfehler wird:

$$\Delta A_{CP,t,T} = \frac{1}{f_T f_t(t_0)} \frac{1}{\sqrt{N(t_0) + \bar{N}(t_0)}}. \quad (1.31)$$

Eine Forderung für die Obergrenze des Fehlers führt nun zu einer Mindestanzahl von Signal-Zerfällen. Verlangt man  $\Delta \sin 2\beta \approx 0,1$ , um einen ähnlich kleinen Fehler zu

erreichen, wie bei der indirekten Bestimmung von  $\sin 2\beta$  ([mel98], siehe Abschnitt 1.2.5), so werden  $\mathcal{O}(1000)$  vollständig identifizierte Signalzerfälle benötigt [loh94].

Die angestrebte Messung stellt also hohe experimentelle Anforderungen zur Erzeugung einer ausreichenden Anzahl von  $B$ -Mesonen, zur Bestimmung der Vertices und zur Identifikation von Leptonen, Pionen und Kaonen. Die Anforderungen werden in Kapitel 2 für den Entwurf des Detektors aufgegriffen.

### 1.3.3 Das weitere Meßprogramm von HERA - B

Die Hauptmotivation für den Bau des Experimentes HERA - B ist die Messung der  $CP$ -Verletzung im „goldenen“ Zerfall. Einige der weiteren Ziele, die mit dem Experiment verfolgt werden, sollen im folgenden stichwortartig aufgeführt werden. Zu diesen Zielen gehören die Messungen weiterer Parameter des Unitaritätsdreiecks. Prozesse, aus denen sich Winkel und Seitenlängen bestimmen lassen, sind in Abb. 1.6 angeben.

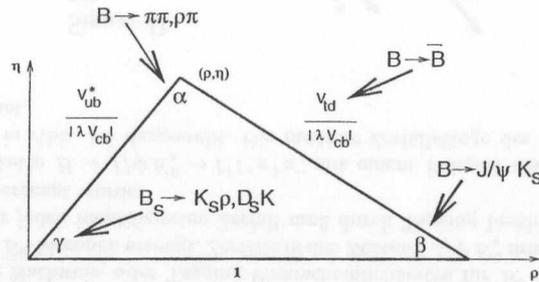


Abb. 1.6: Prozesse, aus denen sich Winkel und Seitenlängen bestimmen lassen (nach [loh94]).

Der Winkel  $\beta$  läßt sich zwar besonders gut aus dem „goldenen“ Zerfallskanal bestimmen. Jedoch gibt es auch weitere Zerfälle, aus denen  $\beta$  bestimmbar ist:

- $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$ ,
- $B^0 \rightarrow \psi' K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- l^+ l^- \pi^+ \pi^-$ ,
- $B^0 \rightarrow \chi_c K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$ .

Weitere Tests des Standardmodells sollen erfolgen, indem

- neben der  $B_d^0$ -Mischung auch die  $B_s^0$ -Mischung untersucht wird,
- $V_{cb}$ ,  $V_{ub}$ ,  $V_{td}$  und  $V_{ts}$  in leptonischen  $B$ -Zerfällen untersucht werden
- und nach seltenen  $B$ -Zerfällen sowie exotischen  $B$ -Zuständen gesucht wird.

Schließlich sind auch Messungen zur Quantenchromodynamik geplant, z.B.:

- Untersuchung der Zerfälle von  $B$ -Mesonen und  $B$ -Baryonen,

- Lebensdauermessungen von  $B$ -Mesonen und  $B$ -Baryonen,
- Untersuchung von Modellen hadronischer Zerfälle
- und Untersuchungen zur QCD-Produktion schwerer Quarks.

## Kapitel 2

### Das Experiment HERA – B

#### 2.1 Überblick

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg werden an der Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA (Abb. 2.1) die Experimente H1 und ZEUS seit 1992 und das Experiment HERMES seit 1995 betrieben. HERA – B wird z.Zt. als viertes Experiment in diese Anlage eingebaut.

Bei HERA – B werden hochenergetische Protonen aus dem Speicherring mit ruhenden Nukleonen in Drähten, die in den Randbereich des Strahls eingebracht werden, zur Wechselwirkung gebracht. Dabei werden  $B$ -Hadronen erzeugt, deren Zerfälle analysiert werden sollen. Der Aufbau des Detektors ist maßgeblich durch die Pläne zur Messung der  $CP$ -Verletzung im Zerfallskanal  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$  bestimmt. Das Erkennen dieses Kanals, das *Tagging* (die Identifizierung des zweiten  $B$ -Hadrons) sowie die Messung der  $CP$ -Asymmetrie stellen folgende wesentliche Anforderungen an den Detektor:

- Erzeugung und Verarbeitung einer hohen Wechselwirkungsrate,
- Bestimmung des Sekundärvertex vom Zerfall des  $B$ -Mesons zur Unterscheidung von direkt erzeugten  $J/\psi$ -Mesonen,
- Erkennung und Trennung von durchschnittlich etwa 200 Spuren pro Ereignis,
- Identifizierung und Impulsbestimmung der Leptonen aus dem  $J/\psi$ -Zerfall,
- Identifizierung der Pionen aus dem  $K_s^0$ -Zerfall,
- Pion-Kaon-Separation für das *Tagging*.

Der Detektor ist als sogenanntes Vorwärts-Spektrometer ausgelegt. Der Schwerpunkt des wechselwirkenden Systems bewegt sich relativistisch in Strahlrichtung. Der Großteil des Raumwinkels im Ruhesystem der Wechselwirkung kann dann durch einen Detektor abgedeckt werden, der im Laborsystem etwa kegelförmig aufgebaut ist. In der Extremvorwärtsrichtung kann ein kleiner Winkelbereich wegen des Strahlrohres nicht abgedeckt werden. Am äußersten Rand des Detektors wird ebenfalls ein kleiner Teil des Raumwinkels nicht vom Detektor erfaßt.

Die einzelnen Komponenten des Detektors (Abb. 2.3) lassen sich in Systeme zur Suche von Spuren und Systeme zur Identifizierung von Teilchen einteilen. Nach einer kurzen Darstellung des Speicherringes und der Erzeugung der  $B$ -Mesonen sollen die Detektorkomponenten in diesen Zusammenstellungen erläutert werden.

#### 2.2 Der HERA-Protonenspeicherring

In HERA werden Protonen mit einer Energie von 920 GeV in Bündeln gespeichert, die sich in Abständen von 96 ns oder ganzzahligen Vielfachen von 96 ns um den Ring bewegen. Es wird angestrebt, die Energie der Protonen auf bis zu 1 TeV zu erhöhen.

Die Protonen durchlaufen eine Kette von Vorbeschleunigern (Abb. 2.1), bevor sie in HERA auf ihre Endenergie beschleunigt werden [des99, spr96]. Negativ geladene Wasserstoffionen werden im Linearbeschleuniger LINAC III auf eine Energie von 50 MeV gebracht. Dann werden die Elektronen abgestreift und die freien Protonen in das Synchrotron DESY III injiziert.

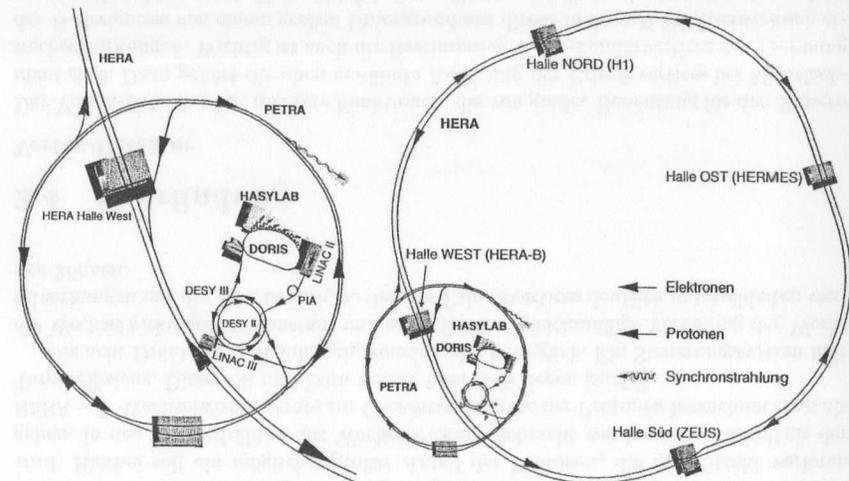


Abb. 2.1: Übersicht über die Beschleunigeranlagen bei DESY. Rechts eine Gesamtübersicht und links eine Ausschnittvergrößerung.

DESY III ist ein kreisförmiger Beschleuniger. Teilchen auf einer geschlossenen Bahn können wegen  $\oint \vec{E} d\vec{z} = 0$  nicht mit konstanten elektrischen Feldern beschleunigt werden. Man verwendet deshalb sinusförmig modulierte Felder. Das führt dazu, daß Teilchen sich nur mit der richtigen Phasenlage zum Beschleunigungsfeld durch den Ring bewegen können. Teilchen mit kleinen Abweichungen von der Idealphase führen stabile Schwingungen um diese aus, sogenannte Synchrotronoschwingungen ([edw93], S.30ff). In jedem Schwingungszyklus des Beschleunigungsfeldes gibt es einen Phasenbereich, in dem eine stabile Bewegung möglich ist, ein sogenanntes *Bucket*. Die Protonen können sich nur in diesen Buckets durch den Beschleuniger bewegen und treten deshalb in Bündeln (englisch: *Bunches*) auf.

In DESY III, einem Synchrotron mit einer Beschleunigungsfrequenz von 10,417 MHz und einem Umfang von 317 m, werden elf Protonenbündel mit zeitlichen Abständen von  $1/(10,417 \text{ MHz}) = 96 \text{ ns}$  gebildet und auf 7,5 GeV beschleunigt. Dann werden Züge von jeweils zehn Bündeln in den Speicherring PETRA übertragen. In PETRA werden sechs

dieser Züge gesammelt. Diese 60 Bündel werden auf 40 GeV beschleunigt und in HERA injiziert.

Der Vorgang wird dreimal wiederholt, so daß eine HERA-Füllung aus 18 Zügen mit jeweils zehn Protonenbündeln besteht. Der Abstand zwischen den Protonenbündeln innerhalb eines Zuges ist 96 ns; die Abstände zwischen den Zügen sind ganzzahlige Vielfache von 96 ns. Der HERA-Ring hat einen Umfang von 6336 m; die Umlaufzeit eines Protons beträgt 21,12  $\mu$ s. Der Beschleuniger könnte damit 220 Protonenbündel fassen. Die Begrenzung auf 180 Bündel ist durch das Injektionsverfahren gegeben. Für HERA – B ergibt sich daraus, daß Wechselwirkungen nicht zu beliebigen Zeitpunkten stattfinden können, sondern nur, wenn ein Protonenbündel die Zieldrähte passiert.

## 2.3 Produktion der $B$ -Mesonen

Die  $B$ -Mesonen für HERA – B werden in inelastischen Reaktionen der 920-GeV-Protonen mit ruhenden Nukleonen erzeugt.

Für die Messung der CP-Verletzung sollen pro Jahr  $\mathcal{O}(1000)$  „goldene“ Ereignisse mit dem Zerfall  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$  aufgezeichnet und vollständig rekonstruiert werden (inklusive Tagging), um  $\Delta \sin(2\beta) \approx 0,1$  zu erreichen. Mit den in Tab. 2.1 angegebenen Faktoren und einer angenommenen Betriebszeit von  $\mathcal{O}(10^7)$ s ergibt sich die Notwendigkeit einer mittleren Wechselwirkungsrate von 40 MHz, um die geforderte Anzahl rekonstruierter Ereignisse zu erreichen.

Tabelle 2.1: Verhältnis der Anzahl rekonstruierter „goldener“ Zerfälle zur Gesamtzahl der Ereignisse (Faktoren aus [loh94])

Gesamte Ereignisse	Betriebszeit · Wechselwirkungsrate
$\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{inel.}$	$\approx 10^{-6}$
$P(b \rightarrow B_d^0) + P(\bar{b} \rightarrow B_d^0)$	0,8
BR ( $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+ l^- \pi^+ \pi^-$ )	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Trigger- und Rekonstruktionseffizienz	0,15
Rekonstruierte „goldene“ Ereignisse	$\mathcal{O}(1000)$

Alle 96 ns kann ein HERA-Protonenbündel HERA – B passieren. Da aus technischen Gründen nur 180/220 der Plätze besetzt sind, liegt die effektive Frequenz bei 8,5 MHz. Um die erforderliche Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu erreichen, müssen also im Mittel 4,7 Wechselwirkungen pro Protonenbündel erzeugt werden, deren Vertices deutlich voneinander unterschieden werden können. Als zusätzliche Anforderung ergibt sich, daß der Betrieb der übrigen HERA-Experimente nicht wesentlich gestört werden darf.

Die Lösung, die diesen Anforderungen gerecht wird, besteht darin, daß mehrere Drähte, als *Target* (englisch: Zielmaterial) bezeichnet, in den Randbereich des Protonenstrahls eingebracht werden. In zwei Stationen werden jeweils Drähte von oben, unten und beiden Seiten an den Strahl herangefahren (Abb. 2.2). Es handelt sich hierbei um Bänder aus Kupfer, Aluminium oder Kohlefasern mit einer Ausdehnung von 500  $\mu$ m in Strahlrichtung und 50  $\mu$ m transversal.

Die Drähte sind Teil des Kollimatorsystems von HERA. Das Kollimatorsystem dient dazu, Protonen, deren Betatron-Schwingungsamplitude derart anwächst, daß sie an den

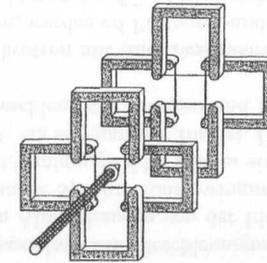


Abb. 2.2: Anordnung der Zieldrähte und ihrer Halterungen (schematisch). Acht Drähte in zwei Stationen können unabhängig voneinander bewegt werden.

Rand des Phasenraumbereiches stabiler Bewegungen geraten, kontrolliert abzufangen, so daß die Strahlenbelastung der Umgebung, insbesondere der Experimente minimiert wird. Hierbei soll ein möglichst großer Anteil der Protonen, die dem Strahl verloren gehen, in den Targetdrähten zur Wechselwirkung gebracht werden. Das Verhältnis der HERA – B-Wechselwirkungsrate zur Gesamtverlustrate der Protonen bezeichnet man als Targeteffizienz. Diese soll und kann immer über 50% liegen [spr96].

Die acht Drähte sind unabhängig voneinander beweglich. Ein Steuerungssystem hält die Wechselwirkungsrate konstant und sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Wechselwirkungen auf die acht Drähte, so daß die Primärvertices deutlich unterschieden werden können.

## 2.4 Spurfindung

### Vertex-Detektor

Der Vertex-Detektor hat mehrere Funktionen, die von großer Bedeutung für das Experiment sind. Dazu gehört die oben erwähnte Auflösung der Primärvertices bei Mehrfachwechselwirkungen. Wichtig ist auch die Bestimmung von Sekundärvertices zur Trennung der  $B$ -Ereignisse von einem großen Untergrund aus direkt in der  $pN$ -Wechselwirkung erzeugten  $J/\psi$ -Mesonen ( $pN \rightarrow J/\psi X$ ). Diese Trennung soll durch einen Schnitt auf die Zerfallslänge erfolgen. Eine mittlere Zerfallslänge der  $B_d^0$ -Mesonen von  $\bar{l} = 9$  mm erfordert in Strahlrichtung ( $z$ -Richtung, siehe Abb. 2.4) eine Auflösung, die signifikant besser ist als 9 mm. Mit einem Streifenabstand von  $\approx 50$   $\mu$ m erreicht man eine Auflösung von  $\leq 500$   $\mu$ m [wan99]. Als weitere Anforderung an den Vertex-Detektor soll eine eigenständige, dreidimensionale Spurfindung möglich sein, wie in [rie97] ausführlich begründet ist.

Der Vertex-Detektor wird aus 112 jeweils 5 cm · 7 cm großen Silizium-Streifen-Zählern mit einem Streifenabstand von 25  $\mu$ m aufgebaut. Die Zähler sind in sieben sogenannten Superlagen angeordnet. Jede Superlage besteht aus vier hintereinanderliegenden Ebenen, die mit Stereowinkeln von  $-2,5^\circ$ ,  $+2,5^\circ$ ,  $87,5^\circ$  und  $92,5^\circ$  gegeneinander verdreht sind. Jede Lage besteht aus vier rechteckigen Zählern, die zu einem Quadrat zusammengefügt werden, das in der Mitte ein Loch für den Protonenstrahl läßt.

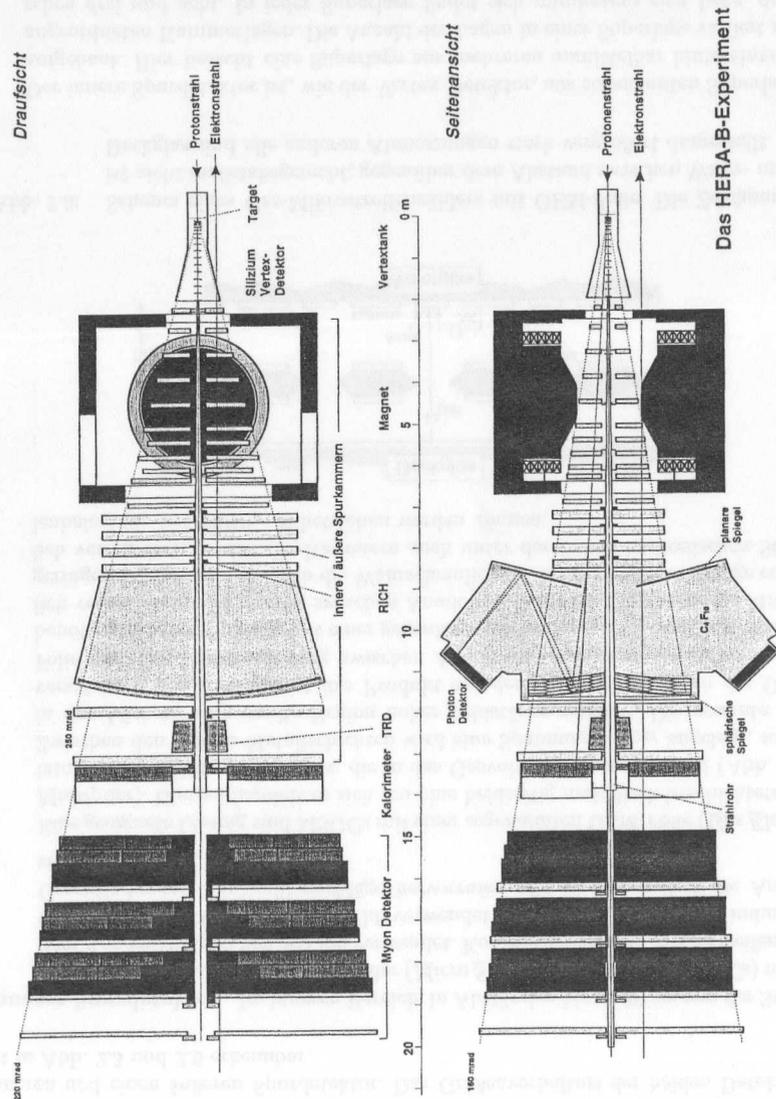


Abb. 2.3: Schnittzeichnungen des Detektors (Seitenansicht und Draufsicht)

Der Vertex-Detektor ist — gemeinsam mit den Targetdrähten — in einem kegelförmigen Tank angeordnet, der an das im Protonenbeschleuniger herrschende Vakuum angebunden ist (Abb. 2.3).

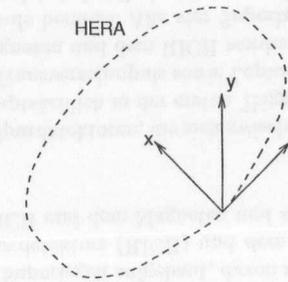


Abb. 2.4: Das HERA – B -Koordinatensystem. Die x-Achse zeigt innerhalb der Ringebene auf das Zentrum von HERA. Die z-Richtung ist durch die Flugrichtung des Protonenstrahles definiert. Und die y-Achse zeigt senkrecht zur xz-Ebene nach oben.

### Magnet

Zur Impulsbestimmung werden geladene Teilchen in einem magnetischen Dipolfeld abgelenkt. Der Magnet besteht aus zehn normalleitenden Spulen, von denen jeweils fünf unterhalb und oberhalb des Protonenstrahlrohres angeordnet sind (Abb. 2.3). Das Magnetfeld ist zylindersymmetrisch. Die Symmetrieachse kreuzt, 4,5 m vom Vertex entfernt, vertikal das Protonenstrahlrohr. Das Maximum der magnetischen Flußdichte beträgt 0,8 T. Das Wegintegral der Flußdichte für Teilchen, die das Magnetfeld in der Nähe der Strahlachse durchqueren, ist 2,126 Tm [tho96].

Das Dipolfeld ist entlang der y-Achse ausgerichtet (Abb. 2.4). Geladene Teilchen, die in z-Richtung fliegen, werden in  $\pm x$ -Richtung abgelenkt. Deshalb ist der Detektor breiter als hoch, wie in den Abbildungen 2.3, 2.6 und 2.7 zu erkennen ist.

Für den HERA-Protonenring ist der Detektormagnet in die Beschleunigeroptik einbezogen. Der Elektronenstrahl soll nicht beeinflusst werden. Um zu vermeiden, daß der Elektronenstrahl eine Impulsablenkung erfährt oder seine Polarisation, die für das Experiment HERMES wichtig ist, beeinträchtigt wird, ist eine spezielle Spule integriert, die innerhalb des Elektronenstrahlrohres ein Gegenfeld erzeugt.

Das Eisenjoch zur Rückführung der Flußlinien stellt für HERA – B eine Einschränkung für die Anordnung der Spurkammern und deren Ausleselektronik dar.

### Spurdetektoren

Zur Messung der Teilchenspuren im und hinter dem Magnetfeld werden Gasdetektoren verwendet. Abhängig von der Entfernung vom Strahlrohr finden zwei verschiedene Technologien Anwendung. Der Grund dafür liegt darin, daß die Belegungsdichte der Detektoren  $\sim 1/R^n$  ( $n \approx 1,5..2$ ) mit dem Abstand  $R$  vom Strahlrohr fällt. In der Nähe des

Strahlrohres ist also eine höhere Granularität des Detektors erforderlich, um eine größere Anzahl von Spuren voneinander getrennt zu erkennen. Außerdem erfordert die höhere Strahlenbelastung eine größere Strahlenhärte des Detektors. Man konstruiert also einen inneren und einen äußeren Spurdetektor. Das Größenverhältnis der beiden Detektoren ist in Abb. 2.3 und 2.6 erkennbar.

**Innerer Spurdetektor.** Im inneren Bereich, in Abständen bis zu 30 cm von der Strahlachse werden Gas-Mikrostreifenzähler (*Micro Strip Gas Chambers*, MSGCs) mit einem Anodenabstand von  $300 \mu\text{m}$  verwendet. Konventionelle Gas-Mikrostreifenzähler können bei HERA - B jedoch nicht verwendet werden, da hadronisch induzierte Gasentladungen Funkenüberschläge hervorrufen, die in kurzer Zeit die Anoden zerstören.

Eine geeignete Lösung sind MSGCs mit einer sogenannten GEM-Folie (*Gas Electron Multiplier*). Hierbei handelt es sich um eine beidseitig metallisch beschichtete Isolatorfolie mit einer Lochmatrix, die in das Gasvolumen gespannt wird (Abb. 2.5). Zwischen den beiden Metallschichten wird eine Spannung  $U_{GEM}$  angelegt, so daß in den Löchern eine zweite Region hoher Feldstärke entsteht. Die gesamte Gasverstärkung der Kammer ist das Produkt aus der Gasverstärkung an der GEM-Folie und der Gasverstärkung zwischen Anode und Kathode. Deshalb wird die benötigte Gasverstärkung mit einer gegenüber der konventionellen MSGC wesentlich verminderten Spannung zwischen Anode und Kathode  $U_{AK}$  erreicht. Mit der geringeren Spannung ist auch die Wahrscheinlichkeit für Funkenüberschläge erheblich vermindert, so daß die Kammern auch unter der hohen hadronischen Strahlenbelastung bei HERA - B betrieben werden können.

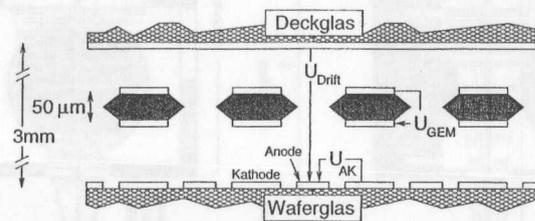


Abb. 2.5: Schema eines Gas-Mikrostreifenzählers mit GEM-Folie. Die Zeichnung ist nicht maßstabsgerecht; gegenüber dem Abstand zwischen Wafer- und Deckglas sind alle anderen Abmessungen stark vergrößert dargestellt.

Der innere Spurdetektor ist, wie der Vertex-Detektor, aus sogenannten Superlagen aufgebaut. Hier besteht eine Superlage aus mehreren unmittelbar hintereinander angeordneten Kammerlagen. Die Anzahl der Lagen in einer Superlage variiert zwischen drei und acht. In jeder Superlage findet sich mindestens eine Lage, deren Streifen senkrecht stehen, mindestens eine, die um  $+5^\circ$  und mindestens eine, die um  $-5^\circ$  gegen diese verdreht ist. Vier Superlagen befinden sich innerhalb des Magnetvolumens, ebenfalls vier Superlagen zwischen dem Magneten und dem RICH sowie zwei Superlagen zwischen dem RICH und dem Kalorimeter (vgl. Abb.2.3).

**Äußerer Spurdetektor.** In größeren Abständen von der Strahlachse werden Driftkammern mit einem sechseckigen Zellenquerschnitt verwendet, sogenannte Honigwaben-Driftkammern.

Eine Superlage der äußeren Spurkammern besteht, wie die der inneren Spurkammern, aus mehreren Kammerlagen, die in Stereowinkeln angeordnet sind, hier jedoch  $0$  und  $\pm 80$  mrad. Der Stereowinkel von  $80 \text{ mrad} \approx 4,5^\circ$  ist etwas kleiner als beim inneren Spurdetektor. Jede Lage des äußeren Spurdetektors ist in zwölf Sektoren unterteilt, um die Belegungsichte der Driftzellen auf 20% zu limitieren. Es werden Zellen mit Durchmessern von 5 mm und 10 mm eingesetzt. Die Aufteilung einer Lage in Sektoren verdeutlicht Abb. 2.6.

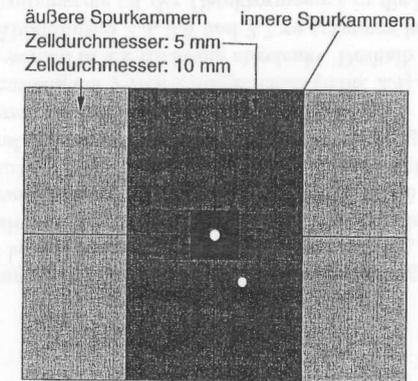


Abb. 2.6: Segmentierung der Spurkammern transversal zur Strahlrichtung (schematisch). Durch die beiden Löcher werden die HERA-Strahlrohre geführt.

Insgesamt werden 13 Superlagen aufgebaut, davon zwei zwischen dem großen Tank des Ringbild-Čerenkovdetektors (RICH) und dem Kalorimeter (siehe Abb. 2.3), vier zwischen dem RICH und dem Magneten und sieben innerhalb des Magnetvolumens.

Die Superlagen beider Spurdetektoren, die sich zwischen dem RICH und dem Kalorimeter befinden, werden hauptsächlich in der ersten Triggerstufe zur Suche nach Spuren von Hadronen mit hohem Transversalimpuls sowie Leptonen benötigt. Von den vier Superlagen zwischen dem Magneten und dem RICH werden die erste und die letzte ebenfalls in der ersten Triggerstufe benutzt. Alle vier Superlagen in diesem Bereich werden in höheren Triggerstufen und bei der Ereignisrekonstruktion verwendet, um mit Mustererkennungsmethoden alle Teilchenspuren zu suchen. Die Driftkammern und MSGCs innerhalb des Magneten werden zum einen verwendet, um Spuren durch das Magnetfeld zu verfolgen und so Spuren aus den übrigen Driftkammern mit Spuren aus dem Vertexdetektor zusammenzubringen. Die zweite Aufgabe dieser Kammern ist die Identifikation der  $K_s^0 \rightarrow \pi\pi$ -Zerfallsvertices, die außerhalb des Vertexdetektors liegen.

### „High- $p_T$ “-Kammern

Einige Ionisationskammern sind innerhalb des Magnetjoches dafür angeordnet, geladene Teilchen unter großen Streuwinkeln nachzuweisen, deren Spur im Magnetfeld einen großen Krümmungsradius aufweist. Große Krümmungsradien lassen auf einen großen Impuls schließen, große Streuwinkel zusätzlich auf einen großen Transversalimpuls  $p_T$ , dessen Träger mit hoher Wahrscheinlichkeit vom Zerfall schwerer Teilchen, z.B.  $B$ -Hadronen stammen können.

Die speziellen Kammern dienen nun dazu, Spurfindungsalgorithmen in der ersten Triggerstufe auszulösen und damit nicht nur nach Leptonen, sondern auch nach geladenen Teilchen mit großem Transversalimpuls zu suchen. Dies öffnet den Zugang zu hadronischen  $B$ -Zerfällen bereits in der ersten Triggerstufe.

## 2.5 Teilchenidentifikation

### Ringbild-Čerenkovdetektor

Ein Ringbild-Čerenkovdetektor (RICH) wird zur Separation von  $K$ - und  $\pi$ -Mesonen eingesetzt. Die Identifizierung der  $K$ -Mesonen ist für das *Tagging* notwendig. Da in hochenergetischen hadronischen Reaktionen zahlreiche  $\pi$ -Mesonen entstehen, müssen die  $K$ -Mesonen insbesondere von diesen separiert werden können.

Čerenkov-Strahlung wird dazu ausgenutzt, die Geschwindigkeit als zweite Meßgröße neben dem Impuls zu gewinnen, um aus diesen beiden Größen die Teilchenmasse zu bestimmen und so insbesondere  $K$ -Mesonen von  $\pi$ -Mesonen zu unterscheiden. Ist die Geschwindigkeit eines Teilchens beim Eintritt in ein Medium größer als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium, so emittiert es eine charakteristische elektromagnetische Strahlung in einen Kegel, dessen Öffnungswinkel von der Geschwindigkeit des Teilchens abhängt. Die Projektion dieses Kegels auf eine Beobachtungsebene senkrecht zur Flugrichtung ergibt einen Ring.

Im Experiment HERA – B befindet sich ein Tank, der mit dem Radiatorgas  $C_4F_{10}$  gefüllt ist. Die Čerenkov-Strahlung wird von sphärischen Spiegeln fokussiert und von planaren Spiegeln auf eine Anordnung von Vielkanal-Photomultipliern gelenkt, die außerhalb der geometrischen Akzeptanz des HERA – B -Detektors aufgebaut ist. (Der Strahlengang ist in Abb. 2.3 zu erkennen.) Auf diese Geometrie abgestimmte Suchalgorithmen erkennen die Kegelschnitte in den Signalen der Photomultiplier. Pionen und Kaonen sollen im Impulsbereich von  $\approx 3 - 50$  GeV/c sicher voneinander getrennt werden [bul97].

### Elektromagnetisches Kalorimeter

Das elektromagnetische Kalorimeter befindet sich hinter dem Spursystem (siehe Abb. 2.3). Es dient dazu, Elektronen aus dem  $J/\psi$ -Zerfall sowie aus semileptonischen  $B$ -Zerfällen zu identifizieren. Insbesondere müssen die Elektronen von  $\pi$ -Mesonen unterschieden werden. Elektron-Kandidaten werden als Startpunkte (Keime) für die Spurensuche in der ersten Triggerstufe verwendet (Elektron-Pretrigger, siehe Abschnitt 3.3.3).

Das Kalorimeter besteht aus Zellen in sogenannter Schaschlik-Bauweise. Eine Zelle besteht aus alternierenden Schichten aus Absorber- und Szintillatormaterial mit senkrecht durch die Schichten geführten Wellenlängenschiebern (Abb. 2.7a). Zellen dreier

verschiedener Größen finden Verwendung, da mit zunehmender Entfernung vom Strahlrohr eine geringere Granularität notwendig ist. Im inneren Teil werden  $2,2 \times 2,2$  cm<sup>2</sup> große Zellen mit Wolfram als Absorbermaterial verwendet. In einigen Zellen im äußeren Bereich des inneren Teils wurde eine Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung verwendet. Im mittleren Teil des Kalorimeters befinden sich  $6 \times 6$  cm<sup>2</sup> und im äußeren Teil  $11 \times 11$  cm<sup>2</sup> große Zellen jeweils mit Blei als Absorbermaterial. Die Unterteilung in inneren, mittleren und äußeren Teil ist in Abb. 2.7b) dargestellt.

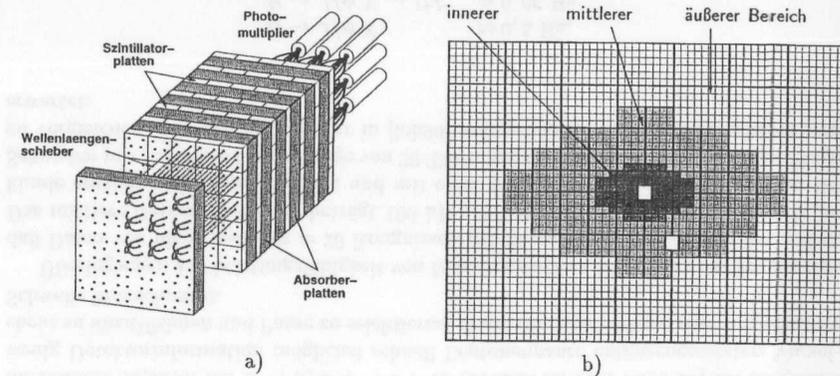


Abb. 2.7: a) Schematische Ansicht eines Schaschlik-Kalorimeter-Moduls  
b) Segmentierung des Kalorimeters transversal zur Strahlrichtung

Die Identifikation von Elektronen geschieht durch die Interpretation der Schauerform und durch Vergleich der Energiemessung mit der Impulsmessung des Spursystems. Die Energieauflösung des Kalorimeters wurde aus Monte-Carlo-Simulationen zu  $\sigma(E)/E = 9,5\%/\sqrt{E}$  für den mittleren Teil und  $\sigma(E)/E = 17\%/\sqrt{E}$  für den inneren Teil bestimmt [har95]. Die Ortsauflösung beträgt  $\sigma = 4,6 \text{ mm} + 16,0 \text{ mm}/\sqrt{E}$  außen,  $\sigma = 1,6 \text{ mm} + 7,3 \text{ mm}/\sqrt{E}$  in der Mitte und  $\sigma = 1,1 \text{ mm} + 3,4 \text{ mm}/\sqrt{E}$  innen [igo97].

### Übergangsstrahlungsdetektor

Zur Verbesserung der Elektron-Hadron-Separation in der Nähe des Strahlrohres wird ein Übergangsstrahlungsdetektor eingesetzt. Vier Blöcke mit jeweils 18 alternierenden Radiator- und Detektorschichten werden um das Strahlrohr angeordnet. Als Detektoren finden röhrenförmige Driftkammern Verwendung. Der relativ kleine Detektor ist in Abb. 2.3 zwischen dem RICH und dem Kalorimeter zu erkennen.

Bei einer Elektron-Hadron-Trennung von 15:1 werden 98% der Elektronen erkannt. Die Berücksichtigung des Übergangsstrahlungsdetektors in der ersten Triggerstufe könnte die Rate der Elektron-Spurkeime, die vom Kalorimeter an die erste Triggerstufe geliefert werden, um einen Faktor 3 reduzieren.

### Myonsystem

Myonen werden dadurch identifiziert, daß sie nur wenig mit Materie wechselwirken und deshalb dickere Absorberschichten durchdringen können als andere Teilchen. Das HERA - B -Myonsystem besteht aus drei, jeweils etwa 1 m dicken, Hadron-Absorbern aus Beton und Eisen, sowie aus vier Detektorlagen. Zwischen den Absorbern befindet sich jeweils eine Lage röhrenförmiger Proportionalkammern. Hinter dem dritten Absorber befinden sich zwei Lagen im Abstand von  $\approx 1$  m (siehe Abb. 2.3), in denen jeweils Platten (*Pads*) als Kathoden und Drähte als Anoden einander gegenüberstehen (Abb. 2.8). Sowohl *Pads* als auch Drähte liefern Signale und werden ausgelesen.

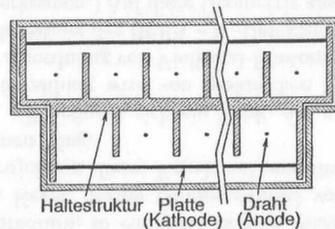


Abb. 2.8: Schnitt durch eine Myon-Pad-Kammer

Auch im Myonsystem nimmt die Granularität des Detektors mit zunehmender Entfernung vom Strahlrohr ab. Die Größe der *Pads* liegt zwischen  $6,5 \times 6,4 \text{ cm}^2$  und  $12,9 \times 13,0 \text{ cm}^2$ . Koinzidenzen von Treffern in hintereinanderliegenden *Pads* der dritten und vierten Detektorlage werden als Myon-Kandidaten interpretiert und bilden den Keim für die Spurensuche in der ersten Triggerstufe (Myon-Pretrigger, siehe Abschnitt 3.3.2). Die Signale der Anodendrähte geben präzisere Informationen über die Orte von Teilchendurchgängen. Diese werden für die Spurensuche in der ersten Triggerstufe verwendet (vgl. Abschn. 3.3.3).

## Kapitel 3

# Datennahme und Trigger

### 3.1 Anforderungen

In Abschnitt 2.3 wurde bereits das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis für das HERA - B -Experiment dargestellt (Tab. 2.1). Aus dieser Voraussetzung ergeben sich auch für das Datennahmesystem hohe Anforderungen: um die zur Messung der *CP*-Verletzung erforderliche Anzahl an *B*-Zerfällen innerhalb eines Jahres aufzeichnen zu können, müssen  $4 \cdot 10^7$  Wechselwirkungen pro Sekunde totzeitfrei analysiert werden.

Ein Teil der Datenselektion und der Analyse soll automatisch während des Experimentierbetriebes durchgeführt werden, um dadurch das Aufkommen an zu speichernden und später zu analysierenden Daten zu vermindern. Einen guten Ansatzpunkt liefert hier die saubere Signatur der  $B \rightarrow J/\psi X \rightarrow l^+ l^- X$ -Zerfälle. Es wird versucht, mit möglichst wenig Detektorinformation möglichst schnell Leptonenpaare entgegengesetzten Vorzeichens zu identifizieren und Paare zu selektieren, deren invariante Masse eine vordefinierte Schwelle überschreitet.

Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von Massenspeichern führten zu der Forderung, daß Daten von nicht mehr als  $\approx 20$  Ereignissen pro Sekunde gespeichert werden sollen. Das mittlere Datenaufkommen beträgt 100 kB pro Ereignis. Bei 20 Ereignissen pro Sekunde ergäben sich damit 2 MB/s und mit einer angenommenen Betriebszeit von  $10^7$  Sekunden pro Jahr eine Datenmenge von 20 TB/a [gel99]. Dies ist mit den Ereignisraten zu vergleichen, die man anhand der in [loh94] angegebenen Verzweungsverhältnissen erwartet:

$$\begin{aligned} B \rightarrow J/\psi X & \approx 0,5 \text{ Hz,} \\ B \rightarrow J/\psi X \rightarrow l^+ l^- & \approx 0,06 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

Eine Aufzeichnungsrate von 20 Hz liegt mehrere Größenordnungen über der erwarteten  $B \rightarrow J/\psi X$ -Rate, so daß prinzipiell alle derartigen Ereignisse aufgezeichnet werden können, sofern sie schnell genug identifiziert werden. Das Triggersystem soll die anfallende Ereignisrate um sechs Größenordnungen reduzieren und dabei eine möglichst hohe Effizienz für Ereignisse mit  $B \rightarrow J/\psi X$ -Zerfällen besitzen.

Das schnelle Kontrollsystem, das Gegenstand dieser Arbeit ist, ist ein wesentlicher Bestandteil des Datennahme- und Triggersystems. In diesem Kapitel werden zunächst die übrigen Komponenten des Gesamtsystems beschrieben und die Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem dargelegt. Die folgenden Kapitel werden dann dem schnellen Kontrollsystem gewidmet.

### 3.2 Trigger-Strategien

Das Hauptinteresse des Experimentes HERA – B besteht an Ereignissen mit dem Zerfallskanal  $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^-$ . Es wird ein mehrstufiges Triggersystem entwickelt, in dem diese Ereignisse mit hoher Effizienz vom Untergrund getrennt werden. Das System soll flexibel genug gehalten werden, auch auf andere  $B$ -Ereignisse fokussieren zu können.

Eine vollständige Analyse eines Ereignisses erfordert einen hohen Aufwand an Rechenleistung und -zeit. Deshalb werden Triggerstufen vorgeschaltet, die mit wenigen, schnell verfügbaren Meßsignalen eine Vorauswahl von Ereignissen treffen, die genauer zu analysieren sind. So entsteht ein mehrstufiges Triggersystem, in dem auf jeder Stufe mehr Informationen und, bei entsprechend verringerter Rate, mehr Rechenzeit pro Ereignis zur Verfügung stehen als auf der vorherigen.

#### Erste Stufe

Bereits in der ersten Triggerstufe sollen Kandidaten für  $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ -Zerfälle selektiert werden. Dafür müssen zunächst Leptonen identifiziert, ihre Trajektorien und daraus ihre Impulse bestimmt werden. Dann sollen Paare aus zwei Leptonen der gleichen Familie, aber entgegengesetzter Ladung kombiniert und ihre invariante Masse bestimmt werden.

Die erste Triggerstufe löst im Mittel bei jedem zweihundertsten Ereignis die Weitergabe an die zweite Stufe aus; die Trigger-Rate beträgt also im Mittel 50 kHz. Diese Rate war das Ergebnis eines Anpassungsprozesses der Eingangskapazität der zweiten Stufe und der Algorithmen der ersten Stufe. Die Eingangsraten sowie die Latenzzeiten der einzelnen Triggerstufen sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Übersicht über Eingangsraten und Latenzzeiten der einzelnen Triggerstufen. Die Eingangsraten werden hier im Text und die Latenzzeiten in den Abschnitten 3.3.3 bis 3.3.7 erläutert.

Triggerstufe	Eingangs-Ereignisrate	mittlere Latenzzeit
1	10 MHz	$<12,3 \mu\text{s}$
2	$\approx 50 \text{ kHz}$	$\approx 3 \text{ ms}$
3	$\approx 250 \text{ Hz}$	$\approx 200 \text{ ms}$
4	$\approx 50 \text{ Hz}$	$\approx 4 \text{ s}$

#### Zweite Stufe

Die Arbeit der zweiten Stufe ist in mehrere Schritte unterteilt. Zuerst werden die in der ersten Stufe gefundenen Spurkandidaten überprüft. Die erste Stufe verfügt vom äußeren Spurdetektor lediglich über die Information, welche Driftzellen getroffen wurden; die zweite Stufe erhält zusätzlich die Driftzeitmessung. Damit kann präziser festgestellt werden, ob die gefundenen Treffer auf einer Spur liegen. Sogenannte „Geister“, zufällige Koinzidenzen, die in der ersten Triggerstufe wie Spurkandidaten aussehen, werden erkannt und verworfen.

Im zweiten Schritt werden die von der ersten Triggerstufe erkannten Spuren durch die Spurrkammern innerhalb des Magnetfeldes verfolgt. Im dritten Schritt werden diese

Spuren durch den Vertex-Detektor weiterverfolgt. Damit können die Trajektorien von Lepton-Kandidaten bis zum Vertex zurückverfolgt werden, und es kann bereits hier festgestellt werden, ob ein  $J/\psi$ -Kandidat in einem Sekundärvertex zerfallen ist. Folglich wird bereits in der zweiten Triggerstufe ein Teil des Untergrundes von direkt erzeugten  $J/\psi$ -Mesonen ( $pN \rightarrow J/\psi X$ ) unterdrückt.

Die zweite Triggerstufe löst im Mittel bei jedem hundertsten Ereignis die Weitergabe der Daten aus, die Trigger-Rate beträgt im Mittel 500 Hz. Auch diese Rate wurde durch Anpassen der Reduktionsalgorithmen und der Eingangskapazität der folgenden Stufe erarbeitet.

#### Dritte und vierte Stufe

Die Reduktion von diesen 500 Hz auf die geforderten Ereignisrate von 20 Hz erfordert mindestens eine weitere Triggerstufe.

Nachdem ein Ereignis von der zweiten Triggerstufe akzeptiert wird, werden erstmalig alle Meßdaten, die zu diesem Ereignis gehören, zusammengebracht (sog. *Event building*). Der dritten Triggerstufe steht folglich im Gegensatz zu den beiden ersten Stufen das gesamte Ereignis zur Verfügung.

Algorithmen, die zu einer weiteren Reduktion der Ereignisrate führen, werden derzeit entwickelt. Ein Algorithmus ermöglicht eine schnelle, aber vollständige Spurrekonstruktion aus Meßdaten des Vertex-Detektors [scha98]. Mit den so gefundenen Spuren läßt sich nach Sekundärvertices suchen. Im Gegensatz zur zweiten Stufe, die die in der ersten Stufe gefundenen Lepton-Spurkandidaten in Richtung Vertex weiterverfolgt, wird in der dritten Stufe die gesamte Information des Vertexdetektors ausgenutzt. Damit können hier auch Sekundärvertices von hadronischen oder semileptonischen  $B$ -Zerfällen erkannt werden, die der zweiten Stufe unzugänglich sind.

In der vierten Stufe werden die Ereignisse vollständig rekonstruiert. Nach der Rekonstruktion ist eine Klassifizierung und eine weitere Selektion der Ereignisse möglich. Weitere Aufgaben der vierten Stufe sind die Überwachung von Daten, die die Kalibrierung des Detektors betreffen sowie die Übertragung der Daten zu einem zentralen Rechner zur Archivierung. Die Ausgangsrate der vierten Stufe soll bei etwa 20 Hz liegen.

### 3.3 Implementierung des Datennahmesystems

Eine frühe Idee, aus der das heute gültige Konzept des Datennahme- und Triggersystems entwickelt wurde, sah ein dreistufiges System vor, in dem jede Stufe Triggerprozessoren, Datenpuffer und eine Kontrolleinheit enthält. Das läßt sich in einer  $3 \times 3$ -Matrix darstellen [res95]. Die Abkürzungen L1, L2 und L3 (englisch *Level* = Stufe) bezeichnen die 1., 2. bzw. 3. Stufe.

L1 - Kontrolle	L1 - Trigger	L1 - Puffer
L2 - Kontrolle	L2 - Trigger	L2 - Puffer
L3 - Kontrolle	L3 - Trigger	L3 - Puffer

Dieses Konzept wurde zu der in Abb. 3.1 gezeigten Architektur weiterentwickelt. Die Puffer der ersten Stufe wurden mit der Ausleseelektronik zur detektorspezifischen

Front-End-Elektronik zusammengefaßt. In der zweiten und dritten Triggerstufe finden dieselben Rechner Verwendung. Um Datenübertragungen einzusparen, wird ein Prozessor der zweiten Triggerstufe in dem Fall, daß ein Ereignis akzeptiert wird, der dritten Triggerstufe zugeordnet und bearbeitet das selbe Ereignis weiter. Eine vierte Stufe ist angefügt worden, in der die Ereignisse vollständig rekonstruiert und so für die Massenspeicher aufbereitet werden, daß *Offline*-Computerprogramme die Ereignisse analysieren können, ohne bei jeder Analyse neu rekonstruieren zu müssen.

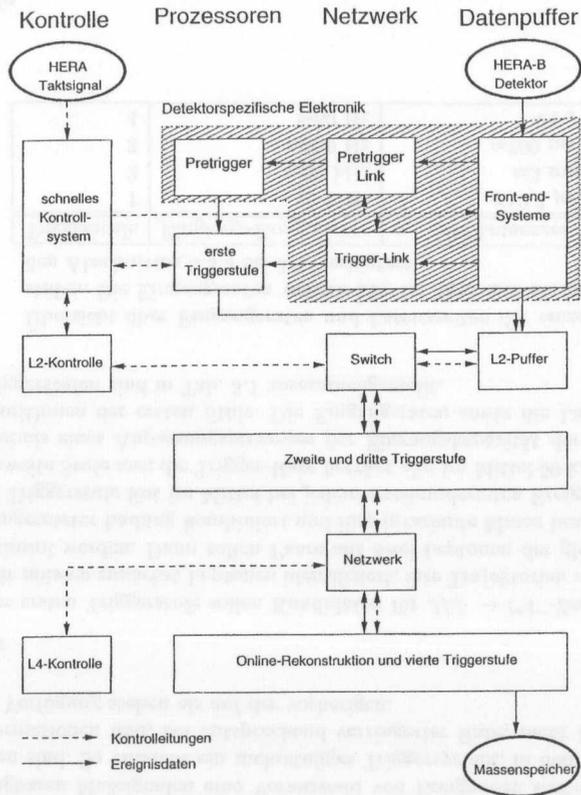


Abb. 3.1: Architektur des HERA-B-Datennahmesystems. Die Kürzel L2 und L4 stehen für die zweite und vierte Stufe des Systems. Alle Komponenten werden im Text erläutert.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten des Datennahme- und Triggersystems beschrieben. Die Beschreibung folgt dem Weg der Meßdaten von den Detektorkomponenten zum Massenspeicher. Das schnelle Kontrollsystem wird dabei zunächst ausgelassen. Im Anschluß an die Beschreibung des Datennahmesystems wird

auf die Anforderungen, die an das Kontrollsystem gestellt werden, in den folgenden Kapiteln auf das System selbst eingegangen.

### 3.3.1 Front-End-Elektronik

Mit *Front-End* bezeichnet man das „vordere Ende“ des Datennahmesystems. Der Begriff umfaßt all diejenige Elektronik, die Signale der Detektoren aufnimmt, digitalisiert, an die *Pretrigger*-Elektronik oder die erste Triggerstufe weiterleitet und zwischenspeichert, um sie gegebenenfalls an die zweite Triggerstufe weitergeben zu können. Auf dieser Stufe werden in verteilten Systemen Daten verarbeitet und gespeichert.

Um in der großen Zahl der erzeugten Wechselwirkungen (40 MHz) die wenigen Ereignissen mit *B*-Zerfällen nicht zu verpassen, ist eine totzeitfreie Auslese der Detektoren und Analyse der Messungen erforderlich. Deshalb muß sichergestellt sein, daß fortlaufend alle 96 ns eine Messung durchgeführt und die Daten zwischengespeichert werden, um der ersten Triggerstufe Zeit für die Entscheidung zu geben, welche Daten an die zweite Stufe gegeben werden (vgl. Tab. 3.1).

Die Meßdaten müssen auf den Front-End-Modulen länger als die Latenzzeit der ersten Triggerstufe zwischengespeichert werden. Gemeinsame Überlegungen zur maximalen Latenzzeit und zur Größe der Zwischenspeicher führten dazu, daß die Zwischenspeicher für 128 Ereignisse ausgelegt wurden. Damit ist die Maximale Latenzzeit der ersten Triggerstufe inklusive der Datenübertragung vom Detektor an die Prozessoren und der Rückmeldung an die Front-End-Module auf 128 Taktzyklen = 12,3  $\mu$ s festgelegt.

Bei HERA-B werden vier verschiedene Front-End-Systeme eingesetzt. Diese werden im folgenden dargestellt.

#### Vertex-Detektor und innere Spurrkammern

Für diese beiden Detektoren wird ein zweistufiges Front-End-System verwendet. Als erste Stufe sind HELIX-Chips, speziell für HERA-B entwickelte Auslesechips [feu96], direkt an den Zählern bzw. Kammern untergebracht. Diese Chips nehmen die im Detektor deponierten Ladungen auf und speichern sie in Kondensatoren zwischen. Die zweite Stufe bilden Module mit schnellen Analog-Digital-Wandlern, sogenannten FADCs (*Fast Analog-Digital-Converter*). Diese Module sind im Elektronik-Container, in einiger Entfernung vom Detektor, untergebracht (siehe Abb. 3.2).

Eine Front-End-Kontrolleinheit löst, nachdem sie ein Triggersignal bekommen hat, die Auslese der Meßsignale aus den HELIX-Chips aus. Dann werden die Meßsignale, die an die zweite Triggerstufe übertragen werden sollen, durch eine 50 m lange Glasfaserleitung an die FADC-Module übertragen. Diese digitalisieren die Signale und senden die Digitalisierungen an die Speicher der zweiten Triggerstufe. Das Triggersignal muß dafür an die HELIX-Chips und an die FADCs übertragen werden (Abb. 3.3).

Ein HELIX-Chip erhält jeweils Meßsignale von 128 Kanälen. Die Signale durchlaufen zunächst einen Eingangverstärker, einen Signalformer und einen Puffer (Abb. 3.4). Von einem Teil der inneren Spurrkammern müssen schnell Signale für die erste Triggerstufe zur Verfügung gestellt werden. Dafür werden die Meßsignale nach dem Puffer abgezweigt und in Komparatoren gegeben, die beim Überschreiten einer Schwelle Signale für die erste Triggerstufe erzeugen.

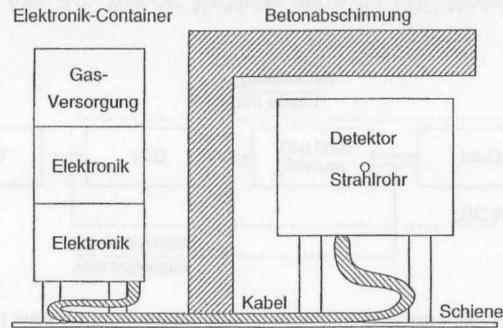


Abb. 3.2: Anordnung des Detektors und des Elektronik-Containers in der Experimentierhalle (Ansicht in Flugrichtung des Protonenstrahls). Sowohl der Detektor als auch der Elektronik-Container sind auf Schienen verschiebbar. Die Mobilität muß für die Kabellängen berücksichtigt werden.

Alle Meßsignale werden in eine sogenannte *Pipeline* gegeben. Das ist eine Kette von 141 Kondensatoren, im folgenden als Zellen bezeichnet, in denen die Ladungssignale zwischengespeichert werden (Abb. 3.4). Die Abweichung der Anzahl der Zellen von der eingangs genannten 128 wird weiter unten erklärt.

Aus der *Pipeline* werden nur die Signale derjenigen Ereignisse, die von der ersten Triggerstufe akzeptiert werden, wieder herausgelesen, um durch einen Multiplexer und einen optischen Sender an die FADC-Module übertragen zu werden. Eine Kontrolllogik, die in den HELIX-Chip integriert ist, adressiert die Zellen. In der Kontrolllogik werden mit Hilfe des HERA-Taktsignals Schreib- und Leseadressen erzeugt. Ein Schreibadressen-Zähler wird mit jedem Taktzyklus inkrementiert. Ein Zähler für die Erzeugung von Leseadressen läuft der Schreibadresse in konstantem Abstand hinterher. Erhält die Kontrolllogik ein Triggersignal, wird der aktuelle Stand dieses Zählers als Leseadresse verwendet.

Der Abstand zwischen zwei Triggersignalen kann kürzer sein als die Zeit, die zum Multiplexen der Signale benötigt wird. Deshalb müssen die Leseadressen zunächst vorge-merkt werden. Sie werden in ein sogenanntes Lese-Register geschrieben. *Pipeline*-Zellen, die zum Auslesen vorge-merkt sind, dürfen nicht überschrieben werden. Die Adressen, die im Lese-Register stehen, werden deshalb vom Schreibadressen-Zähler übersprungen. Auf diesem Weg können also Zellen für Schreibzugriffe blockiert werden. Damit trotzdem immer die Daten von 128 Ereignissen zwischengespeichert werden können, hat die *Pipeline* jeden Kanals 141 Zellen.

Wenn die Signale von den HELIX-Chips an den FADC-Modulen angekommen sind, werden sie dort digitalisiert und für das Übersenden an den L2-Puffer, den Datenpuffer der zweiten Triggerstufe, aufbereitet. Dafür muß den Daten, die im HELIX durch die Ankunftszeit des Triggersignales identifiziert wurden, eine Identifikationsnummer beigefügt werden, anhand derer die nachfolgenden Komponenten des Datennahmesystems die Daten zuordnen können. Die Front-End-Kontrolleinheit überträgt also den HERA-Takt und die Triggersignale an die HELIX-Chips, dieselben Signale und zusätzlich die Identifikationsnummern der akzeptierten Ereignisse an die FADC-Module (Abb. 3.3).

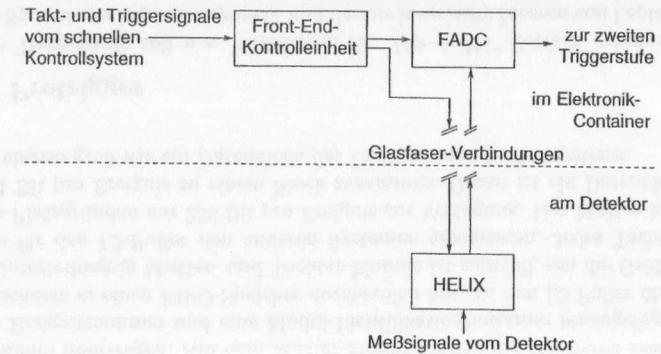


Abb. 3.3: Auslesesystem des Vertexdetektors und der inneren Spurkammern

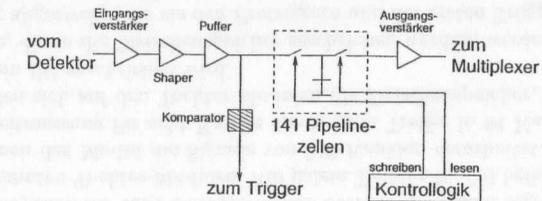


Abb. 3.4: Vereinfachte Schemazeichnung eines Kanals im HELIX-Chip

### Kalorimeter

Für das elektromagnetische Kalorimeter wurde ein eigenes Auslesesystem entwickelt [avo96]. Die gesamte Elektronik befindet sich im Elektronik-Container. Die analogen Ausgangssignale der Photomultiplier werden über Kabel von ca. 40 m Länge an die Ausleseelektronik übertragen.

Die komplette Ausleseelektronik ist für jeweils 32 Kanäle auf einem Modul untergebracht. Die Elektronik wird in vier Funktionsblöcke unterteilt: die Analog-Digital-Wandler mit Zwischenspeichern, eine Kontrolllogik für das Verarbeiten von Triggersignalen, eine Schnittstelle zum L2-Puffer und eine Schnittstelle zum VME-Bus.

In jedem HERA-Taktzyklus werden die Photomultiplier-Signale digitalisiert und der Digitalwert in einem Speicher mit wahlfreiem Zugriff und zwei getrennten Datenbussen (*Dual Ported Random Access Memory*, DPRAM) abgelegt. Für jeden Kanal stehen Speicher für 128 Meßwerte zur Verfügung. Das System benötigt mit jedem Taktzyklus die laufende Ereignis-Identifikationsnummer. Diese wird als Schreibadresse für den Speicher verwendet.

Mit einem Triggersignal muß die Identifikationsnummer des akzeptierten Ereignisses an dieses System übertragen werden. Diese dient als Leseadresse für den Zwischenspeicher. Die interne Kontrolllogik sorgt dafür, daß die entsprechenden Meßwerte aus dem Zwischenspeichern gelesen und an die Schnittstelle zum L2-Puffer gegeben werden. Hier

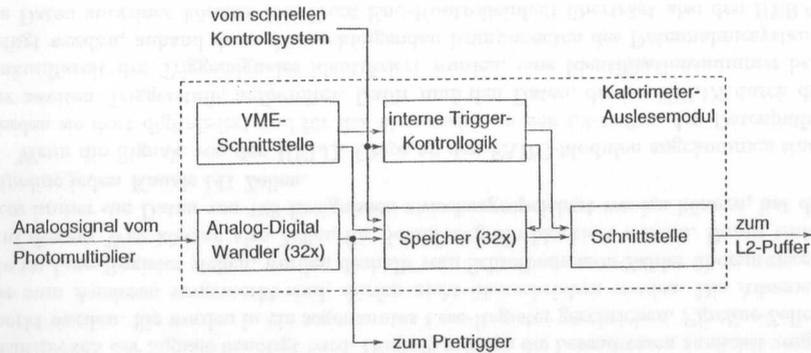


Abb. 3.5: Ausleseelektronik des elektromagnetischen Kalorimeters

werden die Ereignisnummer und eine Identifikationsnummer des Front-End-Elektronik-Moduls beigefügt, bevor die Daten an die zweite Triggerstufe übertragen werden.

Die Schnittstelle zum VME-Bus dient der Konfiguration und Überwachung der Module und hat im laufenden Meßbetrieb keinen Einfluß auf die Meßdaten.

### Äußere Spurkammern und Übergangsstrahlungsdetektor

Das Auslesesystem für die beiden Driftkammer-Detektoren ist zweistufig aufgebaut. Unmittelbar an den Kammern befinden sich Module mit analog-Chips vom Typ ASD8 (*Amplifier-Shaper-Discriminator*) die eine Verstärker-, Signalformer- und Diskriminatorschaltung enthalten. Seitlich an den Rahmen, die die Kammern tragen, befinden sich Module mit Zeit-Digital-Konvertern, im folgenden als TDC bezeichnet (von *Time-to-Digital-Converter*). Diese Module dienen dazu, Driftzeiten zu messen und in digitaler Form auszugeben, die Digitalwerte zwischenspeichern und ggf. an die zweite Triggerstufe zu senden (Abb. 3.6) [msc98]. Zur Erzeugung des Digitalwertes wird ein Zeitintervall von 100 ns in 256 Zählschritte unterteilt. Ein Zählschritt entspricht also 390 ps [wur96]. Auf einem Modul sind 16 TDC-Chips mit je acht Kanälen untergebracht.

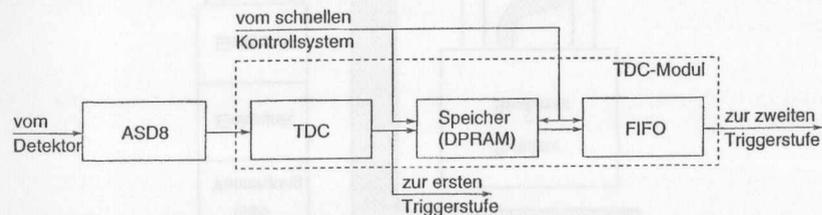


Abb. 3.6: Weg der Meßdaten durch ein TDC-Modul

Die digitalisierten Meßwerte werden, wie im Auslesesystem des Kalorimeters, in Speichern mit wahlfreiem Zugriff zwischengespeichert. Ebenso wie dort wird die jeweils aktuelle Ereignis-Identifikationsnummer als Schreibadresse verwendet, und mit einem Triggersignal muß die entsprechende Identifikationsnummer als Leseadresse geliefert werden.

Neben dem digitalen Driftzeit-Meßwert stellt der TDC-Chip auch eine Treffer-Information zur Verfügung, d.h. pro Kanal ein Bit, das angibt, ob die entsprechende Detektorzelle getroffen wurde. Bei einem Teil der äußeren Spurkammern ist diese Information notwendig, um sie der ersten Triggerstufe zur Verfügung zu stellen.

Nach einem Triggersignal werden die geforderten Meßdaten zusammen mit der Ereignisnummer und einer Modul-Identifikationsnummer in einen FIFO-Speicher (*First-In-First-Out*) übertragen und von dort aus an die Puffer der zweiten Triggerstufe gesendet. Das Senden der Meßdaten eines Ereignisses dauert 120 HERA-Taktzyklen. Deshalb ist der FIFO-Speicher erforderlich, um eine schnelle Folge von Triggersignalen zu ermöglichen. Der Speicher hat Platz für Daten von 16 Ereignissen.

### Ringbild-Čerenkovdetektor, „High- $p_T$ “- und Myon-Kammern

Für die übrigen drei Detektorsysteme wird ein gemeinsames Auslesesystem verwendet, das an das Driftkammer-Auslesesystem angelehnt ist. In diesen Systemen wird der TDC-Chip verwendet. Jedoch werden keine Driftzeiten gemessen, sondern nur die Treffer-Information des TDC-Chips verwendet.

Ein Auslesesystem für 1024 Detektorkanäle besteht aus einem sogenannten Mutter- und vier sogenannten Tochter-Modulen. Auf jedem Tochter-Modul befinden sich 4 TDC-Chips, mit denen das Modul die Signale von 256 Kanälen verarbeitet. (Derselbe Chip, der zur Driftzeitmessung für acht Kanäle dient, kann Treffer in 64 Kanälen ermitteln.) Weiterhin finden sich auf den Tochter-Modulen die Zwischenspeicher, in die pro Kanal und Ereignis ein Bit geschrieben wird.

Die Signale, die in die Zwischenspeicher geschrieben werden, werden gleichzeitig auf einen Ausgang abgezweigt, wo sie den *Pretriggern* und der ersten Triggerstufe nur einen HERA-Taktzyklus nach der Wechselwirkung zur Verfügung stehen.

Die Daten der Ereignisse, die an die zweite Triggerstufe geschickt werden sollen, werden zunächst auf den Tochter-Modulen aus den Zwischenspeichern gelesen und an das Mutter-Modul übertragen. Auf dem Mutter-Modul werden die Meßdaten zusammengefaßt, die Ereignisnummer und eine Modul-Identifikationsnummer hinzugefügt und der Block, nachdem er einen FIFO-Speicher durchlaufen hat, an den L2-Puffer übertragen.

Die Unterteilung in Mutter- und Tochter-Module ist sinnvoll, um die Größe der Datenblöcke für den L2-Puffer den anderen Systemen anzupassen. Jedes Tochter-Modul stellt aus Platzgründen nur 256 Bit pro Ereignis zur Verfügung. Das Mutter-Modul faßt also 1024 Bit pro Ereignis zu einem Block zusammen. Damit ist ein Datenblock dieses Systems ebenso groß wie ein Datenblock des Driftkammer-Auslesesystems.

### 3.3.2 Pretrigger

Die erste Triggerstufe soll u.a. Kandidaten für  $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ -Zerfälle erkennen, indem zunächst Spuren von Leptonen gesucht und daraus invariante Massen von Lepton-Paaren bestimmt werden. Ideen und Konzepte wurden bereits in verschiedenen Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen vorgestellt: [schu95, glä95, res96, ful97, ful97a].

Signale vom Myon-Detektor und vom elektromagnetischen Kalorimeter sollen als „Keime“ dienen, von denen ausgehend in Richtung Target nach Spuren gesucht wird (siehe Abb. 3.7). Sogenannte Pretrigger-Elektronik wird entwickelt, um anhand von charakteristischen Treffern die Spurensuche der ersten Triggerstufe zu starten. Als Keim für die Spurensuche wird eine Nachricht an einen Prozessor der ersten Triggerstufe gesendet. Diese Nachricht muß, neben den Koordinaten des Treffers und dem Teilchentyp, auch eine Ereignis-Identifikationsnummer enthalten, anhand derer die Trigger-Prozessoren die Meßsignale den Spurkandidaten zuordnen können.

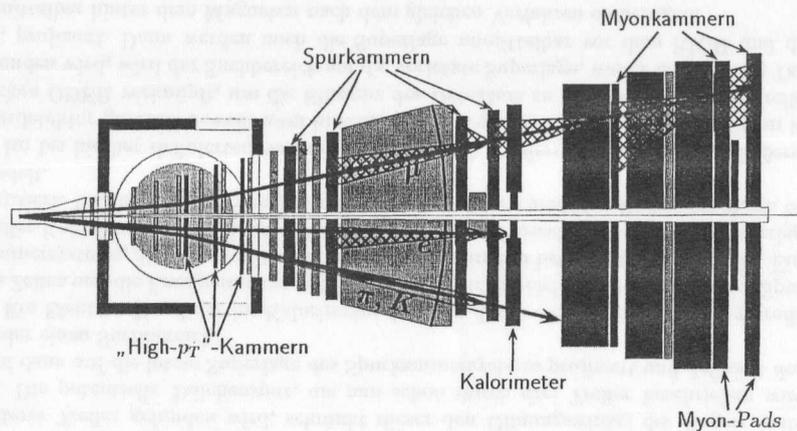


Abb. 3.7: Spurensuche in der ersten Triggerstufe. Schematische Darstellung in der Draufsicht.

### Elektron-Pretrigger

Elektron-Pretrigger-Module befinden sich im Elektronik-Container, in unmittelbarer Nähe der Front-End-Elektronik des Kalorimeters. Ein Front-End-Modul sendet ein Signal an ein Pretrigger-Modul, wenn die in einer einzelnen Kalorimeter-Zelle deponierte Energie einen Schwellenwert überschreitet.

Die Pretrigger-Module setzen dann die Meßwerte zu denen der benachbarten Zellen in Beziehung. Eine Energiedeposition kann über mehrere Zellen erstreckt sein. Wenn das Maximum einer Deposition in der mittleren der getroffenen Zellen liegt und die Gesamtenergie eine weitere Schwelle überschreitet, wird eine Nachricht an die Prozessoren der ersten Triggerstufe gesendet.

Ereignisse mit besonders vielen Primärwechselwirkungen und infolgedessen besonders vielen Teilchenspuren belasten die Triggerprozessoren besonders. Die Gesamtsumme der im Kalorimeter deponierten Energie ist ein Maß für die Anzahl der beteiligten Teilchen. Um die Trigger-Prozessoren in diesen Fällen zu entlasten, gibt es ein weiteres Elektronik-Modul, daß von allen Front-End-Modulen die Summe der registrierten Energie erhält und daraus die Gesamtsumme der im Kalorimeter deponierten Energie bestimmt. Wenn diese eine vordefinierte Schwelle überschreitet, wird ein Signal an alle Pretrigger-Module ge-

ben, damit zu diesem Ereignis keine Spurensuchen gestartet und die Trigger-Prozessoren von dieser Belastung freigehalten werden.

Z.Zt. wird untersucht, inwieweit dieses Modul verwendet werden kann, um aus der insgesamt im Kalorimeter deponierten Energie die Wechselwirkungsrate in den Target-Drähten zu bestimmen [sym98].

### Myon-Pretrigger

Ein Myon-Kandidat wird durch Koinzidenzen von Treffern in den Platten (vgl. Abb. 2.8) der letzten beiden Superlagen des Myon-Detektors definiert (siehe Abb. 3.8). Die Myon-Pretrigger-Elektronik besteht aus drei Komponenten. Sogenannte Pretrigger-Link-Module befinden sich in unmittelbarer Nähe der Front-End-Module. Sie dienen dazu, die Ausgangssignale der Front-End-Module für die optische Signalübertragung an die Pretrigger-Koinzidenz-Einheiten aufzubereiten. Die Pretrigger-Koinzidenz-Einheiten befinden sich im Elektronik-Container. Sie dienen dazu, die gesuchten Koinzidenzen zu erkennen und deren Koordinaten an eine dritte Art Module zu liefern, die die Nachrichten für die Prozessoren der ersten Triggerstufe generieren und senden.

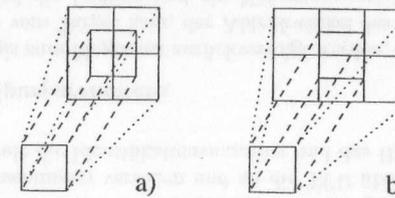


Abb. 3.8: Koinzidenz-Schema für den Myon-Pretrigger. Im inneren Bereich des Detektors a) ist eine Koinzidenz eines Feldes der dritten Detektorlage mit einem von vier Feldern der vierten Detektorlage gültig. Im äußeren Bereich b) dagegen eine Koinzidenz eines Feldes der dritten Detektorlage mit einem von sechs Feldern der vierten Detektorlage.

### „High- $p_T$ “-Pretrigger

Um neben den  $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ -Zerfällen den Zugang zu semileptonischen oder hadronischen  $B$ -Zerfällen zu ermöglichen, soll neben Spuren von Lepton-Kandidaten auch nach Spuren von Teilchen mit hohem Transversalimpuls gesucht werden. Um Keime für die Suche nach solchen Spuren zu finden, wird ein drittes Pretrigger-System entwickelt. Dieses benutzt die sogenannten „High- $p_T$ “-Kammern (vgl. Abschnitt 2.4), um aus deren Signalen Keime für die Spurensuche zu ermitteln.

Wie im Myon-System soll die Spurensuche durch Koinzidenzen von Treffern in hintereinander stehenden Kammern ausgelöst werden. Für die Kammern wird dieselbe Front-End-Elektronik verwendet, wie für den Myon-Detektor (siehe Abschnitt 3.3.1). Deshalb bietet es sich an, auch dieselbe Pretrigger-Elektronik zu verwenden, bestehend aus Pretrigger-Link-Modulen, Pretrigger-Koinzidenz-Einheiten und Nachrichten-Generatoren. Die Koinzidenz-Einheit muß jedoch der anderen Geometrie und dem ande-

ren Standort der Kammern angepaßt werden. Die Koordinaten der Koinzidenzen sollen auf die Ebene der letzten Spurkammern vor dem Kalorimeter projiziert werden (Abb. 3.7). Dann liegen, wie beim Elektron- oder beim Myon-Pretrigger, die Keime im hinteren Bereich des Detektors und die Spurkandidaten können in Richtung Target verfolgt werden.

### 3.3.3 Erste Triggerstufe

#### Suche nach Teilchenspuren

Für die Suche nach Teilchenspuren im Detektor wird ein Netzwerk aus spezialisierten Prozessoren aufgebaut, die einen durch Kalman-Filter [kal60, kal61] (zit. nach [glä95]) inspirierten Algorithmus ausführen. Ausgehend von den Spurkeimen, die von den Pretrigger-Systemen geliefert werden, soll iterativ in Richtung Target nach Treffern im inneren und äußeren Spursystem gesucht werden.

Die getroffene Platte in der vierten Lage des Myon-Detektors definiert einen Suchbereich in den Drähten derselben Lage (vgl. Abb. 2.8). Die getroffene Platte in der dritten Detektorlage definiert in deren Drähten ebenfalls einen Suchbereich. Die Koordinaten beider Treffer definieren eine Gerade (Spur-Kandidat). Ein Kegel um diese Gerade und die Annahme, daß ein Myon aus Richtung Target kam, definiert einen Suchbereich in der ersten Lage des Myon-Detektors (vgl. Abb. 3.7). Wenn in diesem Suchbereich ein weiterer Treffer gefunden wird, schränkt dieser den Öffnungswinkel des Kegels weiter ein. Die potentielle Teilchenspur, die nun schon durch drei Treffer beschrieben wird, wird dann auf die letzte Superlage des Spurkammersystems projiziert und definiert dort wieder einen Suchbereich.

Ein Elektron-Kandidat im Kalorimeter definiert durch die Koordinaten der getroffenen Zellen und die Energiemessung ebenfalls einen Suchbereich in der Superlage des Spurkammersystems, die sich unmittelbar vor dem Kalorimeter befindet (Abb. 2.3, 3.7). Eine Treffer-Koinzidenz in den „High- $p_T$ “-Kammern wird auf dieselbe Spurkammer-Superlage projiziert. Von hier aus werden Kandidaten der drei verschiedenen Pretrigger gleich behandelt.

Im bis hierher definierten Suchbereich wird nach Treffern im inneren bzw. äußeren Spurdetektor gesucht. Jeweils zwei hintereinander liegende Zellen werden mit einem logischen ODER verknüpft, um die Effizienz des Detektors zu erhöhen. Wenn ein Treffer gefunden wird, wird der Suchbereich auf die vorletzte Superlage, weiter in Richtung Target, projiziert. Dann werden noch die Superlage unmittelbar vor dem RICH und die unmittelbar hinter dem Magneten nach dem gleichen Verfahren einbezogen.

#### Prozessoren für die Spurensuche

Für die Spurensuche werden eigens entwickelte, hochspezialisierte Prozessoren eingesetzt, sogenannte *Track Finding Units*, TFUs. Jeder dieser Prozessoren ist fest mit einem bestimmten Bereich des Detektors verknüpft (Abb. 3.9). Die Aufgabe eines solchen Prozessors besteht darin, für jede erhaltene Nachricht im entsprechenden Suchbereich nach Treffern zu suchen und, falls ein Treffer gefunden wird, den Suchbereich für die nächstfolgende Detektorlage zu definieren und die Nachricht an die entsprechenden TFUs weiterzugeben. Die Koordinaten eines Suchbereiches definieren immer, an welche TFUs eine Nachricht gesendet werden muß.

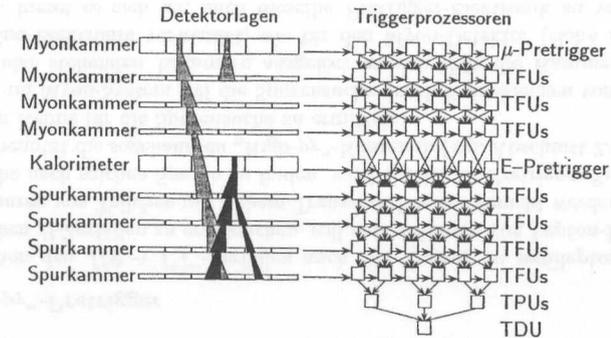


Abb. 3.9: Korrespondenz zwischen Trigger-Prozessoren und Detektorgeometrie

#### Übertragung der Detektordaten an die Trigger-Prozessoren

Die TFUs benötigen Meßsignale von Myon-Kammern, äußeren und inneren Spurkammern. Für jeden Kammertyp gibt es Verbindungs-Module, in Abb. 3.1 als *Trigger-Link* bezeichnet, die die binnen eines Taktzyklus zur Verfügung gestellten Signale mit der Ereignis-Identifikationsnummer versehen und an die TFU übertragen. Dafür benötigen die *Trigger-Link*-Module die Identifikationsnummer und das HERA-Taktsignal.

#### Bestimmung von Spurparametern

Kann nun eine Spur bis zum Magneten zurückverfolgt werden, so wird unter der Annahme, daß das Teilchen vom Target kam, der Ablenkungswinkel des Teilchens im Magnetfeld bestimmt. Daraus wird die Ladung und ein Näherungswert für den Impuls des Teilchens bestimmt. Dies geschieht ebenfalls in eigens entwickelten Spezialprozessoren, den sogenannten *Track Parameter Units*, TPUs.

#### Die Entscheidung der ersten Triggerstufe

Die so bestimmten Spurparameter (Teilchenart, Ladung und Impuls) werden, sofern es sich um Lepton-Spuren handelt, abschließend paarweise kombiniert, um Kandidaten für Leptonenpaare aus  $J/\psi$ -Zerfällen zu bestimmen. Ereignisse mit Spuren von Teilchen mit hohem Transversalimpuls werden gesondert behandelt, um z.B. in Verbindung mit Lepton-Spuren Kandidaten für semileptonische  $B$ -Zerfälle zu erkennen. Ein Spezialprozessor eines dritten Typs, die *Trigger Decision Unit*, TDU führt diese Operationen durch und sendet, falls ein  $J/\psi$ -Kandidat oder ein  $B$ -Kandidat vorliegt, die Identifikationsnummer des entsprechenden Ereignisses an das schnelle Kontrollsystem.

Die unterschiedlichen Pretrigger-Elektroniken und die unterschiedliche Anzahl von Detektorlagen, die in Betracht gezogen werden, führen dazu, daß die Bearbeitung von Myon- oder Elektron-Kandidaten unterschiedlich lange dauern kann. Außerdem kann, aufgrund unterschiedlicher Belegungsdichten der Detektorsegmente, die Zeit für die Verfolgung eines Spurkandidaten variieren. Infolgedessen sind die Entscheidungen der ersten Triggerstufe nicht entsprechend der Abfolge der Ereignisse geordnet.

Die Ereignisnummern werden in der Reihenfolge, in der die TDU die Entscheidungen trifft, an das schnelle Kontrollsystem gegeben. Dieses veranlaßt dann, daß in allen Front-End-Modulen die Meßdaten zu diesem Ereignis aus den Zwischenspeichern ausgelesen und an die Datenpuffer der zweiten Triggerstufe gesendet werden. Dafür müssen ein Triggersignal und die Identifikationsnummer des Ereignisses an die Front-End-Module übertragen werden.

### 3.3.4 Datenpuffer und Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe

Auch in der zweiten Stufe wird nur ein Teil der Meßdaten eines Ereignisses analysiert, um eine Entscheidung über die weitere Verarbeitung zu treffen. Alle Meßdaten des Ereignisses müssen währenddessen zwischengespeichert werden. Datenspeicher und Prozessoren sind deshalb auch hier getrennt.

Datenblöcke die neben den digitalisierten Meßsignalen auch Identifikationsnummern des Ereignisses und der Front-End-Module enthalten, werden von den Front-End-Systemen an Puffer übertragen. Diese sind aus digitalen Signalprozessoren vom Typ ADSP 21060 des Herstellers Analog Devices aufgebaut.

Jeder Prozessor hat 4 MBit internen Speicher. Alle Meßdaten sollen im internen Speicher der Prozessoren gehalten werden, um die Zeit für Datentransfer zu externen Speicherchips einzusparen. Ein Prozessor erhält über eine feste Verbindung Daten immer von denselben Front-End-Modulen. Dies können bis zu sechs Module sein. Die Anzahl ist variabel, da die Datenblöcke von den unterschiedlichen Front-End-Modulen unterschiedlich groß sind.

Der interne Speicher eines Prozessors wird in Blöcke unterteilt. Die Adressierung erfolgt dann über die Block-Nummer. Die Daten eines Ereignisses werden in allen Prozessoren unter derselben Block-Nummer abgelegt.

Eine Kontrolleinheit (in Abb. 3.1 als L2-Kontrolle bezeichnet), für die ebenfalls ADSP 21060 verwendet werden, verwaltet die Zuordnung der Blöcke. Diese Kontrolleinheit benötigt die Identifikationsnummern der Ereignisse, die die zweite Triggerstufe bearbeiten soll. Sie weist jedem Ereignis eine Blocknummer zu und teilt diese Zuordnung allen Puffer-Prozessoren mit. Diese legen die ankommenden Datenblöcke, die wieder die Ereignisnummer enthalten, unter der entsprechenden Blocknummer ab. Die Kontrolleinheit markiert diesen Block als belegt. Wenn ein Ereignis verworfen wird oder die Daten an die dritte Triggerstufe übertragen werden, markiert die Kontrolleinheit den entsprechenden Block wieder als frei und kann ihm ein neues Ereignis zuweisen. Die mittlere Ausgangsrate der ersten Triggerstufe ist 50 kHz. Das Verhältnis der Anzahl der Blöcke zur mittleren Latenzzeit der zweiten Triggerstufe (Zeit vom Eingang der Daten in den Puffer bis zum Ausgang an die dritte Stufe) muß größer als diese Rate sein um zu verhindern, daß die Puffer regelmäßig überlaufen:

$$\frac{\text{Anzahl der Speicherblöcke}}{\text{mittlere Latenzzeit}} > 50 \text{ kHz.} \quad (3.1)$$

Bei der Festlegung der Anzahl der Speicherblöcke spielen auch die Größe der Datenblöcke von den Front-End-Systemen sowie die Größe des internen Speichers der ADSP 21060 eine Rolle. 384 Blöcke sollen verwendet werden. Wenn doch einmal alle Blöcke belegt sind, muß verhindert werden, daß die Front-End-Module weitere Daten senden.

Mit den Front-End- und den Pretrigger-Systemen, der ersten Triggerstufe sowie der Kontrolleinheit der zweiten Stufe sind alle Komponenten des Datennahmesystems, die Schnittstellen zum schnellen Kontrollsystem haben, vorgestellt (vgl. Abb. 3.1). Auf diesen Beschreibungen basierend sollen die Anforderungen, die an das schnelle Kontrollsystem gestellt werden, eingeführt werden. Zuvor wird der übrige Teil des Datennahmesystems kurz beschrieben.

### 3.3.5 Prozessoren und Algorithmen der zweiten Triggerstufe

Für die Analyse der Daten in der zweiten Triggerstufe werden Standard-Personal-Computer mit Mikroprozessoren vom Typ Pentium II des Herstellers Intel und dem Betriebssystem Linux eingesetzt. Diese Rechner führen verschiedene Algorithmen nacheinander aus und verwenden Meßdaten des gesamten Spursystems (Vertexdetektor, innere und äußere Spurkammern).

Ein Rechner bearbeitet jeweils ein Ereignis. Die Zuordnung der Ereignisse zu den Rechnern erfolgt durch die L2-Kontrolleinheit, analog zur Verwaltung der Speicherblöcke.

Jeder Trigger-Prozessor benötigt Daten aus allen Puffer-Prozessoren. Für diesen Datentransfer wird ein spezielles Netzwerk entwickelt, das ebenfalls aus ADSP 21060 aufgebaut wird. Dies ist in Abb. 3.1 als *Switch* bezeichnet. Im Gegensatz zu Internet-Technologien zeichnet sich dieses Netzwerk durch eine hohe Bandbreite und kleine Latenzzeiten aus. Über diesen *Switch* erfolgt auch die Kommunikation der L2-Kontrolleinheit mit den Trigger- und Puffer-Prozessoren. Spezielle Schnittstellen wurden entwickelt, die das Protokoll der ADSPs auf den PCI-Bus der Pentium-Rechner übersetzen.

Das Verhältnis der Anzahl der Prozessoren zur mittleren Rechenzeit je Ereignis muß größer sein als die mittlere Eingangsrate. Das Verhältnis der Anzahl der Speicherblöcke zur mittleren Latenzzeit muß jedoch noch größer sein, um Fluktuationen der Eingangsrate abfangen zu können:

$$\frac{\text{Anzahl der Speicherblöcke}}{\text{mittlere Latenzzeit}} > \frac{\text{Anzahl der Trigger-Prozessoren}}{\text{mittlere Rechenzeit}} > 50 \text{ kHz.} \quad (3.2)$$

Etwa 100 Rechner sind bisher installiert. Es ist geplant, ihre Anzahl auf 240 zu erhöhen [med99]. Jedoch führen die Rechner nicht permanent die Algorithmen der zweiten Triggerstufe aus. Jeder Prozessor arbeitet einen Teil der Zeit auch für die dritte Triggerstufe. Dies wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Die zweite Triggerstufe bekommt von der TDU der ersten Triggerstufe die Suchbereiche für die gefundenen Spurkandidaten übertragen. Diese Suchbereiche bilden die Basis für die Arbeit der zweiten Triggerstufe.

Im ersten Schritt sollen die Spurkandidaten überprüft werden. Die erste Triggerstufe hat nur Zugriff auf die Treffer-Information von den Front-End-Modulen. Die zweite Stufe hat im Gegensatz dazu auch Zugriff auf die Driftzeitinformation.

Wenn die Spurkandidaten mit der dadurch erreichten, höheren Orsauflösung bestätigt werden, fordert der Rechner die Meßdaten der Spurkammern, die im Magnetvolumen angeordnet sind, von den Puffern an. Dann werden die Suchbereiche der ersten Triggerstufe aufgegriffen und die Spur durch den Magneten weiterverfolgt.

Ist die Spurensuche bis an den Vertextank erfolgreich, werden als nächstes die Meßdaten des Vertex-Detektors aus den Puffern übertragen. Die Spurkandidaten, die bis hierher verfolgt werden konnten, werden nun durch den Vertex-Detektor weiterverfolgt.

Bei den Spurkandidaten der ersten Triggerstufe, die bis durch den Vertex-Detektor verfolgt werden können, wird dann der Stoßparameter, das ist der Abstand der Spur zu den Targetdrähten, bestimmt. Anhand dieser Größe werden Kandidaten für Spuren von Sekundärzerfällen von Spuren aus direkten Zerfällen getrennt.

Das schrittweise Arbeiten der zweiten Triggerstufe führt zu stark variierenden Latenzzeiten. Viele Ereignisse werden sehr schnell, bereits bei der Überprüfung der Spurkandidaten, verworfen. Die Bearbeitung aller Algorithmen kann bis zu 50 ms in Anspruch nehmen. Der Mittelwert dieser weit auslaufenden Verteilung liegt bei etwa 3 ms [med99].

### 3.3.6 Dritte Triggerstufe

Für die dritte Triggerstufe wird keine eigene Hardware aufgebaut. Diese Triggerstufe umfaßt weitere Algorithmen, die auf denselben Prozessoren ausgeführt werden wie die der zweiten Triggerstufe.

Die Algorithmen der zweiten Stufe arbeiten jeweils mit einem Teil der Meßdaten eines Ereignisses und verfolgen die Spurkandidaten der ersten Stufe weiter. In dem Fall, daß ein Ereignis nach allen Algorithmen der zweiten Stufe weiterverarbeitet werden soll, wird der Prozessor, der bereits einen Teil der Daten des Ereignisses in seinem lokalen Speicher hat, der dritten Stufe zugeordnet. Zunächst werden nun die restlichen Daten des entsprechenden Ereignisses aus den L2-Puffern herausgelesen und zu einem Block zusammengefaßt. Ab der dritten Triggerstufe werden die Daten eines Ereignisses als Ganzes behandelt. Dieses Verfahren entlastet die L2-Puffer und stellt den Speicherplatz nachfolgenden Ereignissen zur Verfügung.

Im Anschluß an das Zusammenfassen der Daten werden weitere Analyse-Algorithmen ausgeführt. Diesen stehen nun alle Meßdaten des Detektors zur Verfügung. Die Analyse kann hier unabhängig von den Suchbereichen der ersten Triggerstufe erfolgen.

Das Konzept sieht vor, neben dem reinen  $J/\psi$ -Trigger auf dieser Stufe nach Ereignissen mit anderen  $B$ -Zerfällen zu suchen, die die ersten Stufen passiert haben. Dies können z.B. doppelt-semileptonische  $B$ -Zerfälle sein. Beide Leptonen können einen hohen Impuls haben und sich, da sie beide von Sekundärvertices kommen, mit großem Stoßparameter vom Target entfernen. Dieselbe Überlegung gilt für Zerfallskaskaden, in denen mehrere Leptonen auftreten, z.B.  $B^0 \rightarrow D^* l \nu$ ,  $D^* \rightarrow D^0 X$ ,  $D^0 \rightarrow l' X'$ .

Jeder der 240 Rechner, die für die zweite und dritte Stufe gemeinsam eingesetzt werden, wird während des größeren Teils der Zeit Algorithmen der zweiten Stufe ausführen, da die Algorithmen der dritten Stufe für eine wesentlich kleinere Anzahl von Ereignissen ausgeführt werden. Vorgesehen ist, daß bei einer Eingangsrate der dritten Stufe von  $\approx 500$  Hz im Mittel  $\approx 50$  Rechner für die dritte Stufe arbeiten, so daß für ein Ereignis  $\approx 100$  ms zur Verfügung stehen. Diese Zahlen stehen jedoch noch nicht endgültig fest.

### 3.3.7 Ereignisrekonstruktion und Massenspeicher

In der vierten Stufe des Datennahmesystems werden, ebenso wie in der zweiten und dritten Triggerstufe, Standard-PCs mit Intel-Pentium II-Prozessoren und dem Betriebssystem Linux eingesetzt. Da die Rechner mit der Zeit immer preiswerter werden, sollen sie so spät wie möglich angeschafft werden. Die Anzahl der benötigten Rechner ergibt sich aus dem Produkt der Eingangsrate und der Prozeßzeit pro Ereignis. Eine Eingangsrate von 50 Ereignissen/s und eine Rechenzeit von etwa 4 s/Ereignis führen zu 200

Rechnern. Dazu kommen einzelne Rechner mit Spezialaufgaben, die in der folgenden Systembeschreibung erwähnt werden.

Die Rechner der vierten Stufe werden über Fast-Ethernet mit denen der zweiten/dritten Stufe verbunden. Ein Rechner wird als L4-Kontrolleinheit eingesetzt und weist — analog zur L2-Kontrolle — die von der dritten Triggerstufe akzeptierten Ereignisse den Rechnern der vierten Stufe zu.

Die Bearbeitung der Meßdaten in der vierten Stufe gliedert sich in zahlreiche Einzelschritte [schw98], [gel99]. Im ersten Schritt werden die Meßdaten vom, bis hierher verwandten, Format, das an der Architektur der Ausleseelektronik orientiert ist, zur Weiterverarbeitung mit der Offline-Analysesoftware konvertiert. Anschließend werden Kalibrationsdaten (z.B. Sockelwerte der Detektoren und Veränderungen der Detektorpositionen) aus einer Kalibrationsdatenbank gelesen.

Nun stehen die Daten zur Verfügung, anhand derer die vollständige Ereignisrekonstruktion durchgeführt wird. Dies geschieht mit denselben Programmen, wie die spätere Offline-Analyse. Die vollständig rekonstruierten Ereignisse können dann klassifiziert werden. Außerdem ist eine weitere Selektion möglich, da nach der vollständigen Rekonstruktion mehr und andere Informationen zur Verfügung stehen als in den vorangehenden Triggerstufen.

Während der Rekonstruktion werden kalibrationsrelevante Daten ermittelt und an einen Kalibrationsrechner übertragen. Dieser ermittelt z.B. aus rekonstruierten Spuren Veränderungen der Driftgeschwindigkeiten in den Spurkammern und Veränderungen des Ansprechverhaltens sowie der Positionen von Detektorkanälen und aktualisiert die Kalibrations-Datenbank.

Anschließend werden die Daten eines Ereignisses über eine Fast-Ethernet-Verbindung an einen zentralen Rechner übertragen, dessen Aufgabe das temporäre Speichern der Meßdaten auf Festplatten und das dauerhafte Speichern auf Magnetbändern ist.

## 3.4 Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem

In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem, die von den verschiedenen, in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Systemen definiert werden, zusammenfassend dargestellt werden. Abb. 3.10 verdeutlicht, mit welchen Komponenten des Datennahmesystems das schnelle Kontrollsystem verbunden sein muß.

Das HERA-Zeitreferenzsystem, von dem das schnelle Kontrollsystem das Taktsignal bekommt, wird im Anschluß an die Definition der Anforderungen in Abschnitt 4.1 beschrieben.

### 3.4.1 Anforderungen der Front-End-Systeme

Die Auslese aller HERA – B – Teildetektoren muß zur Strahlstruktur des HERA-Ringes (siehe Abschnitt 2.2) synchronisiert werden. Die Datenpakete, die von den einzelnen Komponenten geliefert werden, müssen so markiert werden, daß die Zuordnung der Meßdaten zu den jeweiligen Wechselwirkungszeitpunkten möglich ist. Dafür muß das schnelle Kontrollsystem als Mindestanforderung sowohl ein gemeinsames Taktsignal an die Front-End-Elektronik (Abschnitt 3.3.1) liefern, den HERA-Takt, als auch zu jedem HERA-Taktzyklus eine Identifikationsnummer, die den Meßdaten beigelegt wird. Diese

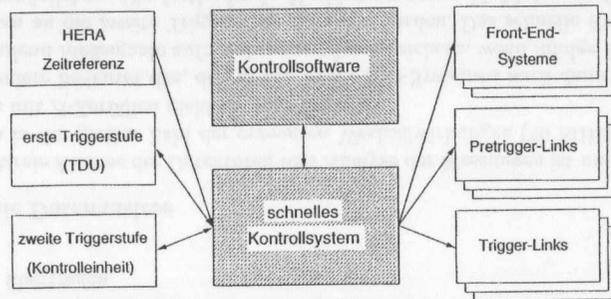


Abb. 3.10: Die Schnittstellen des schnellen Kontrollsystems. Zur Beschreibung der Komponenten siehe Abschnitte 4.1 (HERA-Zeitreferenz), 3.3.1 (Front-End-Systeme), 3.3.2 (Pretrigger), 3.3.3 (Trigger-Link und TDU), 3.3.4 (L2-Kontrolleinheit) sowie 4.3 (Kontrollsoftware).

wird in den Front-End-Systemen mit digitalen Zwischenspeichern auch zur Adressierung der Speicherzellen verwendet.

### Taktsignal

Das schnelle Kontrollsystem liefert die Zeitreferenz für alle Messungen. Dabei müssen Flugzeiten der Teilchen durch den Detektor ausgeglichen werden. Für die knapp 20 m vom Target bis zur letzten Lage des Myon-Detektors benötigten Teilchen, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, etwa 65 ns, also 2/3 des Abstandes zwischen den Wechselwirkungen. Der Zeitnullpunkt  $T_0$  einer Messung muß folglich für jede Detektorlage individuell sein. Neben der  $T_0$ -Verschiebung durch die unterschiedliche Entfernung der Detektoren vom Target gibt es auch  $T_0$ -Verschiebungen durch unterschiedlich lange Kabel vom Detektor zur Ausleseelektronik und Unterschiede zwischen den verwendeten Ausleseelektroniken. Große  $T_0$ -Fehler können sich dahingehend auswirken, daß Meßsignale falschen Ereignissen zugeordnet werden.

Beim äußeren Spurkammersystem zeigen sich schon kleine  $T_0$ -Fehler als Fehler der Driftzeitmessungen. Fehlerhafte Driftzeiten beeinträchtigen die Orts- und damit die Impulsauflösung des Detektors. Auch kann die Spurerkennung gestört oder sogar verhindert werden. Die Anforderung für die Genauigkeit und Stabilität des Taktsignals  $T_0$  werden deshalb durch das äußere Spurkammersystem definiert. [kap98]

Die Impulsauflösung des Detektors ist durch die Ortsauflösung der Kammern und Vielfachstreuung im Detektormaterial gegeben. Angestrebt wird eine Ortsauflösung von 150  $\mu\text{m}$  innerhalb jeder Driftzelle [loh94]. Die Ortsauflösung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben Eigenschaften der Kammern wie der Dicke der Signaldrähte von 25  $\mu\text{m}$  und der Drahtposition, die mit einem Fehler von 50  $\mu\text{m}$  bekannt ist, spielt die Präzision der Driftzeitmessung eine wesentliche Rolle.

Damit insgesamt die Ortsauflösung von 150  $\mu\text{m}$  erreicht wird, soll der Einfluß der Driftzeitmessung  $<100 \mu\text{m}$  sein. Die Driftgeschwindigkeit wird zu 100  $\mu\text{m}/\text{ns}$  eingestellt um zu gewährleisten, daß die maximale Driftzeit innerhalb einer Zelle kleiner als ein

Taktzyklus ist. Also ist eine Zeitauflösung von  $\leq 1$  ns erforderlich. Nun gibt es verschiedene Störeinflüsse auf Driftzeitmessungen, die sich in drei Kategorien einteilen lassen:

1. Fehler in der Bestimmung des Zeitpunktes der Wechselwirkung, die von Ereignis zu Ereignis variieren, aber innerhalb eines Ereignisses alle Kanäle betreffen. Solche Fehler können abgefangen werden, da der Zeitpunkt der Wechselwirkung bei der Spurrekonstruktion iterativ bestimmt werden kann. Jedoch sollte der Fehler klein gehalten werden, um gute Startpunkte für die iterative Bestimmung zu haben. Beispiele für solche Fehler sind:

- Die Länge der HERA-Protonenpakete von  $\approx c \cdot 0.5$  ns liefert eine  $T_0$ -Unge nauigkeit von  $\sigma \approx 0.5$  ns [ehr99].
- Das HERA-Zeitreferenzsystem (Abschnitt 4.1) liefert das Taktsignal mit einem Phasenjitter von  $\approx 0,5$  ns [duh98]. Da dieses Signal an die gesamte Ausleseelektronik verteilt wird, ist dieser globale Phasenjitter für alle Meßkanäle synchron.

2. Fehler, die von Kanal zu Kanal unterschiedlich, aber zeitlich konstant sind, können bei der Kalibration der einzelnen Kanäle behandelt werden. In diese Kategorie gehören die produktionsabhängige Anstiegszeit der Vorverstärker und die Driftzeit-Orts-Beziehung, die variieren kann, da sie z.B. von der magnetischen Flußdichte am Ort der jeweiligen Driftzelle abhängt.

3. Kritisch sind solche Fehler, die sowohl von Kanal zu Kanal als auch von Ereignis zu Ereignis variieren, da diese nicht kompensiert werden können. Die Summe dieser Fehler soll nicht mehr als  $\approx 1$  ns betragen.

- Die Länge der Signaldrähte beträgt aufgrund der Größe der Kammern bis zu 2,25 m. Die Signallaufzeit von  $\approx 5$  ns/m wird jedoch in der Rekonstruktion mit dem Ort des Teilchendurchganges durch die jeweilige Zelle bestimmt.
- Durch Ionisation werden entlang der Flugbahn des nachzuweisenden Teilchens Elektronen freigesetzt. Diese diffundieren ungleich schnell durch das Gas der Zelle, so daß die Linie, entlang derer die Elektronen frei geworden sind, aufgeweitet und damit der Ladungsimpuls verbreitert wird.
- Es werden jeweils Gruppen von Gasatomen, sogenannte *Cluster*, ionisiert. Deren Abstand hängt vom Gas in der Driftzelle ab. Bei HERA - B beträgt er im Mittel  $\approx 200 \mu\text{m}$ . Bei Spuren in unmittelbarer Nähe des Signaldrahtes wird nicht die Driftzeit von der Spur zum Draht, sondern die des nächsten *Clusters* zum Draht gemessen, die bis zu 1 ns größer sein kann.
- Die Anstiegszeit des Signals aus dem Vorverstärker hängt nicht nur von der Elektronik ab, sondern auch von der Signalhöhe, z.B. der Anzahl der Primäri onisationen. Im nachgeschalteten Diskriminator hängt der Zeitpunkt des Überschreitens der Schwelle von der Anstiegszeit des Signals ab.
- Die Driftzeit-Digital-Konverter (TDC-Chips) geben die gemessene Driftzeit als Zahl aus. Ein Zählschritt entspricht dabei 0,39 ns.

- Ein lokaler Phasenjitter des Taktsignals liegt vor, wenn verschiedene Kanäle Taktsignale erhalten, die nicht exakt synchron sind.

Der letzte Punkt wird durch das schnelle Kontrollsystem beeinflusst. Das Taktsignal wird an verschiedene Gruppen von Front-End-Module verteilt. Wenn nun die Signale, die diese verschiedenen Gruppen erhalten, gegeneinander nicht stabil sind, liegt ein Störeinfluß vor, der nicht kompensiert werden kann. Derartige Phasenjitter, die bei der Verteilung des Signals innerhalb des schnellen Kontrollsystems durch elektronische Bauteile nicht ausgeschlossen werden können, klein genug ( $<1$  ns) zu halten, ist eine der schwierigsten Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem.

#### Verteilung von Triggersignalen an die Front-End-Systeme

Meßdaten sollen aus den Zwischenspeichern der Front-End-Elektronik nur ausgelesen werden, wenn das jeweilige Ereignis durch die erste Triggerstufe akzeptiert wurde. Deshalb muß neben den Signalen, die für die Synchronisierung und Markierung der Daten notwendig sind, auch die Entscheidung der ersten Triggerstufe an die Front-End-Elektronik verteilt werden.

Die Front-End-Systeme mit digitalen Zwischenspeichern benötigen Speicheradressen, um die auszulesenden Meßdaten zu identifizieren. Mit einem Triggersignal muß also die Identifikationsnummer des akzeptierten Ereignisses übertragen werden.

In den HELIX-Chips mit analogen Zwischenspeichern werden die Meßdaten durch den Zeitpunkt des Triggersignals identifiziert. Ein Triggersignal muß den Chip exakt  $12,3 \mu\text{s}$  nach den zugehörigen Meßdaten erreichen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Die erste Triggerstufe arbeitet jedoch asynchron (siehe Abschnitt 3.3.3). Die Ereignisse werden nicht notwendig in derselben Reihenfolge akzeptiert, wie sie stattgefunden haben. Für die Front-End-Systeme, die die Meßdaten anhand von Nummern identifizieren, spielt das keine Rolle. Doch die HELIX-Chips erfordern, daß die Triggersignale in die erforderliche Reihenfolge gebracht und wieder zu den Wechselwirkungen synchronisiert werden.

Die Ereignis-Identifikationsnummer wird vom HELIX-Chip nicht benötigt, muß den Meßdaten jedoch spätestens bei der Übertragung an die zweite Triggerstufe beigefügt werden, damit die Datenpakete dort zugeordnet werden können. Deshalb benötigt auch die Kontrolleinheit des HELIX-Front-End-Systems diese Nummer, um sie an die FADC-Module zu übertragen.

#### Totzeitfreie Datenauslese

Eine totzeitfreie Auslese der Detektoren und Analyse der Messungen ist unbedingt erforderlich, um in der großen Zahl der erzeugten Wechselwirkungen (40 MHz) die wenigen Ereignissen mit  $B$ -Zerfällen nicht zu verpassen.

Insbesondere bedeutet das, daß es den Front-End-Systemen auch dann möglich sein muß, fortlaufend Meßsignale aufzunehmen und zu speichern, wenn infolge eines Triggersignals Daten an die zweite Triggerstufe gesendet werden. Das schnelle Kontrollsystem muß dies ermöglichen. Die fortlaufende Markierung neuer Meßdaten darf also für die Übermittlung eines Triggersignals nicht unterbrochen werden.

### 3.4.2 Anforderungen der Link-Module

Die Pretrigger-Link- und Trigger-Link-Module dienen dazu, Meßsignale an die Pretrigger- und Trigger-Prozessoren zu übertragen, aus denen ermittelt wird, ob das jeweilige Ereignis weiter bearbeitet werden soll. Um die Zuordnung der Signale zu ermöglichen, muß bei der Übertragung an die Prozessoren eine Ereignis-Identifikationsnummer beigefügt werden. Diese Identifikationsnummer sowie das HERA-Taktsignal benötigen alle Link-Module vom schnellen Kontrollsystem. Sie stimmen darin mit den Front-End-Systemen überein, benötigen aber im Gegensatz zu diesen keine Rückmeldung über Trigger-Entscheidungen.

### 3.4.3 Anforderungen der ersten Triggerstufe

#### Stoppen des Elektron-Pretriggers

Untergrundereignisse mit hoher Multiplizität belasten die Prozessoren der ersten Triggerstufe besonders, da viele Spurkandidaten verfolgt werden. Um die Prozessoren in solchen Fällen zu entlasten, wird die insgesamt im elektromagnetischen Kalorimeter deponierte Energie verwendet, diese Ereignisse zu identifizieren und zu unterdrücken, noch bevor die Spurensuche beginnt (vgl. Abschnitt 3.3.2). Wenn die Gesamtenergie eine Schwelle überschreitet, soll verhindert werden, daß die Pretrigger den Trigger-Prozessoren Spurkeime senden. Ein Signal, daß den Pretriggern dies mitteilt, soll durch das schnelle Kontrollsystem übertragen werden.

#### Stoppen von Triggersignalen

Jedes Auslösesignal der ersten Triggerstufe wird an das schnelle Kontrollsystem gegeben und von diesem an die Front-End-Elektronik weitergeleitet. Damit bietet sich die Möglichkeit, im schnellen Kontrollsystem die Trigger-Entscheidungen zu analysieren und ihre Verteilung in bestimmten Fällen zu unterlassen. Insbesondere ist hier interessant, folgendes zu überprüfen:

- Ist die Entscheidung der ersten Triggerstufe rechtzeitig gefallen? In den Front-End-Zwischenspeichern, die nur 128 Zellen groß sind, werden die Meßdaten nach  $128 \cdot 96 \text{ ns} = 12,3 \mu\text{s}$  überschrieben. Das Triggersignal muß die Zwischenspeicher vorher erreichen, so daß die Daten rechtzeitig aus den Speichern gelesen werden können. Die Summe der Latenzzeiten der Pretrigger-, und der Trigger-Module sowie der Zeit, die das schnelle Kontrollsystem zur Verteilung des Triggersignals benötigt, darf also  $12,3 \mu\text{s}$  nicht überschreiten.
- Ist die zweite Triggerstufe bereit, Daten zu verarbeiten? Ist insbesondere in den Datenpuffern freier Speicherplatz für die Daten des akzeptierten Ereignisses vorhanden? Durch zahlreiche, schnell aufeinanderfolgende, akzeptierte Ereignisse, können die Datenpuffer vollgeschrieben werden.
- Drohen die FIFO-Speicher der Front-End-Systemen, in die die Meßdaten zum Senden an die zweite Triggerstufe geschrieben werden, überzulaufen? Dies kann passieren, wenn viele Ereignisse in rascher Folge akzeptiert werden.

- Wurden zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Ereignisse akzeptiert? (Es war nicht von vornherein klar, daß alle Front-End-Komponenten die Daten unmittelbar aufeinanderfolgender Ereignisse aus den Zwischenspeichern auslesen können. Mittlerweise hat sich herausgestellt, daß das der Fall ist. Der Test ist also unnötig geworden, wurde aber beim Design des Kontrollsystems berücksichtigt.)
- Außerdem ist es sinnvoll, die Verteilung der Triggersignale durch Software-Zugriffe unterbrechen zu können. Damit hätten sowohl automatische Steuerungsprogramme als auch das Schichtpersonal des Experimentes die Möglichkeit, die Datenauslese anzuhalten.

#### Rückmeldung an die Trigger Decision Unit

Zusätzlich zu den Meßdaten von den Front-End-Systemen sollen auch die Suchbereiche der Spurkandidaten, die zur Trigger-Entscheidung geführt haben, an einen L2-Puffer übertragen werden, damit die zweite Triggerstufe auf diese zurückgreifen kann. Dafür muß die TDU eine Rückmeldung erhalten, ob die Daten aus den Front-End-Systemen an die zweite Triggerstufe gesendet werden können, also keine der oben genannten Bedingungen zum Stoppen des Triggersignals erfüllt ist.

Die TDU wird in diesem Zusammenhang wie ein Front-End-System betrachtet, das die für die zweite Triggerstufe notwendigen Informationen zwischengespeichert hat.

#### Diagnosewerkzeuge für die erste Triggerstufe

Aus obigen Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit einer Schaltung, die Nummern aller von der ersten Triggerstufe akzeptierten Ereignisse erhält und verarbeitet.

Es besteht die Möglichkeit, die Schaltung derart zu erweitern, daß sie Instrumente für die Überwachung und Analyse der Funktion der ersten Triggerstufe zur Verfügung stellt. Folgende Möglichkeiten bieten sich:

- Die Entscheidungen der ersten Triggerstufe können gezählt werden.
- Die Latenzzeit der ersten Triggerstufe unterscheidet sich von Ereignis zu Ereignis. Die Latenzzeit kann im schnellen Kontrollsystem histogrammiert werden.
- Ereignisse, deren Datenauslese trotz des Auslösens der ersten Triggerstufe verhindert wird, können gezählt werden. Hier bietet sich wegen der unterschiedlichen möglichen Gründe, die im vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurden, ebenfalls ein Histogramm an.
- Wie oben beschrieben, muß das schnelle Kontrollsystem die Front-End-Elektronik zum HERA-Protonenstrahl synchronisieren und die Meßdaten markieren. Es besteht die Möglichkeit, die Protonenbündel in HERA (Abschnitt 2.2) zu numerieren und für Ereignisse, die von der ersten Triggerstufe akzeptiert werden, deren Nummer an die L2-Kontrolleinheit (siehe Abb. 3.1) weiterzugeben. So können Korrelationen zwischen Triggerentscheidungen oder Triggerraten und der Strahlstruktur untersucht werden. Zusätzlich bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, durch vergleichende Überwachung der Belegungsdichte der Teildetektoren abhängig von der Bucket-Nummer die Synchronisation des Gesamtdetektors laufend zu prüfen.

- Ebenso, wie Trigger-Entscheidungen aufgehhalten werden können, kann das schnelle Kontrollsystem die Weitergabe von Meßdaten veranlassen, obwohl kein Signal von der ersten Triggerstufe vorliegt. Insbesondere können zufällig Ereignisse weitergegeben werden, um aus dem Vergleich willkürlich ausgewählter Meßdaten mit Trigger-akzeptierten Ereignissen die Funktion des Triggers zu analysieren.

#### 3.4.4 Anforderungen der zweiten Triggerstufe

Die Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe muß über jede positive Entscheidung der ersten Stufe unterrichtet werden. Diese Kontrolleinheit muß dem jeweiligen Ereignis einen Speicherblock und einen Prozessor zuweisen.

Für den Fall, daß die Aufnahmekapazität der Puffer erschöpft ist, muß die Kontrolleinheit dies dem schnellen Kontrollsystem mitteilen, damit dieses gegebenenfalls weitere Triggersignale unterdrücken kann.

#### 3.4.5 Möglichkeiten für Tests der Front-End-Elektronik

Mit dem schnellen Kontrollsystem muß ein System entwickelt werden, das Zugang zu allen, in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen, Front-End-Systemen hat. Aufgrund dessen bietet sich an, Funktionen zu integrieren, die Tests und Kontrollen dieser Systeme ermöglichen. Die Anforderungen werden im einzelnen von diesen definiert, müssen aber aufeinander abgestimmt sein.

#### Testpuls und „Strobes“

In alle Front-End-Systeme wurde eine Testpuls-Funktion integriert. Ein vordefiniertes elektrisches Signal, ein sogenannter Testpuls, veranlaßt, daß vordefinierte Daten in den Zwischenspeicher des jeweiligen Moduls geschrieben werden. Dem Testpuls muß dann ein Triggersignal folgen, das dazu führt, daß die entsprechende Speicherzelle ausgelesen wird. Da vordefinierte Daten ausgelesen werden, kann mit diesem Mechanismus überprüft werden, ob die Front-End-Module grundsätzlich funktionieren und ob die jeweils richtige Speicherzelle ausgelesen wird.

Die Front-End-Module des Vertexdetektors und der inneren Spurkammern liefern in aufeinanderfolgenden Kanälen ein regelmäßiges Muster aus ADC-Werten. Die Front-End-Module des Kalorimeters liefern in allen Kanälen denselben Wert.

In den TDC-basierten Systemen wird das Ansprechverhalten auf den Testpuls durch mehrere Signale definiert, die statisch angelegt werden. Diese sogenannten *Strobes* selektieren jeweils Gruppen von Kanälen, die Werte verschieden von Null liefern sollen. Im Driftzeit-Meßsystem wird in den selektierten Kanälen die Zeitdifferenz zwischen dem Testpuls und dem nächstfolgenden Taktsignal gemessen. Um einen Test der Zeitmessung zu ermöglichen, muß der Testpuls gegen das Taktsignal in definierten Schritten verschiebbar sein.

#### Externe Testpulssysteme

Zwei Teildetektoren von HERA – B arbeiten mit Photomultipliern: der Ringbild-Čerenkovdetektor und das elektromagnetische Kalorimeter. Hier läßt sich neben der Funkti-

on der Front-End-Elektronik auch die Funktion der Detektoren anhand von Testpulsen überprüfen.

Vor einem Teil der Photomultiplier werden Leuchtdioden angebracht. Diese werden gepulst, so daß die Photomultiplier ein Lichtsignal bekannter Stärke sehen. Nun muß ein Triggersignal an die assoziierten Front-End-Module geliefert werden, das mit dem Lichtpuls synchronisiert ist. Dies kann realisiert werden, indem der elektrische Puls, der an die Leuchtdioden geht, auch als externes Triggersignal an das Kontrollsystem geliefert und von diesem an die Front-End-Module übertragen wird.

### 3.4.6 Testbetrieb von Detektorkomponenten

Es soll die Möglichkeit geschaffen werden, einzelne Komponenten des HERA - B -Detektors unabhängig voneinander (*stand-alone*) zu betreiben. Dafür muß es möglich sein, Triggersignale nur an bestimmte Front-End-Module weiterzugeben.

Für den parallelen, unabhängigen Betrieb mehrerer Detektorkomponenten sollen Trigger-Signale aus verschiedenen Quellen jeweils an bestimmte Gruppen von Front-End-Systemen weitergegeben werden.

Quellen für Triggersignale können neben der ersten Triggerstufe und dem zufälligen Triggersignal (vgl. Abschnitt 3.4.3) z.B. die externen Testpulssysteme oder andere Puls-generatoren sein. Auch die Möglichkeit, durch einen Software-Zugriff ein Triggersignal auszulösen, ist erwünscht. Damit kann, insbesondere bei der schrittweise Inbetriebnahme der zweiten Triggerstufe, jeweils die Weitergabe eines Datenblockes von den Front-End-Systemen an die L2-Puffer veranlaßt werden, wenn sichergestellt ist, daß der vorherige Block von den L2-Puffern empfangen und verarbeitet wurde.

## Kapitel 4

# Das schnelle Kontrollsystem

### 4.1 Das HERA-Zeitreferenzsystem

Bevor der Aufbau des schnellen Kontrollsystems beschrieben wird, soll kurz das HERA-Zeitreferenzsystem erläutert werden. Durch dieses System wird das HERA-Taktsignal an das schnelle Kontrollsystem des Experimentes HERA - B übertragen. Dieses Taktsignal ist von zentraler Bedeutung für alle Funktionen des schnellen Kontrollsystems.

In Abschnitt 2.2 wurde dargestellt, daß Wechselwirkungen von Protonen des HERA-Strahls mit Nucleonen der Zieldrähte nicht zu beliebigen Zeitpunkten stattfinden können, sondern nur, wenn ein Protonenbündel die Zieldrähte passiert. Die Buckets, also die „Plätze“, an denen sich Protonenbündel befinden können, folgen mit einer Frequenz von 10,417 MHz aufeinander. Aufgründessen soll diese Frequenz als Taktfrequenz an die Ausleseelektronik geliefert werden.

Der HERA-Takt wird den vier Experimenten durch das sogenannte *HERA-Integrated-Timing-System* (=HIT-System) zur Verfügung gestellt.

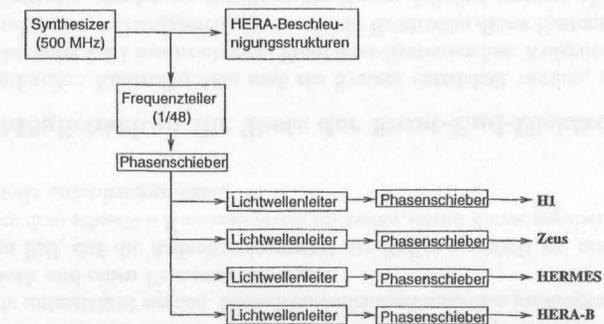


Abb. 4.1: Schema des HERA-Zeitreferenzsystems

Die HERA-Beschleunigungsfrequenz beträgt 500 MHz. Nur in jeder 48. Periode wird ein Protonenbündel beschleunigt, was durch den Aufbau der Vorbeschleuniger zu erklären ist. Das 500-MHz-Signal, das für die Beschleunigungsstrukturen erzeugt wird, wird in das HIT-System gegeben. Hier wird durch einen Frequenzteiler ein Signal erzeugt, dessen Frequenz mit der der HERA-Protonenbündel übereinstimmt:  $500 \text{ MHz}/48=10.417 \text{ MHz}$ . Dieses 10.417-MHz-Taktsignal wird über Lichtwellenleiter in die Experimentierhallen übertragen (Abb. 4.1). Das Taktsignal kann sowohl zentral als auch in den einzelnen

Experimentierhallen manuell phasenverschoben werden, um es an den Ausgängen des Systems zu den Protonenbündeln zu synchronisieren. Am Ausgang des HIT-Systems hat das Taktsignal einen Phasenjitter von  $\leq 500$  ps [duh98].

## 4.2 Aufbau des schnellen Kontrollsystems

### 4.2.1 Überblick

Die ursprüngliche Idee der HERA - B -Kollaboration war, das Konzept eines „Trigger, Timing & Control system“ (TTC), das für die LHC-Experimente ATLAS und CMS vorgeschlagen, zu verwenden [har95]. Dieses umfaßt eine Zentrale Kontrolleinheit, deren Signale durch einen Hochleistungslaser in ein Glasfasernetzwerk gegeben werden, sowie einen ASIC (*application specific integrated circuit*) auf jedem Front-End-Modul, der diese Signale empfangen und verarbeiten soll [atl94, cms94].

Jedoch ist die Entwicklung eines ASIC ein zeitaufwendiger Prozeß. Die LHC-Experimente sollen erst im nächsten Jahrzehnt in Betrieb genommen werden. Für diese Experimente steht ausreichend Zeit zur Verfügung. Die HERA - B -Kollaboration entschloß sich zur Entwicklung eines eigenen Systems, daß aus kommerziell erhältlichen Bauteilen besteht, da dieses in kürzerer Zeit zu realisieren war.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen HERA - B und den LHC-Experimenten, der der Eigenentwicklung zugute kam, liegt in der Geometrie des Experimentes. Bei den LHC-Experimenten ruht der Schwerpunkt des wechselwirkenden Systems. Deshalb werden im Laborsystem Teilchen vom Primärvertex in alle Raumrichtungen emittiert. Die Detektoren müssen also den gesamten Raumwinkel im Laborsystem abdecken. HERA - B ist dagegen ein Vorwärts-Spektrometer. Der Schwerpunkt des wechselwirkenden Systems bewegt sich relativistisch in richtung des HERA-Protonenstrahls. Infolgedessen ist im Laborsystem nur ein eingeschränkter Raumwinkel mit Detektoren ausgestattet (siehe Abschnitt 2.1). Die Elektronik kann außerhalb des Detektors angeordnet werden. Daraus ergeben sich zwei Vorteile: daß mehr Platz für die Elektronik zur Verfügung steht und daß die Elektronik bei HERA - B weniger durch Strahlung belastet wird als bei den LHC-Experimenten.

Aus Abb. 3.10 ist ersichtlich, daß das schnelle Kontrollsystem sowohl einzelne Verbindungen zu anderen Komponenten des Datennahmesystems haben muß, von denen es auch Signale empfängt, als auch zahlreiche unidirektionale Verbindungen zu Front-End- und Link-Modulen. Dies legt nahe, die Grundidee des TTC-Systems zu übernehmen: eine zentrale Steuereinheit kommuniziert mit der Umgebung und sendet Signale an zahlreiche abhängige Stationen. Aus Kostengründen sollen bei HERA - B jedoch weniger Glasfaserverbindungen als in den LHC-Experimenten eingesetzt werden. Die Front-End- und Link-Module werden neben oder unter dem Detektor in Crates (Rahmen) angeordnet. Damit ist es möglich, jeweils alle Module in einem Crate über einen lokalen Bus anzusprechen. Statt, wie in den LHC-Experimenten, jedes Front-End-Modul mit einem ASIC auszustatten, wird ein Modul je Crate eingesetzt, das Kontrollsignale von der Zentraleinheit erhält und über den Bus weiterverteilt.

Um weitere Glasfaserverbindungen einzusparen, wird ausgenutzt, daß an vielen Stellen jeweils mehrere Crates nahe zusammenstehen. Ein Empfänger kann optische in elektrische Signale umwandeln und an mehrere Crates verteilen. Dadurch werden so wenige

Glasfasern benötigt, daß, anstelle des Hochleistungslasers aus dem LHC-Konzept, für jede Faser ein einzelner kleiner Sender verwendet werden kann. Sender und passende Empfänger sind kommerziell erhältlich. Das Gesamtsystem besteht also aus vier Stufen (Abb. 4.2). Eine zentrale Steuereinheit, im folgenden auch „Mutter“-Modul genannt, optische Sender, optische Empfänger und ein Modul in jedem Front-End-Crate, im folgenden auch als „Tochter“-Modul bezeichnet.

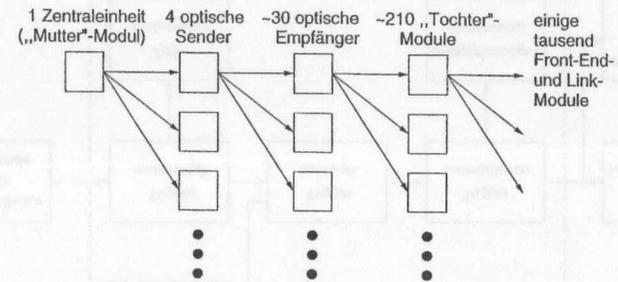


Abb. 4.2: Prinzipieller Aufbau des schnellen Kontrollsystems

Die Elektronik-Module wurden in der Elektronikentwicklungsabteilung DESY-FEA entwickelt. Die folgende Beschreibung der einzelnen Module orientiert sich an [hoc99a] und [hoc99b].

Für den internen Gebrauch in der HERA - B -Kollaboration wurde eine Dokumentation erstellt, die das System in seiner Beziehung zu den übrigen HERA - B -Komponenten betrachtet [ful98]. Darüber hinaus wurde eine Beschreibung der Anforderungen und der Implementierung des Systems als Konferenzbeitrag veröffentlicht [ful98a].

### 4.2.2 Funktionalität des Mutter-Moduls

Die logischen Funktionen des Moduls sind in zwei FPGAs vom Typ XILINX XC4025E untergebracht (Abb. 4.3). Die Komplexität der Schaltung überschreitet die Größe des größten verfügbaren Bausteins und erforderte eine Aufteilung. Die Aufteilung wurde so vorgenommen, daß ein Baustein in Modulen für Testaufbauten weggelassen werden kann. Ein Chip enthält die Funktionen zur Verarbeitung von Triggersignalen sowie die Schnittstelle zu den Tochter-Modulen. Der zweite Chip enthält zwei Histogramme und die Schnittstelle zur Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe einschließlich des sogenannten *BX-Tag-Zählers*. Dies sind relativ große Funktionsblöcke, die für den Betrieb des Systems in Testaufbauten nicht unbedingt erforderlich sind.

#### Zeitreferenz

Die grundlegendste Anforderung an das System besteht darin, daß das HERA-Taktsignal an die Front-End-Systeme weitergeleitet wird. Das Modul hat zwei LEMO-Eingänge, durch die es zwei Taktsignale von HERA empfängt: einen 96-ns-Takt (10,417 MHz), der synchron zu den Wechselwirkungen ist, und einen 21,12- $\mu$ s-Takt (47,35 kHz), der synchron zum Umlauf eines Protons um den HERA-Ring ist.

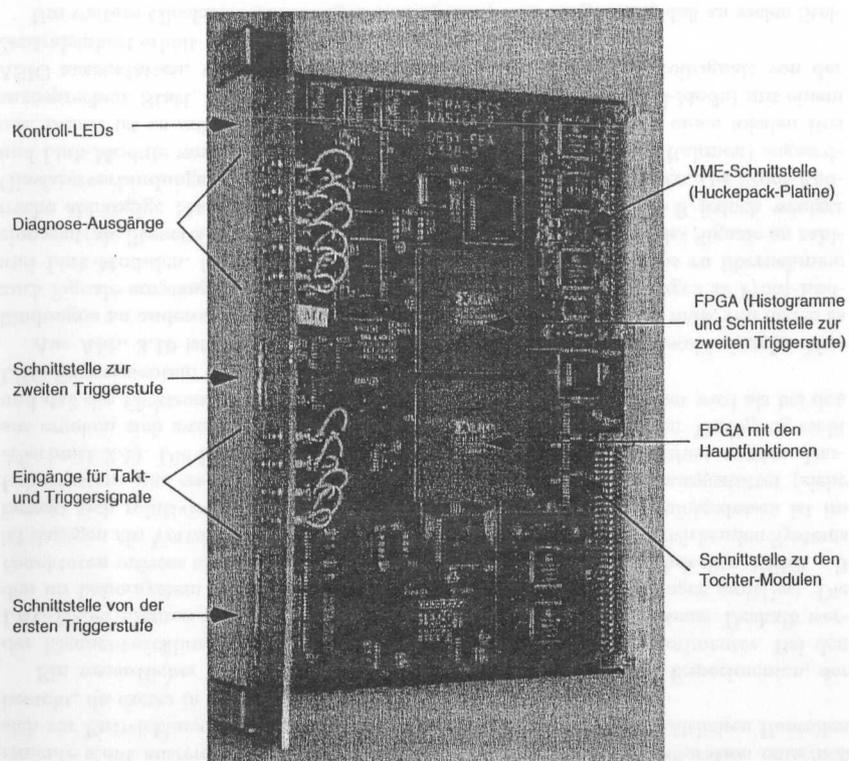


Abb. 4.3: Foto des Mutter-Moduls

Das 96-ns-Taktsignal wird u.a. verwendet, um die logischen Bauelemente auf dem Mutter-Modul zu takten. Das Signal wird auch an die optischen Sender übertragen und hier als Referenzoszillator für die Datenübertragung durch die Glasfasern verwendet.

### Verarbeitung von Triggersignalen

Zwei Zähler werden durch die Taktsignale direkt angetrieben. Der sogenannte BX-Zähler zählt die Taktzyklen. Der Zähler ist acht Bit breit und damit für  $24,6 \mu\text{s}$ , das Doppelte der maximalen Zwischenspeicherzeit der Front-End-Systeme, eindeutig. Dieser Zähler wird für die Identifikation der Daten an die Front-End-Systeme weitergegeben und dient dazu, anhand der Nummern der akzeptierten Ereignisse die Entscheidungszeit der ersten Triggerstufe zu prüfen.

Der zweite Zähler zählt ebenfalls die Taktzyklen, wird jedoch durch das zweite Taktsignal, das synchron zum Umlauf eines Protons um HERA ist, immer wieder auf null zurückgesetzt. So erhält man Identifikationsnummern für die Buckets, also die „Plätze“

in der Strahlstruktur, in denen sich Protonen bewegen könnten. Diese, als PHYS\_BX bezeichnete, Nummer läßt sich später verwenden, um nach Korrelationen zwischen der HERA-Strahlstruktur und den Triggersignalen zu suchen.

Die Anzahl der Protonen pro Bunch variiert, damit auch die Wahrscheinlichkeit, daß ein Bunch zu einer Wechselwirkung im Zieldraht führt. Deshalb kann die PHYS\_BX-Nummer auch verwendet werden, um durch Vergleich der Belegungsichte der Detektor-komponenten mit der Anzahl der Protonen im jeweiligen Bunch die Synchronisation des Experimentes zu prüfen.

Ein Triggersignal wird in mehreren Schritten verarbeitet (siehe Abb. 4.4). Diese Schritte sollen im folgenden erläutert werden.

### Schnittstelle zur ersten Triggerstufe

Im ersten Schritt wird anhand der Nummer des akzeptierten Ereignisses geprüft, ob das Triggersignal die Front-End-Systeme rechtzeitig erreicht, um die Meßdaten noch auslesen zu können. Geprüft wird, ob die Gleichung

$$BX - BX\_FLT < latest\_accept \quad (4.1)$$

erfüllt ist. Dabei ist BX der aktuelle Zählerstand, BX\_FLT die Nummer des akzeptierten Ereignisses und *latest\_accept* ein Parameter, der über einen VME-Zugriff konfigurierbar ist. *latest\_accept* muß so eingestellt werden, daß die Triggersignale die Front-End-Systeme des Vertex-Detektors und der Inneren Spurkammern zum jeweils richtigen Zeitpunkt erreichen. Damit ist dann gewährleistet, daß keine Triggersignale zu spät an die Front-End-Systeme gegeben werden.

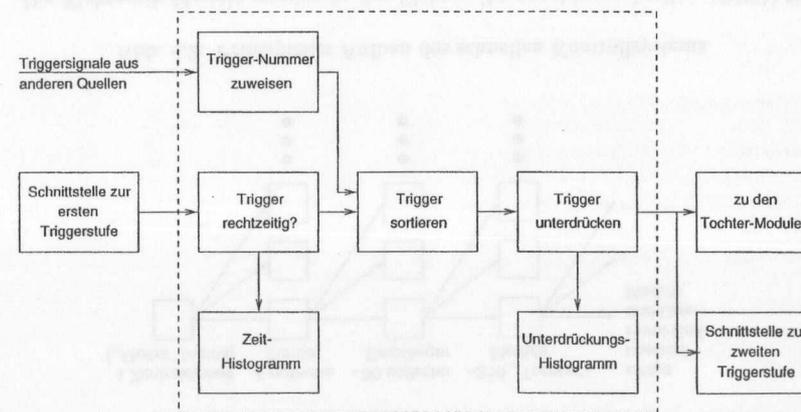


Abb. 4.4: Weg eines Triggersignals durch das Mutter-Modul des schnellen Kontrollsystems (frei nach [hoc99b]). Über den VME-Bus sind Parameter aller Komponenten innerhalb des gestrichelten Rechtecks adressierbar. Für externe Trigger, das Taktsignal sowie verschiedene Signale der Trigger-Unterdrückungs-Logik stehen LEMO-Buchsen zur Verfügung.

### Zuweisung von Trigger-Nummern

Die Prüfung der Bedingung 4.1 erfolgt nur für Nachrichten von der ersten Triggerstufe, die eine Identifikationsnummer enthalten. Triggersignalen aus anderen Quellen muß eine BX\_FLT-Nummer zugewiesen werden, bevor alle Triggersignale den gleichen Pfad durchlaufen können. Hier werden drei Fälle unterschieden.

1. Mit dem sogenannten VME-Trigger können gezielt Meßdaten zu einzelnen HERA-Buckets ausgelesen werden. Dies ermöglicht z.B. Untergrundstudien, indem Meßdaten zu leeren Buckets, die nicht zu Wechselwirkungen führen, ausgelesen werden. Es ermöglicht auch die Messung der Belegungsichte der Detektorkomponenten als Funktion der Bucket-Nummer zur Prüfung der Synchronisation. Dieses Triggersignal wird durch einen VME-Zugriff ausgelöst. Mit dem Zugriff wird die Nummer eines Buckets in ein Register geschrieben. Dann wird dieses Register in jedem Taktzyklus mit dem PHYS\_BX-Zähler verglichen. Zum Zeitpunkt der Gleichheit wird der aktuelle Stand des BX-Zählers als Identifikation der auszulesenden Daten übernommen.
2. Der sogenannte *Random Trigger* ist ein Triggersignal, daß periodisch ausgelöst wird. Die Funktion ist durch einen VME-Zugriff ein- und ausschaltbar. Ein weiteres VME-schreib- und -lesbares Register, als *random\_factor* bezeichnet, definiert den Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Triggersignalen in Einheiten von 96 ns. Ist die Funktion eingeschaltet, wird ein weiterer Zähler mit jedem HERA-Taktzyklus inkrementiert und mit dem *random\_factor*-Register verglichen. Bei Gleichheit der beiden Werte wird das Triggersignal ausgelöst und der aktuelle Stand des BX-Zählers als Identifikation der auszulesenden Daten übernommen. Der Zähler wird zurückgesetzt, um erneut zu starten.
3. Vier LEMO-Buchsen sind auf der Frontplatte des Moduls angebracht, um externe Triggersignale zuführen zu können, z.B. Signale von Pulsenergiegeneratoren, die Testsignale an die Detektoren geben. Ein TTL-Puls an einem dieser Eingänge löst ein Triggersignal aus, dem der aktuelle BX-Zählerstand abzüglich einer Verschiebung beigefügt wird. Die Verschiebung wird in einem VME-schreib- und lesbaren Register definiert und dient dazu, die auszulesende Speicherzelle abhängig von Signallaufzeiten und Ansprechverhalten des betreffenden Detektors zu dem Testsignal zu synchronisieren.

Neben der Zuweisung der Zahl BX\_FLT, die zur Identifikation der Daten in den Front-End-Systemen verwendet wird, werden die Triggersignale aus allen genannten Quellen, einschließlich der ersten Triggerstufe, auch gezählt. Jedem Triggersignal wird dabei eine 16-Bit-Zahl zugewiesen, die im folgenden als Trigger-Zähler bezeichnet wird. Der Trigger-Zähler kann zusätzlich als Zeitreferenz und zur Überprüfung der Synchronisation verwendet werden. Die 16-Bit-Identifikation für Ereignisse, deren Daten aus den Front-End-Systemen ausgelesen werden, ist bei der angestrebten Trigger-Rate von 50 kHz für 1,3 s eindeutig.

### Sortieren der Trigger-Nummern

Der nächste Schritt, in den nun alle Triggersignale einbezogen werden, ist das Sortieren der auszulesenden Ereignisse nach aufsteigender Identifikationsnummer. Dies ist erforder-

derlich, da die Front-End-Systeme des Vertexdetektors und der inneren Spurkammern keinen Speicher mit wahlfreiem Zugriff verwenden, sondern die Triggersignale im festen zeitlichen Abstand zu den auszulesenden Messungen benötigen (siehe Abschnitt 3.3.1).

Zur Synchronisierung der Triggersignale wird ein sogenanntes DPRAM verwendet, ein Speicher mit wahlfreiem Zugriff und zwei Bus-Anschlüssen. Auf einem Bus wird die Identifikationsnummer (BX\_FLT bzw. die nach einem der oben beschriebenen Verfahren zugewiesene Nummer) als Schreibadresse verwendet und in die entsprechende Adresse eine Markierung geschrieben. Auf dem anderen Bus wird die Differenz des BX-Zählers und des oben beschriebenen *latest\_accept* als Leseadresse verwendet. In jedem Taktzyklus wird das entsprechende Register gelesen und in dem Fall, daß eine Markierung gefunden wird, wird ein Triggersignal mit der entsprechenden Adresse weitergegeben. So ist gewährleistet, daß Triggersignale zyklisch nach der Reihenfolge ihrer Identifikationsnummer sortiert sind und eine konstante Differenz zwischen dem BX-Zähler und der Trigger-Nummer hergestellt wird, nämlich *latest\_accept*. Dieser Wert kann, wie oben beschrieben, per VME-Zugriff eingestellt werden.

### Unterdrückung von Triggersignalen

Im folgenden Schritt kann das synchronisierte Triggersignal unterdrückt werden, falls eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist.

- In einem vom VME-Bus schreib- und -lesbaren Register ist ein entsprechendes Kontrollbit gesetzt.
- Ein Eingangssignal an einer dafür eingerichteten LEMO-Buchse (bezeichnet mit FLDI für *First Level Disable*) liegt an. Dieser Eingang wird von der Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe angesteuert. Das Sperrsignal wird angelegt, wenn die Datenpuffer der zweiten Stufe überzulaufen drohen.
- Schnell aufeinanderfolgende Triggersignale können unterdrückt werden. In einem VME-schreib- und -lesbaren Register (*buffer\_delay*) kann ein Mindestabstand von Triggersignalen in Einheiten von 96 ns festgelegt werden. Eine Logik unterdrückt nun im Anschluß an ein Triggersignal für *buffer\_delay* Taktzyklen alle weiteren. Dieser Mechanismus wurde entwickelt, da nicht von Beginn an klar war, ob alle Front-End-Systeme Daten unmittelbar aufeinanderfolgender Ereignisse an die zweite Stufe senden können. Mittlerweile hat sich herausgestellt, daß das der Fall ist. Im HERA - B -Betrieb wird also immer *buffer\_delay=0* gesetzt, der Mechanismus damit ausgeschaltet.
- Folgen jedoch zahlreiche Triggersignale zu schnell aufeinander, können die FIFO-Speicher der Sendeeinheiten in den Front-End-Systemen überlaufen. Im schnellen Kontrollsystem soll gewährleistet werden, daß das nicht geschieht. Zwei Register, deren Werte in diese Prüfschaltung eingehen, sind vom VME-Bus adressierbar: *fifo\_depth*, das die Tiefe der Speicher repräsentiert, und *readout\_duration*, das angibt, wie lange (in Taktzyklen) ein Front-End-Modul maximal benötigt, um einen Datensatz aus dem Speicher zu lesen und an die zweite Stufe zu senden. Dies sind z.B. für das Auslesesystem des Vertex-Detektors 300 Taktzyklen und für das der Driftkammern 120 Taktzyklen (vgl. Abschn. 3.3.1). Die Logik kann in zwei Modi

betrieben werden. Ein Zähler, der den Füllstand der FIFO-Speicher repräsentiert, wird mit jedem Triggersignal inkrementiert. Im automatischen Modus wird der Zähler jeweils nach *readout\_duration* Taktzyklen dekrementiert. Im sogenannten *Handshake*-Modus wird jeweils eine Rückmeldung gegeben, wenn ein Datensatz von den Front-End-Systemen abgesendet oder von einer höheren Stufe empfangen wurde. Hierfür stehen zwei *Handshake*-Signale zur Verfügung: eines per VME-Zugriff und eines, das durch eine LEMO-Buchse empfangen wird.

Ist keine dieser Bedingungen erfüllt, wird das Triggersignal nicht unterdrückt, sondern an die Sender-Schnittstelle zu den Tochter-Modulen sowie an die Schnittstelle zur zweiten Triggerstufe (s.u.) weitergegeben. Bis hierher ist der Weg eines Triggersignals im Mutter-Modul in Abb. 4.4 nachzuvollziehen.

### Histogramme

Neben der Schaltung zum Weiterleiten bzw. Unterdrücken von Triggersignalen werden zwei Histogramme geführt, deren Einträge für Analysezwecke durch den VME-Bus ausgelesen werden können. Im ersten Schritt der Trigger-Bearbeitung wird die Latenzzeit der ersten Triggerstufe als (BX - BX\_FLT) bestimmt (Gl. 4.1 auf S. 57), um festzustellen, ob das Triggersignal so rechtzeitig eingetroffen ist, daß die Auslese der Meßdaten aus den Zwischenspeichern der Front-End-Module noch möglich ist. Die so bestimmte Latenzzeit wird histogrammiert.

Das zweite Histogramm wird von der Trigger-Unterdrückungs-Logik gefüllt. Das Auftreten der vier o.g. Bedingungen, die zur Zurückweisung eines Triggersignals führen können, wird gezählt. Dazu enthält dieses Histogramm einen Zähler für die Gesamtzahl der Triggersignale, die in dieser Logik unterdrückt werden, sowie einen für die Triggersignale, die nicht rechtzeitig ankommen. Die Zähler sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Die Zähler des Trigger-Sperr-Histogramms

1	Zeitüberlauf der ersten Triggerstufe
2	Software-Sperre
3	Überlaufsperre der zweiten Triggerstufe
4	Mindestabstands-Sperre
5	Überlaufsperre der Sender-FIFOs
6	Summe der Zähler 2 bis 5

Das Latenzzeithistogramm dient der Analyse der Funktion der ersten Triggerstufe. Die Trigger-Sperr-Zähler werden verwendet, um Totzeiten, die durch die unterschiedlichen Unterdrückungs-Mechanismen eingeführt werden, zu bestimmen. Durch regelmäßiges Überwachen der Zählerstände werden Verlusten der Triggersignale auch zeitabhängig bestimmt.

### Schnittstelle zum VME-Bus

In den vorangehenden Abschnitten wurden verschiedene Parameter und Kontrollbits erwähnt, die durch den VME-Bus gelesen und geschrieben werden können. In Tab. 4.2

sind diese Parameter zusammengestellt. Die Parameter *BX\_Tag* und *daughter\_command*, die zusätzlich zu den bisher erwähnten Parametern in der Tabelle aufgeführt sind, werden in den folgenden Abschnitten besprochen.

Des weiteren können die oben beschriebenen Histogramme über den VME-Bus ausgelesen und zurückgesetzt werden. Schließlich kann auch die Versionsnummer der FPGA-Schaltung ausgelesen werden.

### Schnittstelle zu den Tochter-Modulen

An die Tochter-Module wird in jedem Taktzyklus ein 20 Bit großes Datenpaket übertragen. Dabei definieren 4 Bit, um welches der im folgenden beschriebenen Datenpakete es sich handelt. 16 Bit sind die Nutzinformation. Die Übertragung erfolgt immer simultan an alle Module.

In den meisten Zyklen werden jeweils abwechselnd die aktuellen Zählerstände des BX-Zählers und des Trigger-Zählers übertragen, um die auf jedem Tochter-Modul vorhandenen, dezentralen Zähler immer wieder auf die zentralen Zähler zu synchronisieren. Der Trigger-Zählerstand benutzt die vollen 16 Bit. Bei der Übertragung des BX-Zählers werden in den übrigen acht Bit Nullen übertragen. Diese wechselweise Übertragung wird in zwei Fällen unterbrochen, um Datenpakete höherer Priorität zu übertragen.

Eine Möglichkeit ist die Übertragung eines sogenannten *daughter\_command* (siehe Tab. 4.2), eines Konfigurationskommandos vom VME-Bus. In diesem Fall wird ein 32-Bit-Wort, daß durch den VME-Bus in ein Register geschrieben wurde, in zwei 16-Bit-Worte aufgeteilt. Diese werden in zwei aufeinander folgenden Taktzyklen an die Tochter-Module übertragen. Mit diesen Kommandos sind — trotz der simultanen Übertragung an alle Module — einzelne Module adressierbar. Das Kommando enthält jeweils die Information, welche Module es abarbeiten sollen und welche nicht. Die verschiedenen Kommandos und ihre Bedeutung werden in Abschnitt 4.2.4 eingeführt.

Die andere Möglichkeit ist die Übertragung eines Triggersignals und der zugehörigen Identifikationsnummer der auszulesenden Speicherzellen. In diesem Fall ist die Paket-Identifikation abhängig von der Quelle des Triggersignals. Ein Triggersignal hat eine höhere Priorität als ein VME-Kommando. In dem Fall, daß beide gleichzeitig eintreffen, wird das VME-Kommando im folgenden Taktzyklus übertragen. Für den Fall, daß Triggersignale aus verschiedenen Quellen gleichzeitig eintreffen, sind diesen unterschiedliche Prioritäten zugeordnet. Das Signal mit der niedrigeren Priorität wird unterdrückt. Alle Datenpakete sind in Tab. 4.3 zusammengestellt.

### Schnittstelle zur zweiten Triggerstufe

Der letzte große Funktionsblock ist die Schnittstelle des Kontrollsystems zur Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe. Dieser enthält einen weiteren Zähler, der die 96-ns-Taktzyklen zählt. Im Gegensatz zu dem Zähler, der für die Adressierung der Speicherzellen in den Front-End-Einheiten verwendet wird, hat dieser jedoch die Aufgabe, die Ereignisse für einen längeren Zeitraum eindeutig zu identifizieren und muß deshalb breiter sein. Die Entscheidung fiel für einen 48-Bit-Zähler.  $2^{48}$  Taktzyklen entsprechen  $2,7 \cdot 10^7$  s. Das reicht aus, um innerhalb eines Betriebsjahres jeder Wechselwirkung eine eindeutige Identifikationsnummer zuzuweisen. Die Jahreszahl muß den Meßdaten dann auf einer anderen Stufe des Datennahmesystems beigefügt werden. Der 48-Bit-Zähler ist über zwei

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Parameter, die mit VME-Zugriffen in das Mutter-Modul des schnellen Kontrollsystems geschrieben oder daraus gelesen werden können

Bezeichnung	schreiben, lesen	Bedeutung
<i>latest_accept</i>	sl	definiert, wann ein Triggersignal aus der Sortierlogik an die Unterdrückungslogik weitergegeben wird. Definiert auch, wann ein Triggersignal als zu spät unterdrückt wird.
<i>buffer_delay</i>	sl	Mindestabstand aufeinanderfolgender Triggersignale (in Taktzyklen)
<i>fifo_depth</i> und <i>readout_duration</i>	sl	für die Unterdrückung schnell... ...aufeinanderfolgender Triggersignale.
<i>overflow_scheme</i>	sl	Schalter zwischen automatischem und <i>handshake</i> -Modus dieser Unterdrückung
<i>readout_buffer_overflow</i>	l	signalisiert diese Unterdrückung
<i>trigger_enable</i>	sl	Schalter für die Unterdrückung von Triggersignalen
<i>random_trigger_enable</i>	sl	schaltet die Generierung periodischer Triggersignale ein und aus.
<i>trigger_offset</i>	sl	Verschiebung der Trigger-Nummer bei externen Triggersignalen
<i>random_factor</i>	sl	Inverse Frequenz des periodischen Triggersignals
<i>inhibit_histogram</i>	l	zählt das Erfüllen der Bedingungen zur Unterdrückung von Triggersignalen.
<i>timing_histogram</i>	sl	Histogramm der Trigger-Latenzzeiten
<i>BX_tag</i>	sl	48 Bit breiter Zähler für die eindeutige Identifizierung der Ereignisse
<i>daughter_command</i>	s	Schnittstelle zur Konfiguration der Tochter-Module. Schreibzugriffe werden unmittelbar an die Tochter-Module weitergegeben.

Tabelle 4.3: Format der Datenpakete, die vom Mutter-Modul an die Tochter-Module gesendet werden können [hoc99b].

Typ	Typ-Nr.	Bits 15..8	Bits 7..0
BX-Zähler	0000	0	BX-Nummer
Trigger-Zähler	0101	Trigger-Nummer	
Kommando, Teil 1	0110	Code	Daten
Kommando, Teil 2	0111	Gruppen-Nummer	Tochter-Nummer
erste Triggerstufe	1000	0	Ereignis-Nummer
periodischer Trigger	1001	0	Ereignis-Nummer
VME Trigger	1010	0	Ereignis-Nummer
ext. Trigger 1	1100	0	Ereignis-Nummer
ext. Trigger 2	1101	0	Ereignis-Nummer
ext. Trigger 3	1110	0	Ereignis-Nummer
ext. Trigger 4	1111	0	Ereignis-Nummer

aufeinanderfolgende VME-Zugriffe schreib- und lesbar, um die eindeutige Identifizierung der Wechselwirkungen nach einem Stromausfall wiederherstellen zu können. In Tab. 4.2 ist er als *BX\_Tag* aufgeführt.

Weitere Informationen, die der zweiten Triggerstufe zur Verfügung stehen müssen, sind die 8-Bit-Ereignisnummer, anhand derer die Datenblöcke von der ersten Triggerstufe und von den Front-End-Systemen identifiziert werden, die Triggernummer, die Bucketnummer *PHYS\_BX* sowie die Identifikation der Quelle des Triggersignals (erste Triggerstufe, VME-Zugriff, periodischer oder externer Trigger).

Das Übertragungsprotokoll der ADSP 21060 sieht die Übertragung von 48-Bit-Worten in je zwölf 4-Bit-Blöcken vor. Für ein Ereignis überträgt das schnelle Kontrollsystem zwei Worte, wobei das erste Wort die Identifikationsnummer enthält und das zweite Wort die übrigen Informationen. Der Sender ist mit dem HERA-Takt getaktet. Folglich benötigt die Übertragung der beiden Worte 24 Taktzyklen bzw.  $2,3 \mu\text{s}$ . Innerhalb dieser Zeit können weitere Triggersignale eingingen. Um die entsprechenden Ereignisse auch bearbeiten zu können, muß dem Sender ein FIFO-Speicher vorgeschaltet werden. Dieser ist 32 Worte tief. Dieser FIFO ist tiefer als die der Front-End-Systeme und das Absenden der Daten benötigt weniger Zeit als von den Front-End-Systemen. Ein Überlaufschutz ist folglich durch den Trigger-Unterdrückungs-Mechanismus gewährleistet, der auch die FIFO-Speicher in den Front-End-Modulen vor dem Überlaufen schützt (siehe S.59).

#### 4.2.3 Verteilung der Signale an die Tochter-Module

Die Verteilung der Signale von der Zentraleinheit (Mutter) an die Stationen (Töchter) erfolgt durch ein zweistufiges System, bestehend aus einem Sender- und einem Empfänger-Modul (Prinzip siehe Abb. 4.2, Fotos der Module siehe Abb. 4.5). Der Sender wandelt parallele elektrische in serielle optische Signale um. Der Empfänger wandelt die Signale zurück.

Ein Sender ist mit dem Mutter-Modul durch 20 Datenleitungen verbunden. Auf zwei weiteren Leitungen wird das HERA-Taktsignal vom Mutter-Modul auf den Sender übertragen. Die Datenleitungen sowie das Taktsignal werden in einen Parallel-Seriell-

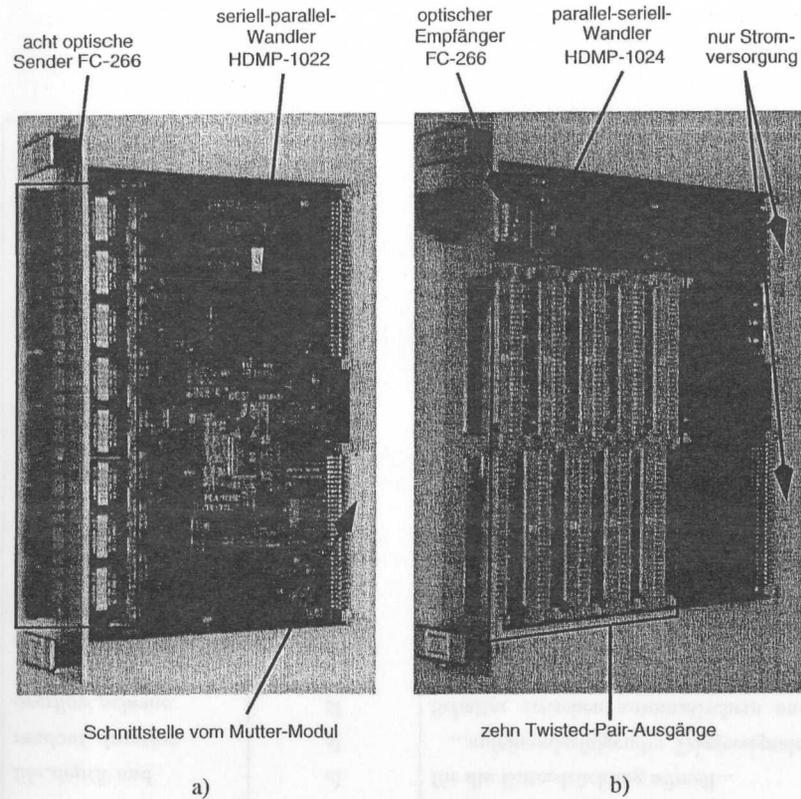
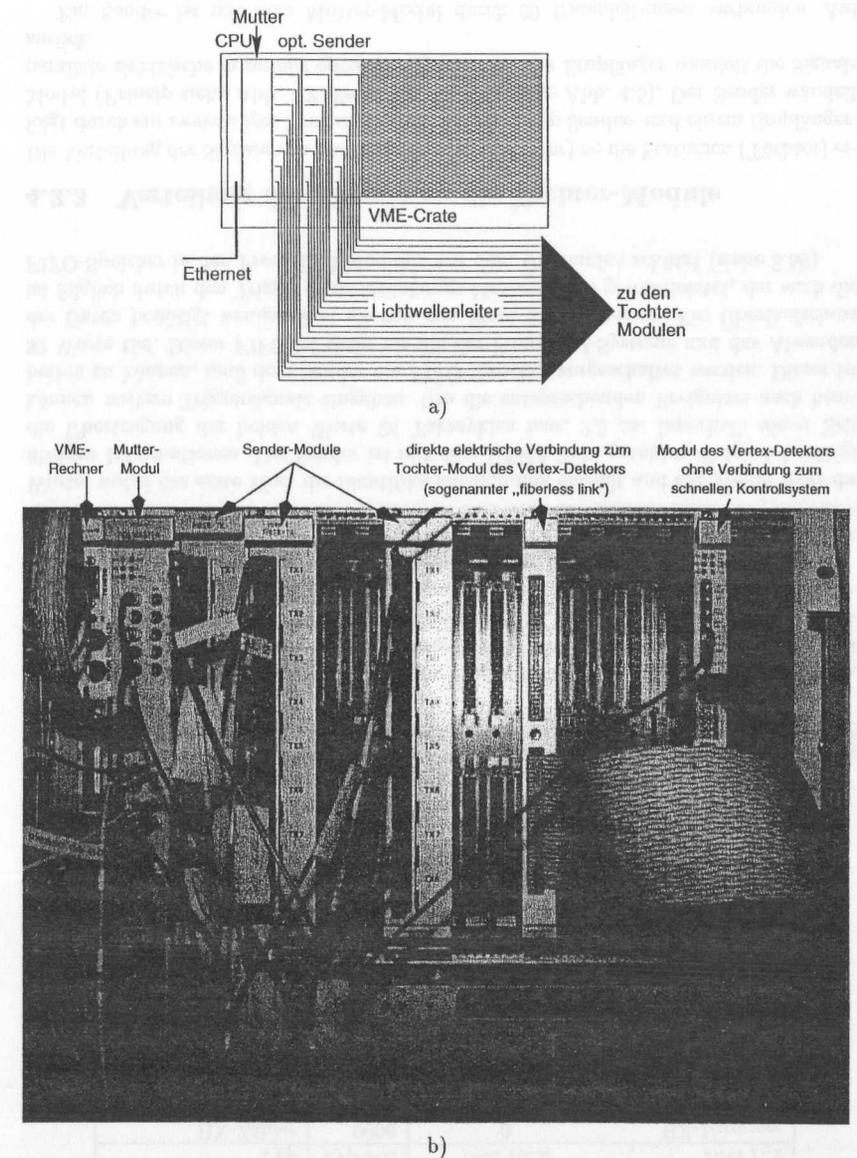


Abb. 4.5: Fotos a) des Sender- und b) des Empfängermoduls

Wandler vom Typ HDMP-1022 des Herstellers Hewlett-Packard geführt, einen sogenannten G-Link. Der serielle Datenstrom aus diesem Chip wird in acht gleiche optische Sender/Empfänger-Bausteine geführt, die hier nur als Sender betrieben werden. In jedem Taktzyklus werden 20 Bit Nutzdaten übertragen. Für die Synchronisation des zugehörigen Seriell-Parallel-Wandlers HDMP-1024 mit dem HDMP-1022 werden pro Taktzyklus vier Bit übertragen. Die Glasfaserleitung wird also mit  $10.417 \text{ MHz} \cdot 24 \text{ Bit} = 250 \text{ MBit/s}$  betrieben. Als optischer Sender/Empfänger wird ein SIEMENS FC-266 eingesetzt, der bis zu  $266 \text{ MBit/s}$  übertragen kann.

Die Sender-Module, die jeweils mit einem HDMP-1022 und acht FC-266 bestückt sind, also die Signale vom Mutter-Modul durch je acht Lichtwellenleiter parallel übertragen, befinden sich gemeinsam mit dem Mutter-Modul in einem VME-Crate (siehe Abb. 4.6).

Abb. 4.6: Das VME-Crate mit Mutter- und Sender-Modulen  
a) schematische Zeichnung b) Foto

Auf der Gegenseite wird je Modul ein SIEMENS FC-266 nur als Empfänger betrieben. Das elektrische Ausgangssignal dieses Bausteins wird in den, bereits erwähnten, HDMP-1024 geführt. Dieser Chip enthält einen spannungsgesteuerten Oszillator, dessen Frequenz zu dem eingehenden Datenstrom synchronisiert wird. Für diese Synchronisation ist die Übertragung der Steuerdaten erforderlich. Die 20 Bit Nutzdaten werden in jedem Taktzyklus parallelisiert und vom Ausgang des Chips an zehn gleiche Ausgänge geführt, an denen sie in LVDS-Signale konvertiert und durch Twisted-Pair-Kabel an die Tochter-Module übertragen werden. So lassen sich mit einem Lichtwellenleiter bis zu zehn Tochter-Module versorgen.

Neben den Daten wird auch das Taktsignal vom Empfänger- an die Tochter-Module übertragen. Mit der Synchronisation der Oszillatoren auf den Empfängern zum Sender-Taktsignal, das vom Mutter-Modul übertragen wird, ist sichergestellt, daß das Taktsignal auf allen Tochter-Modulen synchron zu dem auf dem Mutter-Modul ist. Durch Unterschiede in Kabellängen und damit in Signallaufzeiten sind die Taktsignale jedoch gegeneinander phasenverschoben.

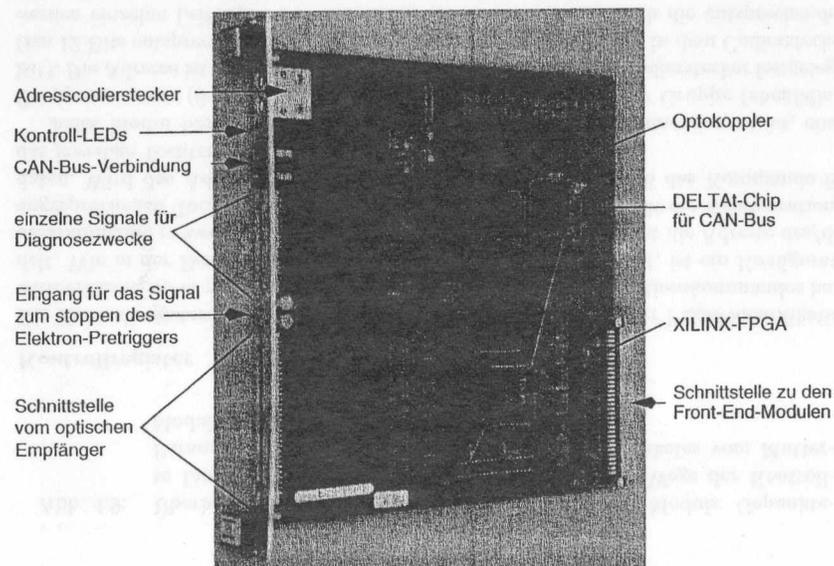


Abb. 4.7: Foto eines Tochter-Moduls

#### 4.2.4 Die Tochter-Module

Die Tochter-Module bilden die Schnittstellen zu den Front-End-, den Trigger-Link- und den Pretrigger-Link-Systemen. Die Funktionalität dieser Module ist in jeweils einem FPGA vom Typ XILINX XC4006E untergebracht. Dieser programmierbare Baustein ist mit einem Eingang vom Empfänger-Modul und einem Ausgang zu den Front-End-

Modulen verbunden. Abb. 4.7 zeigt ein Tochter-Modul, Abb. 4.8 ein Front-End-Crate mit TDC-Modulen des äußeren Spursystems und einem Tochter-Modul des schnellen Kontrollsystems. Insgesamt gibt es ca. 210 Tochter-Module, von denen 180 den gezeigten Fotos entsprechen. Bei den übrigen 30 Modulen ist die gleiche Schaltung auf einer etwas kleineren Platine untergebracht, da die Front-End-Crates von Vertexdetektor, innerem Spurdetektor und Kalorimeter anders aufgebaut sind als die übrigen. Der Leerraum, der im linken Bereich des Fotos durch gerade Leitungen überbrückt wird, entfällt bei diesen.

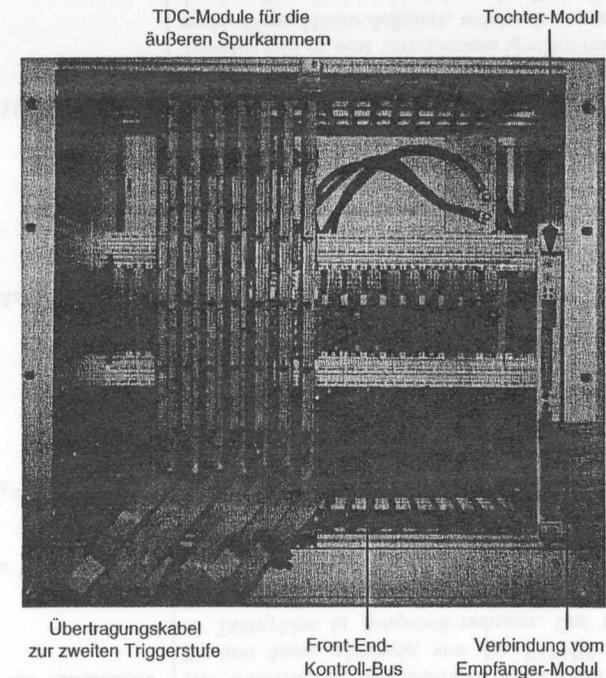


Abb. 4.8: Foto eines TDC-Crates. Die Übertragungskabel von der Driftkammer zur Driftzeit-Meßelektronik sind hier nicht verbunden. Die zahlreichen freien Stecker sind an der Front zu erkennen.

#### Dateneingang

Ein Tochter-Modul erhält in jedem HERA-Taktzyklus ein Datenpaket vom Mutter-Modul. Darin können der Stand des Takt-Zählers, der Stand des Trigger-Zählers, ein Triggersignal mit der zugehörigen Identifikationsnummer oder ein Konfigurations-Kommando enthalten sein. Vier Bit des Paketes geben an, um welche Daten es sich handelt (Paket-Identifikation). Vom Eingang der Tochter-Module werden die empfangenen Daten an eine Kontrollregistereinheit und eine Versetzungseinheit übertragen (siehe Abb. 4.9).

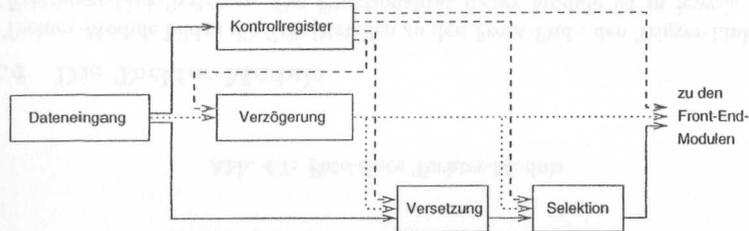


Abb. 4.9: Überblick über die Funktionsblöcke eines Tochter-Moduls. Gepunktete Linie: Weg des Taktsignals, gestrichelte Linie: Wege der Kontrollparameter, durchgezogene Linie: Weg des Datenpaketes vom Mutter-Modul.

### Kontrollregister

Die Kontrollregistereinheit empfängt jedes Datenpaket. Anhand der Paket-Identifikation wird erkannt, ob es sich um eines der beiden Teile eines Konfigurationskommandos handelt. Wie in der Beschreibung des Mutter-Moduls bereits erwähnt, ist ein Konfigurationskommando in zwei Pakete aufgespalten. Dabei enthält ein Paket die Adresse des/der angesprochenen Tochter-Moduls/Module. Das andere Paket enthält die Konfigurationsdaten. Wird das Adreß-Paket erkannt, muß überprüft werden, ob das Kommando für das jeweilige Tochter-Modul gültig ist.

Jedes Modul besitzt eine Adresse, die aus zwei Teilen zusammengesetzt ist, einer Gruppennummer (6 Bit) und einer Tochternummer innerhalb der Gruppe (ebenfalls 6 Bit). Die Adresse ist für jedes Modul mit einem austauschbaren Codierstecker festgelegt. Den 12 Bits entsprechen 12 Leitungen, die unter Spannung stehen. In dem Codierstecker werden einzelne Leitungen mit der Masse verbunden und dadurch die entsprechenden Bits gelöscht. Innerhalb des Tochter-Moduls wird die Adresse, die im eintreffenden Datenpaket enthalten ist, mit der des Codiersteckers und mit Null verglichen (Abb. 4.10). Die Tochternummer Null wird so als Rundruf für eine Gruppe, die Gruppennummer Null wird als Rundruf an alle Tochter-Module interpretiert.

Ist das Kommando als gültig erkannt worden, wird der Kontrollparameter, den das zweite Datenpaket enthält, in das entsprechende Register geschrieben. Die Register und ihre Bedeutung sind in Tab. 4.4 zusammengefaßt.

### Versetzung des Taktzählers

Datenpakete, die kein Konfigurationskommando enthalten, werden zunächst an eine Versetzungs-Einheit übertragen (Abb. 4.9). Hier wird der Datenblock in ein DPRAM geschrieben. Als Schreibadresse wird der Taktzähler verwendet. In jedem Taktzyklus wird ein Datenblock aus dem Speicher gelesen und weitergegeben. Die Leseadresse ist der Taktzähler abzüglich dem (im Kontrollregister definierten) Versatz (vgl. Tab. 4.4). So wird jeder Datenblock, der ein Triggersignal oder einen Stand des Takt- oder Triggerzählers enthält, für eine definierte Anzahl von Taktzyklen zwischengespeichert und damit verzögert. Diese Verzögerung um Vielfache von 96 ns dient dazu, die Zählerstände auf

Tabelle 4.4: Kontrollregister der Tochter-Module

Bezeichnung	Bedeutung
Taktverzögerung	Durch Signallaufzeiten zwischen Mutter- und Tochter-Modul wird das Taktsignal phasenverschoben. Das Register gibt in Schritten von 500 ps an, wie lange das Taktsignal verzögert werden soll, um es wieder zu den Protonenpaketen zu synchronisieren.
Versatz des Taktzählers	Die Übertragung des zentralen Zählerstandes an eine Tochter kann, abhängig von der Kabellänge, mehrere Taktzyklen in Anspruch nehmen. Der Versatz des Zählers muß ausgeglichen werden.
Testpuls-Verzögerung	Ein Testpuls, der an die Front-End-Module gegeben wird, ist in Schritten von 500 ps gegen das Taktsignal verschiebbar.
Testpuls-Trigger-Versatz	Der Testpuls löst auf den Front-End-Modulen aus, daß Testdaten in die Zwischenspeicher geschrieben werden. Ein anschließendes Triggersignal veranlaßt das Senden dieser Daten an die zweite Triggerstufe. Die Speicheradresse wird ermittelt, indem dieser Versatz am Zeitpunkt des Testpulses zum Stand des Taktzählers addiert wird.
strobe-Muster	Die sogenannten <i>strobes</i> sind acht Signale, die auf acht separaten Leitungen an die Front-End-Module gegeben und dort unterschiedlich interpretiert werden. Eines dieser Signale löst in allen Front-End-Module ein Zurücksetzen aus. Die übrigen Signale werden in den TDC-basierten Modulen für die Erzeugung der Testdaten verwendet.
Trigger-Maske	Mit der ersten Triggerstufe, dem VME-Trigger, dem periodischen Trigger, den vier externen Triggern und dem Testpuls gibt es acht verschiedene Quellen für Triggersignale. Diese Maske definiert, welche dieser acht Signale das jeweilige Tochter-Modul an die Front-End-Module weitergeben darf. Das Register enthält acht Bit. Jedes Bit korrespondiert zu einer Trigger-Quelle. Ist ein Bit nicht gesetzt, werden die entsprechenden Triggersignale auf dem Tochter-Modul unterdrückt.

allen Tochter-Modulen zu synchronisieren. Aufgrund von Längenunterschieden der Glasfaserkabel, die Signallaufzeitunterschieden von mehreren 100 ns entsprechen, können die Zähler auf den Tochter-Modulen gegeneinander versetzt sein. In diesem Funktionsblock werden diese Versetzungen ausgeglichen.

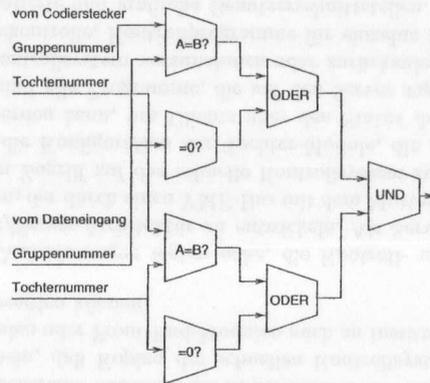


Abb. 4.10: Schaltung, in der im Tochter-Modul geprüft wird, ob ein eingehendes Kommando die Modul-Adresse oder einen Rundruf enthält und dann bearbeitet werden muß.

#### Datenselektion für die Ausgabe an die Front-End-Module

Nach der Versetzung werden die Datenblöcke an die Selektionseinheit gegeben. Dieser Funktionsblock bereitet die Signale für den Ausgang zu den Front-End-Modulen auf (vgl. Abb. 4.9). Hier sind jeweils eine lokale Kopie des Takt- und des Trigger-Zählers vorhanden, deren aktueller Stand jeweils an die Front-End-Module weitergegeben wird.

Der Taktzähler wird mit jedem Taktzyklus inkrementiert, der Trigger-Zähler mit jedem Triggersignal, das vom Mutter-Modul kam. Gibt die Paket-Identifikation an, daß einer der beiden Zählerstände vom Mutter-Modul eingegangen ist, wird der entsprechende Zähler mit dem neuen Wert geladen. Damit wird immer wieder eine Synchronisation der lokalen Zähler zu den zentralen hergestellt.

In der Selektionseinheit werden auch die Triggersignale bearbeitet, die vom Mutter-Modul eingegangen sind. Ein Trigger-Datenpaket enthält als Paket-Identifikation eine Codierung der Trigger-Quelle (siehe Tab. 4.3). Es ist von der Quelle abhängig, ob ein Triggersignal an die Front-End-Module weitergegeben wird. Ein Kontrollregister, die Trigger-Maske (siehe Tab. 4.4), legt fest, welche Triggersignale weitergegeben werden sollen. Die Codierung der Trigger-Quelle wird in der Selektion mit dem Kontrollregister verglichen. Wenn das Triggersignal weitergegeben werden soll, werden die Identifikationsnummer der auszulesenden Speicherzelle, der Trigger-Code sowie ein Trigger-Impuls auf unterschiedlichen Bus-Leitungen an die Front-End-Module übertragen. Die Busleitungen sind in Anhang B erklärt.

#### Taktverzögerung

Wie in Abb. 4.9 zu erkennen ist, wird das Taktsignal verzögert, bevor es an die Versatz- und die Selektionseinheit sowie die Front-End-Module gegeben wird. Diese Verzögerung dient dazu, Signallaufzeiten vom Mutter-Modul zum Tochter-Modul, vom Detektor zum Front-End-Modul sowie Teilchenflugzeiten von der Primärwechselwirkung zum Detektor-Modul auszugleichen. Damit wird das Taktsignal zum Durchgang der Teilchen durch das Detektor-Modul synchronisiert, um als Referenz für Driftzeitmessungen verwendet werden zu können. Für die Verzögerung wird ein digital angesteuerter Baustein verwendet. Die Verzögerungszeit kann in Vielfachen von 500 ps gewählt werden. Der Multiplikator ist in einem Kontrollregister gespeichert (vgl. Tab. 4.4).

#### Service für die Front-End-Systeme

Eine besondere Rolle unter den Konfigurationskommandos nimmt das Testpuls-Kommando ein. Die Kontrollregistereinheit gibt, wenn dieses identifiziert wird, einen Impuls in einen zweiten Verzögerungsbaustein, der ebenso wie der für die Taktverzögerung angesteuert wird. Durch die Wahl des Kontrollparameters zur Testpuls-Verzögerung (Tab. 4.4) kann der Testpuls in Schritten von 500 ps gegen das Taktsignal verschoben werden. Der verzögerte Testpuls wird dann an die Front-End-Module weitergegeben.

Der Testpuls wird auch an die Selektionseinheit gegeben. Die Trigger-Maske enthält, neben den Bestimmungen für die Signale vom Mutter-Modul, auch die Information, ob dem Testpuls ein Triggersignal folgen soll. Ist dies der Fall, wird in der Selektionseinheit ein Triggersignal erzeugt, daß 10 Taktzyklen nach dem Testpuls an die Front-End-Module gegeben wird. Die zugehörige Identifikationsnummer der auszulesenden Speicherzelle wird durch Addition des Testpuls-Trigger-Versatz zum Taktzähler ermittelt.

Als letztes Kontrollregister soll das *strobe*-Muster besprochen werden. Hier handelt es sich um ein 8-bit-Register, dessen Inhalt unmittelbar an die Front-End-Module weitergegeben wird. Zwei Konfigurationskommandos stehen zur Verfügung, um dieses Register anzusprechen: das Register kann statisch beschrieben werden, oder Bits, die eine Null enthalten, können für einen Taktzyklus auf eins gesetzt werden. Sieben dieser acht Signale werden von den TDC-basierten Front-End-Systemen aufgegriffen und definieren dort, welche Daten in die Zwischenspeicher geschrieben werden, wenn ein Testpuls erfolgt.

Eine besondere Rolle nimmt das niederwertigste Bit dieses Registers ein. Es löst, beim Umschalten von eins auf null, das Zurücksetzen der Front-End-Module aus.

#### Vorbereitung eines Überwachungssystems

Schließlich ist für die Überwachung des Kontrollsystems auf jedem Tochter-Modul ein programmierbarer Chip vom Typ IX1 des Herstellers DELTA angeordnet. Dieser kann einige Informationen aus dem XILINX-FPGA auslesen und durch einen CAN-Bus übertragen: die Adresse des Moduls, der Trigger-Zähler, das *strobe*-Muster, die Trigger-Maske sowie drei Flaggen, die im Fall eines Übertragungsfehlers der Glasfaserverbindung, eines Testpulses, und ein Zurücksetzens der Front-End-Module gesetzt werden. Damit bietet sich eine Möglichkeit, zu prüfen, ob Nachrichten auf dem unidirektionalen Weg vom Mutter- zum Tochter-Modul verloren gehen. Bei HERA - B werden an vielen Stellen VME-CAN Schnittstellen vom Typ VMOD-ICAN2 des Herstellers JANZ eingesetzt.

Diese Module sollen auch für die Überwachung des schnellen Kontrollsystems eingesetzt werden.

Bisher wird die CAN-Schnittstelle der Tochter-Module zum Test der gelieferten Module eingesetzt. Durch das Mutter-Modul werden Signale an das jeweilige Modul gesendet und durch den CAN-Bus wird getestet, ob diese angekommen sind [hoc99a].

### 4.3 Kontroll- und Überwachungssoftware

In der Beschreibung des schnellen Kontrollsystems wurde gezeigt, daß für die Konfiguration des Systems, die Übermittlung von Trigger-, *Handshake*- und *Reset*-Signalen sowie die Überwachung des Systems eine VME-Schnittstelle zur Verfügung steht. Diese Schnittstelle muß verschiedenen Kontroll- und Überwachungsprogrammen zugänglich sein.

1. Die zentrale Kontrolle des HERA – B -Datennahmesystems muß in der Lage sein, zu Beginn eines Betriebsabschnittes (sog. *Run*) das schnelle Kontrollsystem zu initialisieren und das Zurücksetzen der Front-End-Systeme zu veranlassen.
2. Für den parallelen, aber unabhängigen Betrieb einzelner Detektorkomponenten müssen verschiedene Steuerprogramme gleichzeitig auf Komponenten des schnellen Kontrollsystems zugreifen können.
3. Grafische Benutzerschnittstellen, anhand derer Benutzer sich über den Status des Systems informieren können, können sinnvoll sein.
4. Kontroll- und Überwachungssoftware für das schnelle Kontrollsystem muß auch außerhalb der zentralen Kontrolle des Experimentes zur Verfügung stehen. Es muß gewährleistet sein, daß Kopien des schnellen Kontrollsystems für den Test von Detektor-Modulen oder Front-End-Modulen auch an Instituten außerhalb des DESY eingesetzt werden können.

Die ersten drei Anforderungen legen nahe, die Kontroll- und Überwachungssoftware in einer *Client/Server*-Architektur zu entwickeln. Als Server soll ein Prozeß auf einem Rechner dienen, der durch einen VME-Bus mit dem Mutter-Modul verbunden ist. Der Server stellt den Zugriff auf das schnelle Kontrollsystem zur Verfügung. Darüber hinaus speichert er die Konfiguration der Tochter-Module, die nicht aus der Elektronik zurückgelesen werden kann, um Clients über den Status der Module informieren zu können. Clients sind alle Programme, die auf den Server zugreifen, um Einstellungen am schnellen Kontrollsystem vorzunehmen oder zurückzulesen. Dazu gehören die HERA – B - Betriebskontrolle, Kontrollprogramme für einzelne Detektorkomponenten, kommandozeilenorientierte und grafische Benutzerschnittstellen. Um allen potentiellen Nutzern die Möglichkeit zu geben, mit wenig Aufwand eigene Clients zu entwickeln, wurde eine Funktionsbibliothek entwickelt. Kontroll- und Überwachungssoftware wird bei HERA – B durchgängig in der Sprache C entwickelt. Deshalb wurde auch für diesen Zweck eine Bibliothek von C-Funktionen erstellt.

Ein Netzwerkprotokoll für die Kommunikation zwischen Server und Clients sowie Funktionen für den Zugriff auf den VME-Bus standen ebenfalls als C-Funktionsbibliotheken zur Verfügung. Deshalb wurde auch der Server in der Sprache C entwickelt.

#### 4.3.1 Verwendete Funktionsbibliotheken

Neben der C-Standardbibliothek (siehe z.B. [ker90]) wurden spezielle Funktionsbibliotheken benutzt, die im folgenden kurz erläutert werden sollen.

##### Zugriff auf den VME-Bus

Für den Zugriff auf Elektronik-Module mittels des VME-Bus werden bei HERA – B Rechner des Herstellers CETIA mit PowerPC-Prozessoren verwendet. Als Betriebssystem kommt auf diesen Rechnern LynxOS zum Einsatz.

Für den Zugriff von diesen Rechnern auf den VME-Bus wird eine Funktionsbibliothek des Herstellers MIZZI Computer Software eingesetzt. Diese Bibliothek stellt Funktionen zur Initialisierung des VME-Adressraumes, Datentypen für den Bus-Zugriff, Funktionen für Schreib- und Lesezugriffe auf den Bus sowie ein Makro zur Behandlung von Zugriffsfehlern zur Verfügung.

##### Das HERA – B -Netzwerkprotokoll RPM

Für das HERA – B -Datennahmesystem wurde ein eigenes Netzwerkprotokoll auf der Basis des *User Datagram Protocol* (UDP) entwickelt. UDP baut direkt auf dem *Internet Protocol* (IP) auf. UDP garantiert weder die Ablieferung eines Datenpaketes beim Zielpartner, noch sind Vorkehrungen gegen eine Duplizierung oder eine Reihenfolgevertauschung getroffen.

Das HERA – B -eigene *Really Powerful Messaging* (RPM) [zwe98] führt derartige Sicherheitsmechanismen ein. Ein Prozeß namens *Namserve* verwaltet die Adressen von Servern, die an der Kommunikation mit RPM teilnehmen. Ein Server, der via RPM Dienste zur Verfügung stellen soll, muß zunächst bei *Namserve* registriert werden. Clients können dann von *Namserve* die Adresse des jeweils gewünschten Servers erfragen.

Die RPM-Funktionsbibliothek stellt Funktionen für die Definition der Nachrichtenformate, das An- und Abmelden sowie Lokalisieren von Prozessen und das Senden, Empfangen und Beantworten von Nachrichten zur Verfügung [zwe98].

##### Die HERA – B -Fehlerregistrierung GRR

Fehler, die im Lauf der Datennahme auftreten, können einem zentralen Prozeß mitgeteilt und von diesem registriert werden. Mit Hilfe einer grafischen Benutzerschnittstelle können diese Meldungen überwacht werden. Die Software für das schnelle Kontrollsystem nutzt Bibliotheksfunktionen sowie vordefinierte Fehler-Codierungen für die Meldung von erkannten Fehlern bei Bus-Zugriffen und der Datenübertragung zwischen Clients und dem Server.

#### 4.3.2 Der Server FCS\_server für das schnelle Kontrollsystem

Der Ablauf des Server-Programmes *FCS\_server* ist in Abb. 4.11 dargestellt. Zu Beginn wird der Ablauf des Programmes vorbereitet sowie alle Module des schnellen Kontrollsystems initialisiert. Im einzelnen umfaßt die Initialisierung die folgenden Vorgänge:

- Formate für Nachrichten werden definiert und der Server wird bei *Namserve* angemeldet.

- Speicher für den Empfang von Nachrichten und für die Abbildung der Zustände aller Tochter-Module wird zugewiesen.
- Der VME-Bus wird initialisiert und die Versionsnummer des Mutter-Moduls wird gelesen.
- Die in Tab. 4.2 aufgeführten Kontrollparameter werden auf Vorgabewerte gesetzt. Die Histogramme und der FIFO-Speicher, der der Verbindung zur L2-Kontrolleinheit vorgeschaltet ist, werden zurückgesetzt.
- Vorgabewerte für die Kontrollregister der Tochter-Module werden aus einer Datei gelesen und die Module entsprechend konfiguriert. Die Konfiguration der Module wird im Speicher des Servers abgebildet.
- Alle Front-End-Module werden zurückgesetzt.

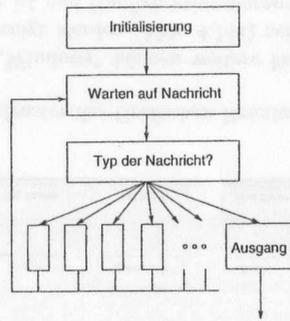


Abb. 4.11: Flußdiagramm des Servers

Nach der Initialisierung tritt der Server in eine Endlosschleife ein. Der Prozeß wartet permanent auf Nachrichten von Clients. Für jede empfangene Nachricht wird ein Teilprogramm ausgeführt. Eine RPM-Nachricht enthält einen Kopf, der u.a. über den Typ der Nachricht Aufschluß gibt. Anhand dieser Information wird in der Hauptschleife des Prozesses entschieden, welches Teilprogramm nun aufzurufen ist. Jedes Teilprogramm ist für bestimmte Aufgaben wie z.B. Zurücksetzen der Front-End-Module, Lesen des Trigger-Unterdrückungs-Histogramms, Setzen oder Lesen eines Kontrollregisters vorgesehen. Nach der Ausführung der jeweils aufgerufenen Funktion geht der Server wieder in den Wartezustand (vgl. Flußdiagramm in Abb. 4.11 und Quelltext in Anhang C).

Eine spezielle Nachricht ist dafür vorgesehen, den kontrollierten Abbruch des Programmes auszulösen. Wird diese Nachricht empfangen, versetzt der Server-Prozeß zunächst das Kontrollsystem in einen definierten Zustand: im Mutter-Modul wird das Kontrollbit für die Unterdrückung von Triggersignalen gesetzt und die periodischen Triggersignale abgeschaltet; alle Tochter-Module werden so konfiguriert, daß die *strobe*-Signale abgeschaltet sind und keine Triggersignale mehr an die Front-End-Module weitergegeben werden. Anschließend gibt der Server reservierten Speicher frei, meldet sich beim *Namserve*-Prozeß ab und hält an. Wenn der Server ein *kill*-Signal vom Betriebssystem erhält, bricht der Server in der gleichen Weise kontrolliert ab.

### 4.3.3 Die Client-Bibliothek libfsc.a

Wie eingangs des Abschnittes über die Software erwähnt, sollten Client-Funktionen zur Verfügung gestellt werden, die von der, durchgängig in der Programmiersprache C entwickelten, Kontroll- und Überwachungs-Software verschiedener Arbeitsgruppen eingebunden werden können. Diese Funktionen müssen auf allen *Online*-Rechnern der HERA - B -Datennahme-Umgebung zur Verfügung stehen. Dies erfordert die Umsetzung für die Betriebssysteme Solaris, Linux, LynxOS, IRIX und AIX.

Insgesamt stehen ca. 30 Funktionen zur Verfügung [ful99], die alle ähnlich aufgebaut sind (Abb. 4.12). Beim ersten Aufruf einer dieser Funktionen innerhalb eines Programmes werden, wie beim Start des Servers, die Formate der Nachrichten definiert, dann wird durch eine Anfrage bei *Namserve* der Server lokalisiert. Eine Flagge wird gesetzt, anhand derer bei späteren Aufrufen von Client-Funktionen innerhalb des selben Programmes erkannt wird, daß diese Initialisierung der RPM-Schnittstelle stattgefunden hat und nicht erneut ausgeführt werden muß.

Anschließend werden Parameter, die beim Funktionsaufruf übernommen wurden, in eine Nachricht verpackt. Verschiedene Typen von Nachrichten, die sich im Format ihres Inhaltes unterscheiden, stehen zur Verfügung. Welcher Typ verwendet wird, ist jeweils in der Funktion festgelegt. Nach der Erstellung wird die Nachricht an den Server gesendet. Die meisten Funktionen dienen dazu, Aufträge zur Konfiguration der Elektronik oder zur Erzeugung von Signalen an den Server zu senden und enden nach dem Absenden der Nachricht. Einige Funktionen fordern jedoch Parameter der Elektronik oder die Histogramme vom Server ab. Diese warten nach dem Abschicken der Anfrage auf die Antwort. Diese Funktionen extrahieren abschließend Rückgabewerte aus der Antwort-Nachricht.

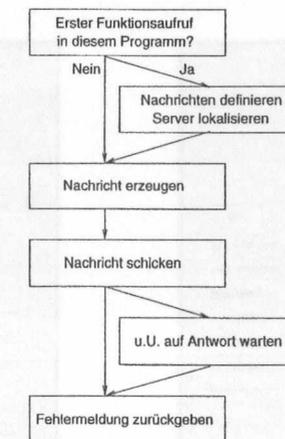


Abb. 4.12: Flußdiagramm einer typischen Client-Funktion

#### 4.3.4 Benutzerschnittstellen

Zum Testen der Bibliotheksfunktionen und als Beispielprogramm für Anwendungsentwickler wurden zwei Programme geschrieben, die Kommandos und Parameter, die per Tastatur eingegeben werden, in RPM-Nachrichten umsetzen und diese an den Server schicken. `FCS_setMother` dient speziell dazu, die Kontrollparameter des Mutter-Moduls zu konfigurieren. `FCS_send` stellt verschiedene Funktionen zur Initialisierung und Konfiguration von Mutter- und Tochter-Modulen sowie zum Senden von Triggersignalen und Testpulsen zur Verfügung.

Mittlerweile werden in der HERA - B -Online-Umgebung anstelle von C-Programmen häufig Shell-Scripts verwendet, die `tt FCS_send` als Schnittstelle zur Client-Funktionsbibliothek verwenden.

Für gezielte Konfiguration einzelner Module oder die einfache Information über den Status des Systems oder einzelner Module wurde auch eine grafische Benutzerschnittstelle `fcs` entwickelt. Hier wurde in der Sprache Tcl/Tk ein Script entwickelt, daß auf die Funktionen der Client-Bibliothek `libfcs.a` zugreift. Abb. 4.13 zeigt das Hauptfenster dieses Programmes.

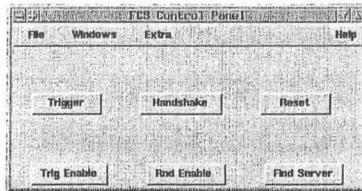


Abb. 4.13: Hauptfenster der Grafischen Benutzerschnittstelle `fcs`

Unter dem Menüpunkt „Windows“ können weitere Fenster aufgerufen werden, die auf den folgenden Seiten gezeigt werden. Abb. 4.14a) zeigt ein Fenster, mit dem das Mutter-Modul konfigurierbar ist und Konfigurationsparameter zurückgelesen und angezeigt werden können, Abb. 4.14b) eines, in dem `BX.Tag` sowie die verschiedenen Unterdrückungs-Zähler angezeigt werden. In Abb. 4.15 ist ein Trigger-Latenzzeit-Histogramm dargestellt, das mit diesem Programm abgefragt wurde. Schließlich zeigt Abb. 4.16 ein Fenster mit vielfältigen Funktionen zur Konfiguration der Tochter-Module, die mit den verschiedenen Subdetektoren verbunden sind.

#### 4.3.5 Ein Programm für direkte Hardware-Zugriffe

Als schnelle, unkomplizierte Möglichkeit für Benutzer eines VME-Kontrollrechners, auf die Elektronik zuzugreifen, wurde `FCS_set` als einfaches Programm erstellt, das per Tastatur eingegebene Kommandos unmittelbar in VME-Zugriffe umsetzt.

Insbesondere ist dieses Programm in Testaufbauten nützlich, die an anderen Instituten, außerhalb des DESY, betrieben werden, da es nicht auf den Betrieb des Netzwerkprotokoll RPM und des `Namserve`-Prozesses angewiesen ist.

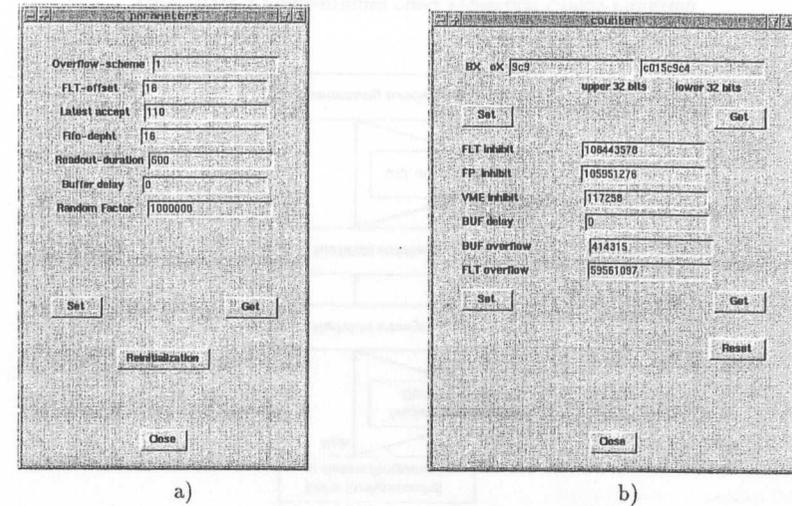


Abb. 4.14: a) Fenster zur Steuerung und Überwachung der Kontrollparameter des Mutter-Moduls b) `BX.Tag`-Zähler und Unterdrückungs-Zähler

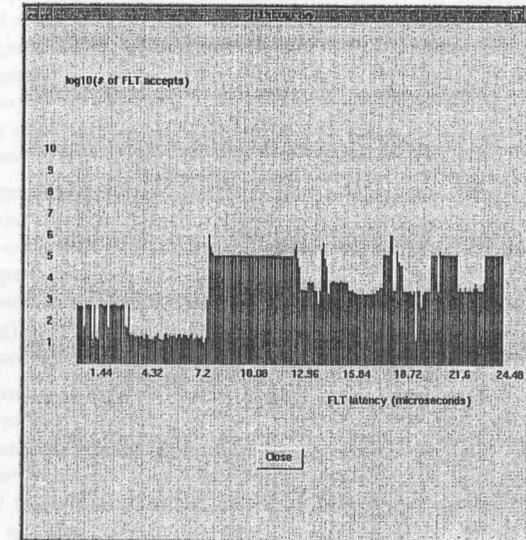


Abb. 4.15: Ein Trigger-Latenzzeit-Histogramm, ausgelesen und angezeigt durch die grafische Benutzerschnittstelle

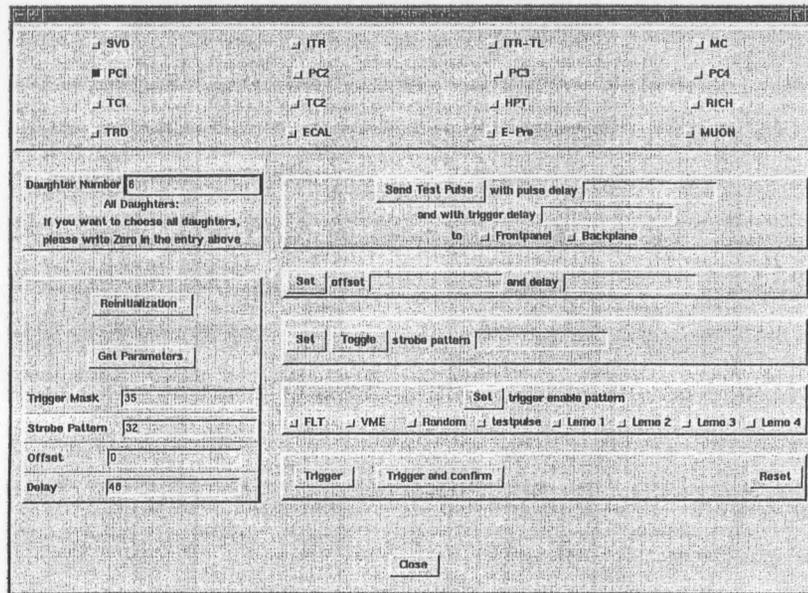


Abb. 4.16: Fenster mit Funktionen zur Konfiguration der Tochter-Module

## Kapitel 5

### Analyse der Zeitreferenz- und Triggersignale

#### 5.1 Verzögerung des Taktsignals auf dem Tochter-Modul

Wie in Abschnitt 4.2.4 dargelegt, sollen unterschiedliche Teilchenflugzeiten vom Target zu den Detektor-Modulen und unterschiedliche Signallaufzeiten sowohl zwischen Detektor und Front-End-Modulen als auch zwischen Mutter- und Tochter-Modulen des schnellen Kontrollsystems dadurch ausgeglichen werden, daß das Taktsignal in jedem Tochter-Modul vor der Weitergabe an die Front-End-Systeme in einem *Delay-Chip* 3D 7408 verzögert wird. Diese Bausteine werden digital angesteuert. Die Verzögerungszeit kann durch Setzen eines entsprechenden Kontrollregisters (vgl. Tab. 4.4) für jedes Tochter-Modul individuell in Schritten von 500 ps bestimmt werden.

Mit dem Meßaufbau, der in Abb. 5.1 gezeigt wird, wurde die Einstellbarkeit der Verzögerungszeit überprüft. Ein Tochter-Modul wurde dabei als Referenz eingesetzt. Die Verzögerung in diesem Modul wurde auf null gesetzt. Ein zweites Modul wurde über eine separate Glasfaserverbindung mit demselben Mutter-Modul verbunden. Beide Lichtwellenleiter waren jeweils 50 m lang. Die elektrische Verbindung vom jeweiligen Empfänger zum Tochter-Modul erfolgte bei einem Modul durch 3 m, beim anderen Modul durch 4 m Twisted-Pair Kabel. Die Komponenten, durch die das Taktsignal in diesem Aufbau übertragen wird, sind in Abb. 5.2 zusammengestellt.

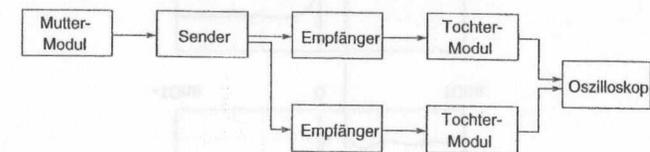


Abb. 5.1: Aufbau für die Messung der Signalverzögerungen

Mit unveränderter Einstellung des Referenz-Tochter-Moduls wurden für das zweite Tochter-Modul verschiedene Taktverzögerungen eingestellt. Die Abbildungen 5.3 und 5.4 zeigen Vergleiche der Taktsignale am Ausgang zweier Tochter-Module mit verschiedenen Einstellungen des Parameters. Abb. 5.3 zeigt große Verschiebungen, Abb. 5.4 kleine. Alle Bilder wurden mit einem digitalen Speicheroszilloskop Tektronix TDS 784A FV aufgenommen.

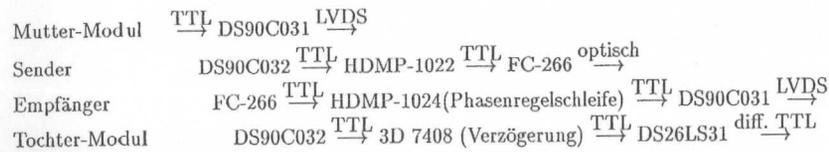


Abb. 5.2: Übertragung des Taktsignals vom Mutter- zum Tochter-Modul. Die Komponenten, die z.T. auch in der Systembeschreibung erwähnt wurden, sind:

DS90C031/32: LVDS-Treiber/Empfänger,  
 HDMP-1022/24: Seriell-Parallel- bzw. Parallel-Seriell-Wandler,  
 FC-266: optischer Sender/Empfänger,  
 3D 7408: Verzögerungsbaustein,  
 DS26LS31: differentieller TTL-Treiber.

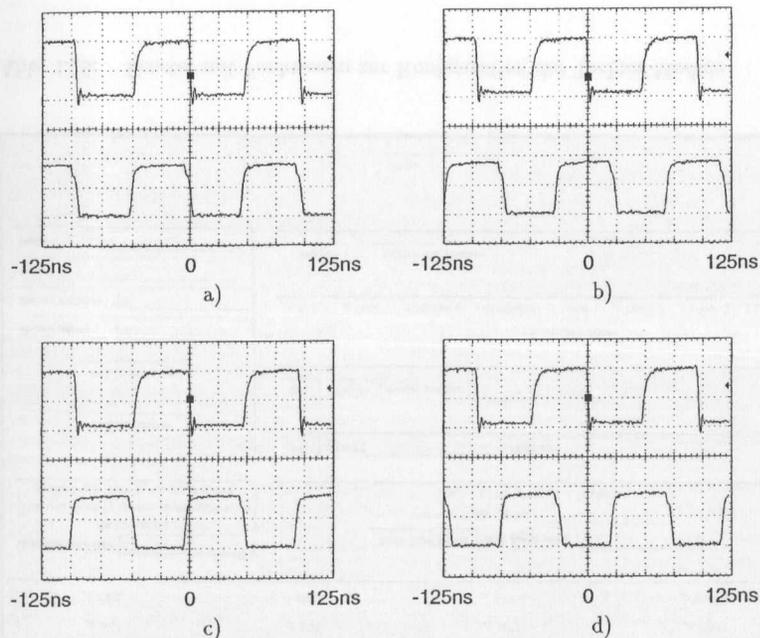


Abb. 5.3: Messung von verschiedenen Signalverzögerungen auf einem Tochter-Modul relativ zu einem anderen. Die Zeitskala ist in allen Einzelbildern 25 ns/Teiler. Die Messung wird im Text erläutert.

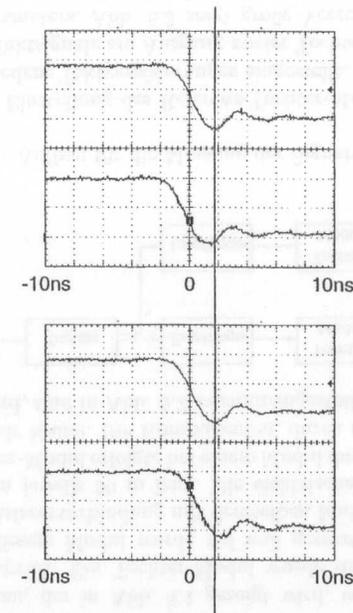


Abb. 5.4: Das Taktsignal von einem Tochter-Modul ist um  $\pm 0,5$  ns gegen das vom Referenz-Modul verzögert. Diese Schrittweite ist kleiner als die Abfallzeit des Signals. Die Verschiebung des Minimums, das der fallenden Flanke folgt, ist trotz der recht groben Zeitskala von 2 ns/Einheit anhand der Hilfslinie gut zu erkennen.

In jedem Einzelbild beider Abbildungen ist in der oberen Hälfte das Taktsignal aufgezeichnet, das vom Referenz-Modul an die verbundenen Front-End-Module weitergegeben wird, in der unteren Hälfte das Taktsignal des zweiten Tochter-Moduls.

Der Delay-Parameter des Referenz-Moduls wurde bei null festgehalten. Die Einstellungen des zweiten Moduls, mit denen die Aufnahmen in Abb. 5.3 entstanden, waren:

- 180 Einheiten (beide Signale phasengleich, Bild a),
- 36 Einheiten (unteres Signal um  $-72$  ns gegen oberes verschoben, Bild b),
- 84 Einheiten (unteres Signal  $-48$  ns verschoben, Bild c) und
- 132 Einheiten (Verschiebung  $-24$  ns, Bild d).

Der Wert 180, bei dem beide Signale phasengleich sind, ist durch äußere Kabellängen und Nullpunktverschiebungen der Delay-Chips gegeben. Er ist also spezifisch für diesen Aufbau.

Abb. 5.4 zeigt die Verschiebung der beiden Taktsignale gegeneinander in kleinen Schritten. Aufgrund der feineren Zeitskala ist nur die fallende Flanke beider Signale im Bild. Die Abfallzeit ist ca. 3 ns. Im oberen Bild ist das untere Signal um  $-0,5$  ns ( $\cong 1/4$  Skalenteiler) gegen das obere verschoben, im unteren Bild um  $+0,5$  ns. Die Verzögerung



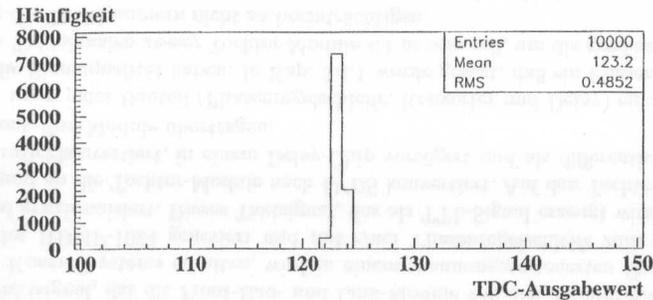


Abb. 5.7: Messungen der Zeitdifferenz der Taktsignale vom Mutter- und einem angeschlossenen Tochter-Modul

Es ist noch anzumerken, daß diese Messungen mit einer neu gestalteten Version des Glasfaser-Empfänger-Moduls im schnellen Kontrollsystem durchgeführt wurden, von der bis dato nur zwei Module existieren. Bild 4.5 zeigt eines dieser beiden Module. Das Empfänger-Modul in der bisher produzierten Form fügt dem Taktsignal größere Unsicherheiten bei: mit dem gleichen Aufbau erhält man zwei verschiedene TDC-Ausgabewerte mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit. In dem Beispiel, das in Abb. 5.8 gezeigt wird, liegen die beiden Werte etwa 1,5 ns auseinander. Abweichungen zwischen 1 ns und 3 ns wurden beobachtet, die offenbar mit dem Trigger-Zähler, der in jedem zweiten Taktzyklus durch das Modul übertragen wird, zusammenhängen. Der Unterschied im Aufbau der Module liegt darin, daß sich die HDMP-1024, in denen sich die Phasenregelschleifen befinden, in der älteren Version auf kleinen Huckepack-Platinen befanden, während sie in der neueren Version direkt auf der Hauptplatine angebracht werden.

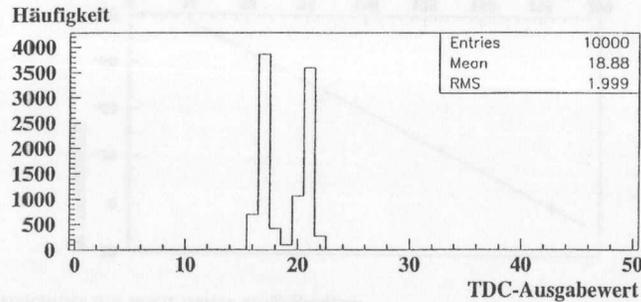


Abb. 5.8: Messungen der Zeitdifferenz der Taktsignales vom Mutter- und einem angeschlossenen Tochter-Modul unter Verwendung eines schlechten Empfänger-Moduls

Eine Messung mit einer direkten elektrischen Verbindung zwischen Mutter- und Tochter-Modul, die in Testaufbauten die kostspielige optische Verbindung ersetzen kann,

führt zum gleichen Ergebnis wie die Messung mit optischer Verbindung und dem umgestalteten Empfänger-Modul.

### 5.3 Testpuls-Messungen

Testpulse dienen dem Test der Front-End-Module. Sie sollen veranlassen, daß bestimmte Daten in die Zwischenspeicher der Front-End-Module geschrieben werden. Bild 5.9 zeigt ein Testpuls- und das zugehörige Triggersignal mit Bezug zum Taktsignal. Im oberen Drittel der Abb. ist das Taktsignal am Ausgang eines Tochter-Moduls zu sehen. Die Zeitskala der Abbildung, die ebenfalls mit dem Tektronix TDS 784A FV aufgenommen wurde, beträgt 100 ns/Einheit. Darunter ist ein Testpuls am Ausgang desselben Tochter-Moduls angezeigt. Der Testpuls wird durch zwei Leitungen differentiell übertragen. Hier ist nur das positive Signal dargestellt. Es handelt sich um einen Puls von 48 ns Länge. Damit die Testsignale anschließend aus den Zwischenspeichern der Front-End-Systeme gelesen werden, muß dem Testpuls ein Triggersignal folgen. Dieses Signal, ein negativer Puls von 96 ns Länge, ist ganz unten im Bild zu sehen.

Im Driftzeit-Meßsystem wird die Zeit vom Eingang eines differentiellen Testpulses bis zur nächsten fallenden Flanke des Taktsignals gemessen. Diese Zeit ist in Abb. 5.9 als „TDC-Zeitmessung“ eingezeichnet.

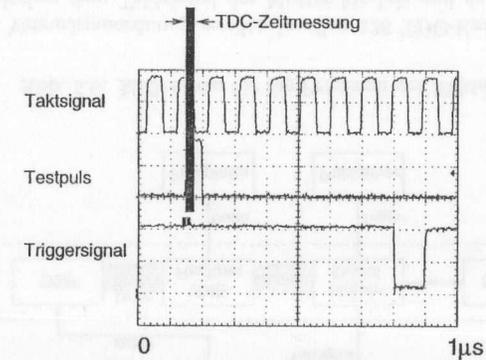


Abb. 5.9: Dieses Bild zeigt oben das Taktsignal, in der Mitte einen Testpuls und unten das zugehörige Triggersignal, parallel am Ausgang eines Tochter-Moduls gemessen. Die Zeit vom Start- zum Stop-Signal der TDC-Messung ist markiert.

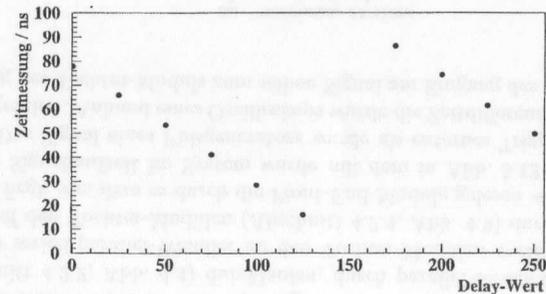
Der Testpuls wird erzeugt, indem ein vom Taktsignal abgeleitetes, synchrones Signal in einen Delay-Baustein gegeben wird, baugleich dem, der zum Verzögern des Taktsignals selbst verwendet wird. Damit kann ein Testpuls in Schritten von 0,5 ns gegen das Taktsignal verzögert werden. Zum Zeitpunkt der Erzeugung des Pulses (vor dem Delay-Chip) wird der aktuelle Stand des Taktzählers festgehalten. Durch Addition einer programmierbaren Verschiebung (*offset*), die auf Signallaufzeiten innerhalb des jeweiligen

Front-End-Systems abgestimmt werden muß, wird daraus die Identifikationsnummer der auszulesenden Speicherzelle ermittelt, die mit dem Triggersignal übertragen wird.

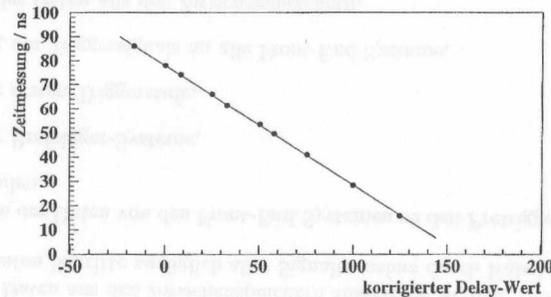
Für das Driftzeitmeßsystem ist diese Verschiebung bei kleinen Testpuls-Verzögerungen  $offset=1$ . Wird die Signallaufzeit des Testpulses so groß, daß der Testpuls in den nächstfolgenden Taktzyklus rückt, muß  $offset=2$  gewählt werden. Neben der gewählten Verzögerungszeit trägt auch die Grund-Durchlaufzeit, die von Chip zu Chip variiert, bei. Deshalb unterscheidet sich der Delay-Wert, bei dem der  $offset$  geändert werden muß, von Modul zu Modul.

Der Testpuls wird als Startsignal der Zeitmessung verwendet. Eine größere Verzögerung des Testpulses führt also zu kleineren Meßwerten. Fällt der Testpuls mit dem Stop-Signal zusammen, so führen kleine Variationen der Verzögerung zu Sprüngen der Zeitmessung von 0 bei  $offset=1$  zu 96 ns bei  $offset=2$ .

### 5.3.1 Linearität der Verzögerung



a)



b)

Abb. 5.10: Zeitmessung in Relation zur jeweils eingestellten Verzögerungszeit.

a) Originalwerte

b) Von Delay-Werten > 150 wurde 192 subtrahiert.

Bei verschiedenen Verzögerungen wurden jeweils 1000 Zeitmessungen mit einem Front-End-Modul, also 128 Meßkanälen vorgenommen. Für jede Einzelmessung wurde wie zu-

vor der Mittelwert der 128 Kanäle gebildet, um eine von Unsicherheiten eines einzelnen TDC-Kanals unabhängige Messung zu erhalten. In Abb. 5.10a) ist jeweils der Mittelwert von 1000 Messungen und 128 Kanälen pro Messung gegen die Testpuls-Verzögerung aufgetragen. Die gemessene Zeit hängt wie erwartet von der Verzögerung ab.

Man möchte die Linearität des Delay-Chips über den gesamten Meßbereich des TDC-Chips überprüfen. Um dies zu ermöglichen, wird von den Delay-Werten > 150 jeweils 192 subtrahiert. Der Wert 192 entspricht bei einer Schrittweite von 0,5 ns genau einem Taktzyklus von 96 ns. Abb. 5.10b) zeigt die Meßwerte nach dieser Anpassung nebst einer Regressionsgerade. Die Geradengleichung wurde bei einem Korrelationskoeffizient von 0,9999 zu

$$\text{Zeit} = 77,96 \text{ ns} - 0,495 \text{ ns} \cdot \text{Delay} \quad (5.1)$$

bestimmt. Die Abweichungen der Meßwerte von dieser Geraden liegen im Bereich  $\pm 0,23$  ns, verträglich mit Abb. 5.7.

Diese Messung zeigt deutlicher als Abb. 5.5, daß die Delay-Chips in sehr guter Näherung linear sind. Eine Untersuchung in [per98] bestätigt dies ebenfalls.

Der Delay-Wert, bei dem die Zeitmessung null ergibt, ist nicht interessant. Für die Schrittweite, die vom Hersteller mit 500 ps angegeben wird, wurden bei verschiedenen Tochter-Modulen Werte zwischen 487 ps und 496 ps ermittelt.

### 5.3.2 Präzision der Verzögerung

Im folgenden wird die Frage nach der Präzision der Durchlaufzeit noch einmal kurz aufgegriffen. Abb. 5.11 ist für jeden Meßpunkt der vorangegangenen Betrachtung die Standardabweichung der jeweils 1000 Meßwerte gegen die gewählte Verzögerung aufgetragen.

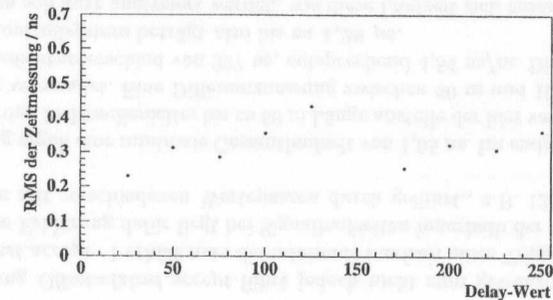


Abb. 5.11: Unsicherheit der Zeitmessung abhängig von der Verzögerung

Es ist keine signifikante Abhängigkeit der Standardabweichung von der Verzögerung zu erkennen. Aussagen in [per98] sowie Testmessungen an den isolierten Chips [hoc99a] bestätigen dies. Die Abweichungen liegen zwischen  $0,25 \text{ ns} \leq \text{RMS} \leq 0,43 \text{ ns}$ . Aus Abb. 5.7 wurde aufgrund der größeren Anzahl der Ereignisse eine etwas geringere Abweichung ermittelt. Die Abweichungen sind kleiner als die Einstell-Schrittweite der Signalverzögerung und erfüllen die Anforderungen des äußeren Spurkammersystems (vgl. Abschnitt 3.4.1).

## 5.4 Laufzeit von Triggersignalen

Meßdaten werden in den Front-End-Systemen für 128 Taktzyklen, d.h. für  $12,3 \mu\text{s}$  zwischengespeichert, bevor sie überschrieben werden. In diesem Zeitraum muß die Entscheidung der ersten Triggerstufe gefällt, ggf. das Triggersignal an die Front-End-Systeme verteilt und die Daten aus den Zwischenspeichern ausgelesen werden. Dafür sind die im folgenden genannten Schritte zuzüglich aller Signaltransfers durch Kabel erforderlich:

- Übertragen der Daten von den Front-End-Systemen zu den Pretrigger und Trigger-Link-Modulen,
- Arbeit der Pretrigger-Systeme,
- Arbeit der ersten Triggerstufe,
- Verteilung des Triggersignals an alle Front-End-Systeme,
- Auslesen der Daten aus den Zwischenspeichern.

Im schnellen Kontrollsystem muß das Signal die logische Schaltung des Mutter-Moduls (Abschnitt 4.2.2, Abb. 4.4) durchlaufen, durch parallel-seriell-Wandler, Lichtwellenleiter und seriell-parallel-Wandler zu den Tochter-Modulen verteilt werden und die Schaltung auf den Tochter-Modulen (Abschnitt 4.2.4, Abb. 4.9) durchlaufen, bevor es auf dem Bus liegt, von dem es durch die Front-End-Module gelesen wird.

Die gesamte Signallaufzeit im System wurde mit dem in Abb. 5.12 gezeigten Aufbau gemessen. Das Signal eines Pulsgenerators wurde als externes Triggersignal in das Mutter-Modul geführt. Anhand eines Oszilloskops wurde die Zeitdifferenz des Triggersignals am Ausgang des Tochter-Moduls zum selben Signal am Eingang des Mutter-Moduls gemessen.

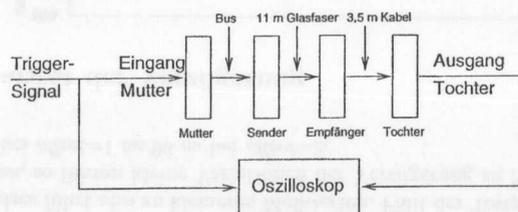


Abb. 5.12: Meßaufbau für die Signallaufzeit des schnellen Kontrollsystems.

Zur Sortierung der Triggersignale nach aufsteigender Identifikationsnummer (Abschnitt 4.2.2, Seite 58) wird ein Triggersignal im Mutter-Modul zwischengespeichert. Zur Messung der minimalen Latenzzeit müssen die Parameter *Offset* und *latest\_accept* (vgl. Tab. 4.2) so eingestellt werden, daß das Signal aus dem Zwischenspeicher sofort weitergegeben wird. Dem von einem Pulsgenerator stammenden Triggersignal wird der Aktuelle BX-Zählerstand abzüglich des *Offset*-Wertes als Identifikationsnummer zugeordnet:

$$\text{BX\_FLT} = \text{BX} - \text{Offset}.$$

Das Signal wird von der Sortier-Einheit innerhalb des Mutter-Moduls (Abb. 4.4) festgehalten, bis der BX-Zähler um *latest\_accept* größer ist als die Identifikationsnummer;

$$\text{BX\_FLT} + \text{latest\_accept} = \text{BX}.$$

Die Folgerung  $\text{Offset} = \text{latest\_accept}$  führt jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Bei  $\text{Offset} = \text{latest\_accept} - 1$  erhält man die minimale Laufzeit eines Triggersignals durch das System. Die Erklärung dafür liegt bei Signallaufzeiten innerhalb der Elektronik. Die Messung wurde mit verschiedenen Wertepaaren durchgeführt, z.B. 126/127, 109/110 und 59/60.

Die Messung ergab eine minimale Gesamtlaufzeit von  $1,05 \mu\text{s}$ . Im endgültig eingesetzten System werden Lichtwellenleiter bis zu 60 m Länge anstelle der hier verwendeten 11 m langen Leitung verwendet. Eine Differenzmessung zwischen 60 m und 10 m Kabellänge ergab einen Laufzeitunterschied von 227 ns, entsprechend  $4,54 \text{ ns/m}$ . Die Signallaufzeit im schnellen Kontrollsystem beträgt also bis zu  $1,28 \mu\text{s}$ .

Im folgenden soll kurz analysiert werden, wie diese Laufzeit sich zusammensetzt. Die HDMP 1022/1024 (Wandlung parallel-seriell und seriell-parallel) benötigen jeweils einen Taktzyklus (96 ns). Die Signallaufzeit im Lichtwellenleiter liegt bei  $4,54 \text{ ns/m}$ , bei einer maximalen Kabellänge von 60 m also 270 ns. Dazu kommen Schaltzeiten verschiedener Signalkonverter sowie die Kabelverbindung vom Verteiler- zum Tochter-Modul. Diese kleineren Zeiten summieren sich zu einem halben Taktzyklus (50 ns). Die Signallaufzeit vom Ausgang des Mutter- zum Eingang des Tochter-Moduls beträgt also bis zu 510 ns. Daraus ergibt sich, daß die logischen Schaltungen auf dem Mutter- und einem Tochter-Modul in der Summe 770 ns benötigen, was genau acht 96-ns-Taktzyklen entspricht. Die Zeiten sind in Tab. 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Laufzeit eines Triggersignals im schnellen Kontrollsystem

Komponente	Durchlaufzeit
HDMP 1022/1024	200 ns
Lichtwellenleiter	270 ns
Konverter, kurze Übertragungsstrecken	50 ns
Logik, Mutter + Tochter	770 ns
Summe	$1,28 \mu\text{s}$

Die acht Taktzyklen innerhalb der Elektronik sind (vgl. Abb. 4.4 und 4.9): 1. Zuweisen der Trigger-Nummer, 2.+3. Sortier-Schaltung (2 Zyklen), 4. Unterdrückungs-Schaltung, 5. Schnittstelle zum Sender-Modul, 6. Dateneingang des Tochter-Moduls, 7. Schaltung innerhalb des Tochter-Moduls, 8. Ausgabe an die Front-End-Module.

Damit verbleiben  $11 \mu\text{s}$  für die Arbeit der übrigen Systeme. Die neueste Abschätzung [ger98] ergab, daß die Entscheidung der ersten Triggerstufe zwischen  $5,6 \mu\text{s}$  und  $9,3 \mu\text{s}$  nach dem Ereignis von der *Trigger Decision Unit* an das schnelle Kontrollsystem abgesendet wird. Die Zeiten können so stark variieren, weil die Pretrigger-Systeme unterschiedlich viel Zeit beanspruchen und weil für die Verfolgung einer Myon-Spur drei

Tabelle 5.2: Aufteilung der  $12,3 \mu\text{s}$ , während derer Daten in den Front-End-Systemen zwischengespeichert sind, auf die erste Triggerstufe und das schnelle Kontrollsystem

Komponente	Durchlaufzeit
Erste Triggerstufe	$\leq 9,3 \mu\text{s}$
Übertragung an das schnelle Kontrollsystem	50 ns
Schnelles Kontrollsystem (siehe Tab. 5.1)	1,28 $\mu\text{s}$
Auslese der Meßdaten	96 ns
Summe	$\leq 10,75 \mu\text{s}$
Reserve = $12,3 \mu\text{s}$ – Summe	$\geq 1,55 \mu\text{s}$

Detektor-Superlagen und damit auch drei *Track Finding Units* mehr einbezogen werden, als für eine Elektron- oder „High- $p_T$ “-Spur. Ein Taktzyklus, also 96 ns, wird von den Front-End-Systemen benötigt, um die Daten aus den Zwischenspeichern auszulesen. 50 ns beträgt die Übertragungszeit von der TDU zum schnellen Kontrollsystem. Diese Zeiten sind in Tab. 5.2 zusammengestellt. Die dort angegebene Reserve steht für den Fall zur Verfügung, daß bei Ereignissen mit überdurchschnittlich hoher Multiplizität einzelne TFUs oder TPUs mehr Zeit benötigen.

## 5.5 Annahme von Nachrichten von der ersten Triggerstufe

Die *Trigger Decision Unit* steht noch nicht zur Verfügung. Die Übertragung von Nachrichten an das schnelle Kontrollsystem kann jedoch mit dem sogenannten *Testboard* der ersten Triggerstufe getestet werden. Dabei handelt es sich um ein Modul mit einem Mikroprozessor Motorola 68060, das diejenigen Schnittstellen besitzt, die innerhalb der ersten Triggerstufe und zwischen der ersten Triggerstufe und anderen Komponenten des Datennahmesystems verwendet werden.

Auf dem Mikroprozessor wurden verschiedene Testprogramme ausgeführt, die mit konstanten Frequenzen konstante Zahlen oder Zufallszahlen als Ereignis-Identifikationsnummer an das schnelle Kontrollsystem sendeten. Da es keine andere Beziehung zwischen diesem Programm und dem BX-Zähler des schnellen Kontrollsystems gibt, ist es bei jeder Übertragung zufällig, ob die Nummer als rechtzeitig oder als zu spät eingestuft wird, ob also ein Eintrag in den Zeitüberlaufs-Zähler (vgl. Tab. 4.1) vorgenommen oder die Nummer zur Verarbeitung weitergeleitet wird.

Die Übertragungsrate von der ersten Triggerstufe zum schnellen Kontrollsystem wird im fertigen Experiment im Mittel  $\approx 50$  kHz betragen, mit kurzzeitigen Spitzenwerten bis zu  $\approx 100$  kHz. Die Übertragungsrate vom Testboard ist durch die Geschwindigkeit der Programme auf dem Mikroprozessor auf ca. 200 kHz limitiert und kann darunter durch Programmänderungen beeinflusst werden. Die relevante Bandbreite wird also durch das Testboard abgedeckt.

Wenn im schnellen Kontrollsystem die Software-Sperre für Triggersignale eingeschaltet ist, werden alle Signale, die die Zeitprüfung überstehen, vom Software-Sperr-Zähler

erfaßt. In der Summe der beiden Zähler Zeitüberlauf und Software-Sperre erwartet man also die Gesamtzahl der vom Testboard gesendeten Nachrichten wiederzufinden. Der Anteil der Nachrichten, die die Zeitüberprüfung überstehen, wird durch den Parameter *latest\_accept* definiert. Die Tests waren erfolgreich; die Nachrichten wurden bei verschiedenen Übertragungsraten korrekt gezählt.

## Kapitel 6

# Das System im Datennahmebetrieb

### 6.1 Integration des schnellen Kontrollsystems

Im vorigen Kapitel wurde das Zeitverhalten der elektrischen Signale, die vom schnellen Kontrollsystem verteilt werden, analysiert. Die komplexen logischen Funktionen des Systems sind z.T. nicht isoliert zu testen, sondern nur in Verbindung mit den Systemen, mit denen das schnelle Kontrollsystem kommuniziert.

Im Datennahme-Testbetrieb 1997 wurde ein kleines Prototypsystem, bestehend aus einem Mutter-, einem Sender-, zwei Empfänger- und fünf Tochter-Modulen betrieben, die die Front-End-Module der äußeren Spurkammern, des Myon-Detektors und des elektromagnetischen Kalorimeters ansteuerten. Trigger-Signale wurden zu der Zeit nur durch Software-Zugriffe oder durch die Eingänge des Mutter-Moduls für externe Triggersignale ausgelöst.

Im Datennahmebetrieb 1998 wurde erstmalig das entgeltliche schnelle Kontrollsystem in Betrieb genommen. Mit der schrittweisen Inbetriebnahme immer weiterer Komponenten seiner Umgebung wurde auch die Funktion des Systems in Zusammenhängen auf die Probe gestellt, die zuvor in Testaufbauten nicht realisiert waren. Der Datennahmebetrieb begann mit einigen Modulen, die Front-End-Module der äußeren Spurkammern, des Myon-Detektors, des RICH und des elektromagnetischen Kalorimeters mit Signalen versorgten. Darauf folgten:

- die Inbetriebnahme weiterer Detektorkomponenten und damit zusätzlicher Tochter-Module des schnellen Kontrollsystems,
- die Inbetriebnahme der Schnittstelle zur Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe,
- Erhöhung der Trigger-Raten mit dem Ausbau des Switch und der damit verbundenen Verbesserung der Leistungsfähigkeit der zweiten Triggerstufe,
- Prototyp-Inbetriebnahme der ersten Triggerstufe
- und die Integration des Vertex-Detektor-Front-End-Systems.

Jeder dieser Schritte stellte neue Anforderungen an das schnelle Kontrollsystem. Dabei traten immer wieder Fehler zutage, die zuvor unentdeckt geblieben waren, aber immer auch kurzfristig behoben werden konnten.

### 6.2 Einbindung der Software

Im Rahmen der schrittweisen Inbetriebnahme des Experimentes wurde das Datennahmesystem dahin entwickelt, daß Datennahme in zwei verschiedenen Modi betrieben werden kann. Einerseits können die Meßdaten durch VME-Kontrollrechner aus den Datenpuffern der zweiten Triggerstufe ausgelesen werden, andererseits durch den Switch.

Die Datenauslese durch die VME-Kontrollrechner wird insbesondere bei der schrittweisen Inbetriebnahme des Experimentes verwendet, um Meßdaten einzelner Teildetektoren unabhängig voneinander aufzunehmen und zu analysieren, um so zunächst die Komponenten des Gesamtexperimentes zu verstehen (sogenannter *Standalone*-Betrieb).

Die Datenübertragung durch den Switch an die L2/L3-Prozessoren ermöglicht ebenfalls unabhängigen Betrieb einzelner Detektorkomponenten. Die im alltäglichen Sprachgebrauch übliche Unterscheidung zwischen *Standalone*- und gemeinsamer Datennahme ist also nicht ganz korrekt. Die Datenübertragung durch den Switch ermöglicht jedoch wesentlich schnelleren Datentransfer. Deshalb kann die gemeinsame Auslese aller installierten Komponenten zur Gewinnung von Meßdaten, die zur Entwicklung der Rekonstruktionssoftware und zur Untersuchung des Zusammenspiels der Detektorkomponenten dienen, mit dem Switch mit größeren Ereignisraten betrieben werden.

#### Datenauslese durch VME-Kontrollrechner

Der *Standalone*-Betrieb von Teildetektoren ist insbesondere während der allmählichen Inbetriebnahme des Experimentes wichtig, einerseits um die Ausleseelektronik in Betrieb zu nehmen und Fehler zu diagnostizieren, andererseits um Meßdaten der einzelnen Komponenten aufzuzeichnen und anhand von deren Analyse die jeweilige Detektorkomponente zu verstehen.

Die Konfiguration eines Datennahmesystems, das in diesem Zusammenhang eingesetzt wird, ist in Abb. 6.1 dargestellt. Als zentraler Rechner wird eine Sun-Workstation eingesetzt. Drei wichtige Prozesse laufen auf diesem Rechner ab.

Der Trigger-Generator sendet jeweils eine Nachricht an den Server des schnellen Kontrollsystems. Dieser veranlaßt, daß ein Triggersignal an die Front-End-Module der jeweiligen Detektorkomponente geschickt wird. Für die Nachrichten an den Server werden Funktionen aus der oben beschriebenen Client-Bibliothek verwendet. Der Trigger-Generator geht davon aus, daß in allen Tochter-Modulen des schnellen Kontrollsystems die Trigger-Masken (vgl. Tab. 4.4) auf null gesetzt sind, so daß keine Triggersignale an die Front-End-Module durchgegeben werden. Der Empfang der Nachricht durch den Server führt dazu, daß zuerst in den spezifizierten Tochter-Modulen die Maske so gesetzt wird, daß Software-Trigger weitergegeben werden. Danach wird ein Software-Trigger ausgelöst und schließlich die Trigger-Masken wieder zurückgesetzt. Dieses Verfahren ermöglicht, daß mehrere Teildetektoren gleichzeitig betrieben werden. Die Komponenten stören sich gegenseitig nicht, weil die Trigger-Masken immer nur für die spezifizierten Module angeschaltet werden und der Server keine weitere Nachricht bearbeitet, bevor die Masken wieder zurückgesetzt sind.

Das Triggersignal veranlaßt nun, daß die Front-End-Module Meßdaten an die aus digitalen Signalprozessoren (DSPs) aufgebauten Datenpuffer senden. Der Kontrollprozeß weist den eingehenden Daten Speicherbereiche in den Puffer-Prozessoren zu und veranlaßt die Weitergabe der Daten durch die VME-Kontrollrechner an den sogenannten *Event*

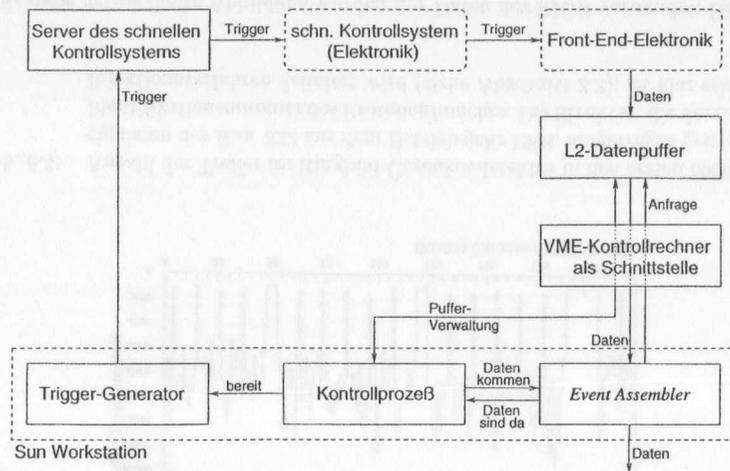


Abb. 6.1: Datennahmesystem mit Datenanalyse durch VME-Kontrollrechner, wie es für den *Standalone*-Betrieb der Subdetektoren eingesetzt wird.

Assembler, der alle Daten eines Ereignis zusammenfaßt und zur Archivierung weitergibt. Der Trigger-Generator erhält durch den Kontrollprozeß jeweils eine Rückmeldung, wenn die Daten eines Ereignisses verarbeitet wurden, um dann das nächste Triggersignal an die Front-End-Module auszulösen.

Neben den Programmen, die direkt an der Verarbeitung bzw. Übertragung der Meßdaten beteiligt sind, gibt es auch einige Programme, die unterstützende Funktionen in diesem Datennahmesystem haben. Eines dieser Programme ist der bereits mehrfach erwähnte *Namserve*-Prozeß (siehe Abschnitt 4.3.1). Dazu kommt auf jedem beteiligten Rechner ein Prozeß-Server, dessen Aufgabe ist, auf Anfrage von Clients andere Prozesse zu starten oder zu stoppen. Die DSPs werden jeweils über den VME-Bus von einem Kontrollrechner bedient, der sie konfiguriert und ihnen ihre Programme bereitstellt. Die DSPs kommunizieren mit einem Protokoll, das RPM (Abschnitt 4.3.1) ähnlich ist. Eine Schnittstelle zwischen diesem Protokoll und RPM ist für die Übertragung der Meßdaten von den Puffer-DSPs an die Trigger-Prozessoren notwendig.

Schließlich gibt es verschiedene grafische Benutzerschnittstellen. Ein Programm ermöglicht zu überwachen, auf welchen Rechnern welche Programme aktiv sind. Weitere Programme sind dazu da, Fehlermeldungen aller Prozesse zu beobachten (vgl. Abschnitt 4.3.1) oder zu überwachen, wieviele Meßdaten bereits archiviert wurden. Ein Programm stellt die Kontrolle des Gesamtsystems bereit und ermöglicht damit das Starten und Stoppen der Datennahme.

Die Meßdaten, die mit diesem System aufgezeichnet werden, sind zufällig ausgewählt. Es gibt noch keine Triggersignale, die durch die Erkennung bestimmter Teilchenarten oder -spuren ausgelöst werden. Die zufällig ausgelesenen Daten dienen zunächst dazu,

die einzelnen Detektoren zu verstehen. Z.B. können Belegungsdichten oder Driftzeitspektren studiert werden. Dabei können Bezüge zu Parametern des Beschleunigers, z.B. zur Wechselwirkungsrate hergestellt werden.

Das schnelle Kontrollsystem bietet mit der zugehörigen Software auch die Möglichkeit, die Datenauslese aus den Front-End-Modulen jeweils zu einem bestimmten Protonenbunch in HERA zu synchronisieren. Wird der Trigger-Generator mit dieser Option gestartet, läßt sich durch Auswertung der Belegungsdichte in Abhängigkeit von der Bunchnummer die Synchronisierung der einzelnen Detektoren zu HERA untersuchen.

### Datennahme mit dem Switch

Das Datennahmesystem, das für die gemeinsame Datennahme verwendet wird, wurde bereits in Abschnitt 3.3 ausführlich diskutiert. Abb. 6.2 zeigt dieses System noch einmal aus einem stärker Software-orientierten Blickwinkel. Die erste Triggerstufe wird in hier im Gegensatz zu Abb. 3.1 nicht berücksichtigt. Sie wird, ebenso wie elektrische Puls-generatoren oder Software-Zugriffe, z.B. vom oben beschriebenen Trigger-Generator, als äußere Quelle eines Triggersignals betrachtet.

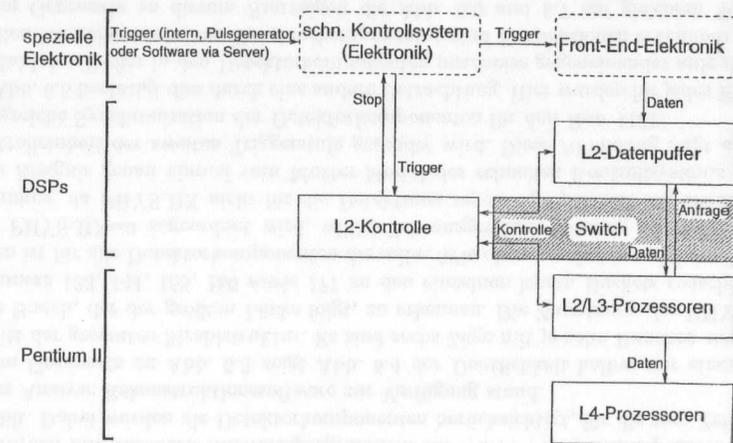


Abb. 6.2: Datennahmesystem für die gemeinsame Datennahme mit dem Switch

Durch entsprechende Konfiguration der Trigger-Masken in den Tochter-Modulen sind einzelne Detektorkomponenten zu- und abschaltbar. So kann auch das „gemeinsame“ Datennahmesystem für die Auslese einzelner Komponenten verwendet werden. Der wesentliche Unterschied zu dem System, das im vorangehenden Abschnitt beschrieben wurde, ist die Einbindung des *Switch*, eines Netzwerkes aus DSPs für den Datentransfer zwischen der L2-Kontrolleinheit, den L2-Puffern und den L2-Prozessoren.

### 6.3 Synchronisierung der Detektoren

In den folgenden Abschnitten sollen Erfahrungen und Meßergebnisse aus dem Datennahmebetrieb 1998 vorgestellt und diskutiert werden.

Das schnelle Kontrollsystem weist jedem Bucket des HERA-Protonenstrahls eine Identifikationsnummer zu, die als PHYS.BX bezeichnet wird (vgl. S. 56f). Diese Nummer wird für jedes Ereignis, dessen Daten aus den Front-End-Systemen ausgelesen werden, vom schnellen Kontrollsystem an die zweite Triggerstufe übergeben (vgl. S. 61) und dort in den Datenpfad eingeführt, so daß diese Zahl für jedes aufgezeichnete Ereignis in der Offline-Analyse verfügbar ist.

Damit bietet sich eine Möglichkeit, die Synchronisation der Detektorkomponenten zu überprüfen. In Abschnitt 2.2 wurde beschrieben, daß die Protonen in HERA nicht gleichmäßig auf alle Buckets verteilt sind. Sondern es liegen achtzehn Züge von jeweils zehn aufeinanderfolgenden Bunches vor. Zwischen diesen sind fünfzehn einzelne Lücken sowie zwei Lücken von fünf und eine Lücke von fünfzehn leeren Buckets.

Man erwartet, daß jedes Bucket entsprechend der Anzahl seiner Protonen zur Gesamt-Wechselwirkungsrate beiträgt, die „leeren“ also gar nicht und die „gefüllten“ näherungsweise alle gleichmäßig. Man erwartet auch, daß die Belegungsdichte jedes einzelnen Detektors proportional zur Anzahl der Primärwechselwirkungen ist. Folglich wird erwartet, daß die Belegungsdichte der Detektoren in Abhängigkeit der Bucket-Nummer PHYS.BX die Struktur des HERA-Protonenstrahls widerspiegelt. Abb. 6.3 zeigt an einem Beispiel, daß dies tatsächlich näherungsweise zutrifft.

Dabei ist die Zuordnung der PHYS.BX-Nummern zu den Buckets gegeben durch die Phasenverschiebung des Umlauf-Taktsignals, das vom HERA-Zeitreferenzsystem geliefert wird, relativ zum Umlauf eines bestimmten Buckets um HERA. Diese Phasenverschiebung kann am HERA-Zeitreferenzsystem eingestellt werden. Die Zuordnung der PHYS.BX-Nummern zu den Buckets ist also willkürlich.

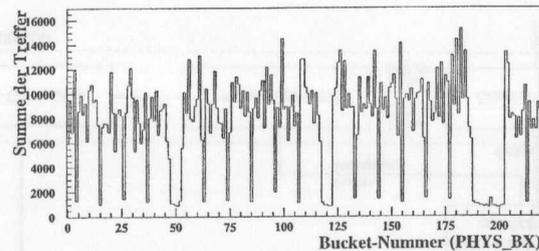


Abb. 6.3: Anzahl der Treffer im Ringbild-Cherenkovdetektor in den ersten 5000 Ereignissen des Run 822 aus dem Betriebsjahr 1998, aufgetragen gegen die Identifikationsnummer des Protonenbunches. Die Struktur, die durch das Injektionsverfahren definiert wird (siehe Abschnitt 2.2), ist klar erkennbar.

Für diese beispielhafte Abbildung wurden nur Daten des RICH verwendet. Die Synchronisierung der Detektoren läßt sich nun dadurch überprüfen, daß die Daten aller Detektorkomponenten in gleicher Weise aufgetragen und verglichen werden.

Natürlich erwartet man, daß die Multiplizität der Ereignisse im Mittel in der Belegungsdichte aller Detektoren gleich abgebildet wird. Also sollte die Zahl der Treffer bei leeren Buckets in allen Detektorkomponenten klein oder bei gefüllten Buckets in allen Komponenten groß sein. Sähe man in einem Detektor große Trefferraten und in einem anderen gleichzeitig niedrige, zeigte das, daß die Signale zu verschiedenen Buckets ausgelesen werden.

Für Abb. 6.4 wurde die erste Datei (3762 Ereignisse) des Run 1131 aus dem Betriebsjahr 1998 verwendet. Die Abb. zeigt die Verteilung der Treffer in verschiedenen Detektorkomponenten auf die einzelnen Buckets, gegeben durch die PHYS.BX-Nummer. Als Trigger wurde in diesem Run ein zufällig generierter Puls verwendet. Die 3762 Ereignisse verteilt auf 220 Buckets entsprechen im Mittel also 17,1 Ereignissen pro Bucket. Die Treffer wurden mit Standard-Auswertprogrammen des HERA - B -Softwarepaketes ARTE gezählt. Dabei wurden die Detektorkomponenten berücksichtigt, für die zum Zeitpunkt dieser Analyse Rekonstruktionssoftware zur Verfügung stand.

Im Gegensatz zu Abb. 6.3 zeigt Abb. 6.4 der Deutlichkeit halber nur einen Ausschnitt der gesamten Strahlstruktur. Es sind sechs Züge mit je zehn Bunches sowie der erste Bunch, der der größten Lücke folgt, zu erkennen. Die Zuordnung der PHYS.BX-Nummern 133, 144, 155, 166 sowie 177 zu den einzelnen leeren Buckets zwischen den Zügen ist für alle Detektorkomponenten die selbe. Wie oben beschrieben, ist der Bunch, dem PHYS.BX=0 zugeordnet wird, willkürlich ausgewählt. Wichtig ist die Übereinstimmung, da PHYS.BX nicht für die Detektoren separat gespeichert ist, sondern für jedes Ereignis genau einmal vom Mutter-Modul des schnellen Kontrollsystems an die Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe gesendet wird. Diese Abbildung zeigt also die erfolgreiche Synchronisation der Detektorkomponenten für den Run 1131.

Abb. 6.5 bestätigt dies durch eine andere Betrachtung. Hier wurden für jedes Ereignis die Zahl der Treffer in den Detektorkomponenten paarweise gegeneinander aufgetragen. In allen Kombinationen von Detektorkomponenten sind Korrelationen erkennbar.

Im Gegensatz zu diesem Run zeigen die Abb. 6.6 und 6.7 auf gleichem Weg gewonnene Bilder aus einem Run, während dessen nicht alle Detektoren synchronisiert waren. In Abb. 6.6 ist zu erkennen, daß jeweils die Lücken in der Belegung der Spurkammern und des RICH gegen die des Kalorimeters und des Vertexdetektors um einen Bunch versetzt sind. Das läßt sich so verstehen, daß nicht aus allen Front-End-Modulen Meßdaten, die zum selben Taktzyklus gehören, ausgelesen werden. Zwei Gruppen von Front-End-Modulen sind um einen Taktzyklus gegeneinander versetzt. Die Versetzung des Taktzählers auf den Tochter-Modulen des schnellen Kontrollsystems ist falsch konfiguriert; die Synchronisierung des gesamten Detektors ist deshalb nicht gelungen.

Abb. 6.7 belegt dies. Die Anzahl der Treffer pro Ereignis und Detektorkomponente ist für alle Komponenten paarweise gegeneinander aufgetragen. Korrelationen zwischen Vertex-Detektor und Kalorimeter sowie zwischen RICH und Driftkammern sind zu erkennen, wenn auch nicht ganz so deutlich wie die Korrelationen in Abb. 6.5. In anderen Kombinationen von Detektorkomponenten sind keine Korrelationen erkennbar.

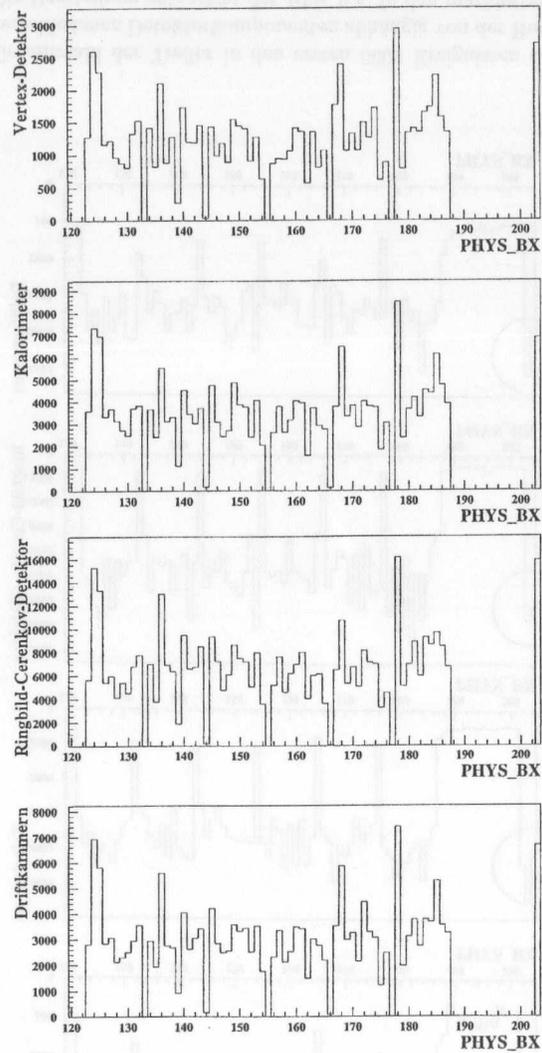


Abb. 6.4: Gesamtzahl der Treffer in den ersten 3762 Ereignissen des Run 1131 in verschiedenen Detektorkomponenten abhängig von der Bucket-Nummer. Hier ist nur eine der drei Gruppen von je zehn Zügen gezeigt, sowie der erste Bunch des nächstfolgenden Zuges. Es ist zu erkennen, daß in diesem Run alle Detektoren synchron ausgelesen wurden.

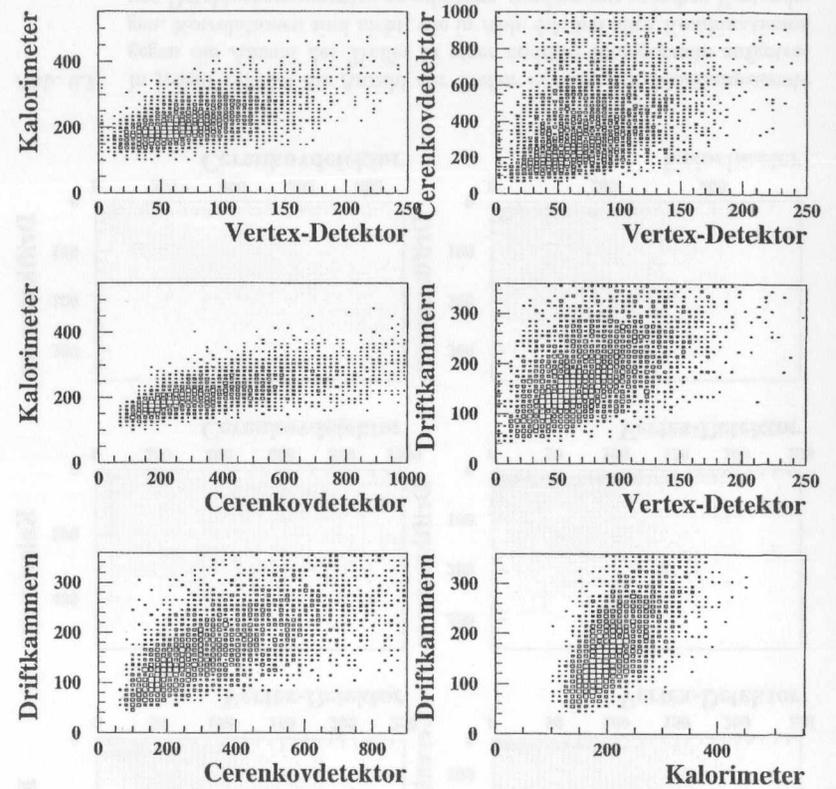


Abb. 6.5: In jedem Bild ist für alle berücksichtigten Ereignisse des Run 1131 die Anzahl der Treffer in einer Detektorkomponente gegen die Anzahl der Treffer in einer anderen Komponente aufgetragen. In allen Kombinationen von Detektorkomponenten sind Korrelationen erkennbar.

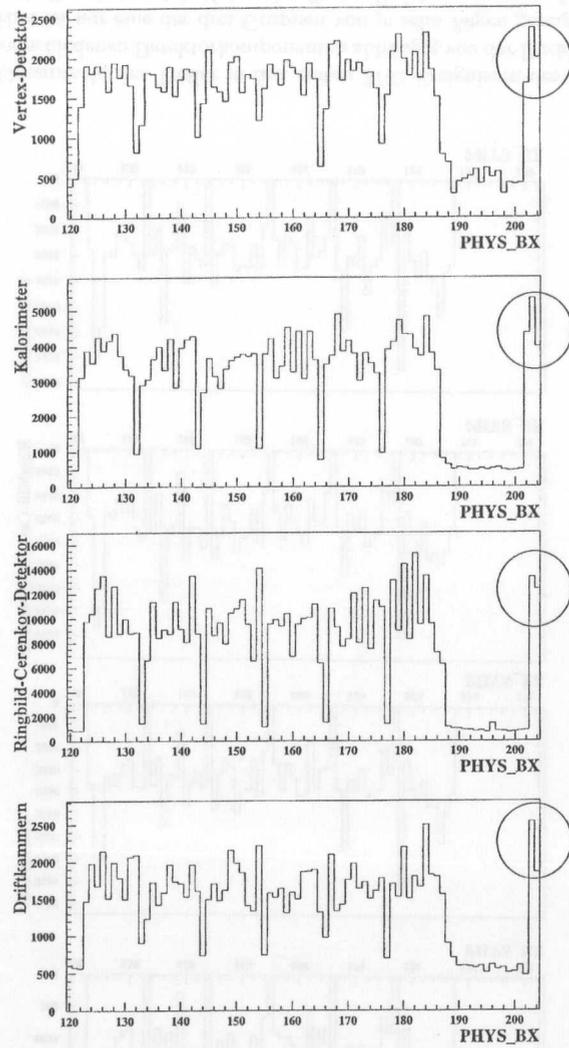


Abb. 6.6: Gesamtzahl der Treffer in den ersten 5000 Ereignissen des Run822 in verschiedenen Detektorkomponenten abhängig von der Bucket-Nummer. Die Darstellung entspricht der Abb. 6.4. In den markierten Kreisen sind beim Vertex-Detektor und beim Kalorimeter drei Bunche zu erkennen, bei den anderen beiden Detektoren nur zwei. Die Strukturen sind gegeneinander verschoben, die Detektoren also nicht korrekt synchronisiert.

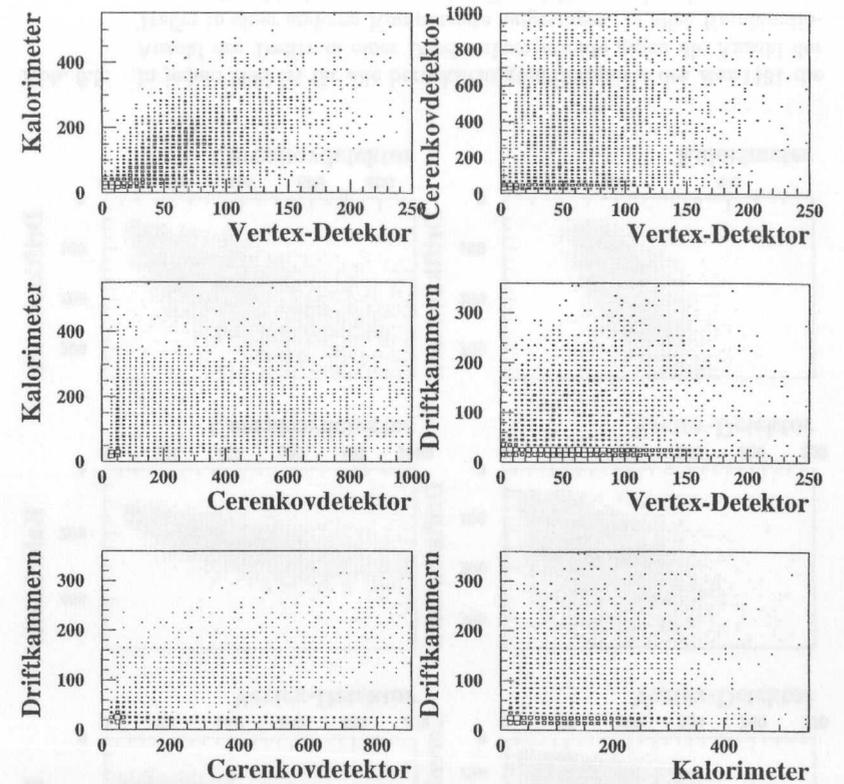


Abb. 6.7: In jedem Bild ist die Anzahl der Treffer in einer Detektorkomponente gegen die Anzahl der Treffer in einer anderen Komponente aufgetragen. Korrelationen sind nicht, wie in Abb. 6.5, bei allen Kombinationen von Detektorkomponenten zu erkennen, sondern nur zwischen Vertexdetektor und Kalorimeter sowie zwischen Driftkammern und RICH. Das bestätigt die Aussage von Abb. 6.6.

## 6.4 Trigger-Diagnose

### 6.4.1 Einflüsse der Strahlstruktur auf die Trigger-Akzeptanz

Abb. 6.8 zeigt einen ersten Einsatz des schnellen Kontrollsystems zur Trigger-Diagnose. Im oberen Bild ist die Gesamtzahl der Treffer im RICH in den ersten 5000 Ereignissen des Run 1335 über der Bucket-Nummer aufgetragen. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, daß der erste Bunch nach der großen Lücke der HERA-Füllung erheblich stärker zur Gesamtzahl der registrierten Treffer beiträgt als alle anderen Bunche. Die Ausschnittvergrößerung darunter zeigt, daß die übrige Struktur des Protonenstrahls auch zu erkennen ist, daß aber der jeweils erste Bunch einer Gruppe von Bunch-Zügen ebenfalls stärker beiträgt als die übrigen Bunche.

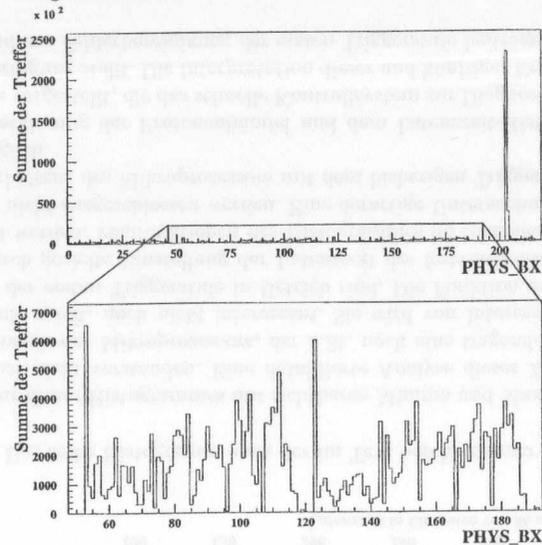


Abb. 6.8: Das obere Bild entstand analog zu Abb. 6.3, jedoch wurden hier 5000 Ereignisse des Run 1335 verwendet. Im Unterschied zu Run 822 wurde dieser Run mit einem Physik-Trigger anstelle des zufälligen Triggers aufgenommen.

Das hierbei eingesetzte Trigger-System bestand aus zwei Stufen. Prototyp-Module der ersten Triggerstufe suchten nach Ereignissen mit zwei elektromagnetischen Schauern im Kalorimeter, wobei jeder Schauer von einem Teilchen (Elektron oder Photon) mit einer Transversalenergie oberhalb einer festgelegten Schwelle herrühren sollte. Die Schwelle lag bei 1,1 GeV für den Treffer mit höherer und 0,75 GeV für den mit niedrigerer Energiedeposition. Von den Ereignissen, die dieses Kriterium erfüllten, wurde für jedes zehnte eine Nachricht vom Trigger-Testboard an das schnelle Kontrollsystem übertragen und die Übergabe an die zweite Triggerstufe ausgelöst. Auf den Prozessoren der zweiten

Triggerstufe wurde ein Algorithmus ausgeführt, der aus den deponierten Energien dieser Trefferpaare eine Invariante Masse berechnete und nur für diejenigen Ereignisse das Speichern der Daten auslöste, bei denen diese invariante Masse oberhalb einer Schwelle von  $2 \text{ GeV}/c^2$  lag.

Die Überhöhung in der Gesamtzahl der Treffer kann zwei Ursachen haben. 1. Der betreffende Bunch kann mehr Protonen enthalten und deshalb durch eine größere Anzahl von Wechselwirkungen eine größere Anzahl von Treffern verursachen. 2. Das eingesetzte Triggersystem kann besonders sensitiv auf Ereignisse, die jeweils vom ersten Bunch nach einer Reihe leerer Buckets herrühren, sein. Erste Erkenntnisse [sam99] zeigen, daß beide Ursachen beitragen. Die Anzahl der Ereignisse, deren Aufzeichnung das Triggersystem ausgelöst hat, ist für den ersten Bunch nach der großen Lücke um eine Größenordnung überhöht. Die überhöhte Anzahl der Protonen in diesem Bunch trägt unmittelbar einen geringeren Anteil bei. Jedoch kann die Anzahl der Protonen im Bunch auch durch die Belegungsdichte des Kalorimeters mittelbar die Sensitivität des Triggers für Ereignisse, die von diesem Bunch herrühren, beeinflussen.

### 6.4.2 Latenzzeit der ersten Triggerstufe

Abb. 6.9 zeigt ein Trigger-Latenzzeit-Histogramm, das im Anschluß an den Run 4094 der Datennahme 1999 vom schnellen Kontrollsystem ausgelesen wurde. Es kann den Trigger-Spezialisten Aufschluß über die Funktionsweise der ersten Triggerstufe geben. In dieser Betriebsperiode wurden Nachrichten vom Elektron-Pretrigger an eine erste TFU übertragen und von dieser an das Testboard weitergeleitet, welches die BX-Nummer aus dieser Nachricht extrahierte und an das schnelle Kontrollsystem übertrug.

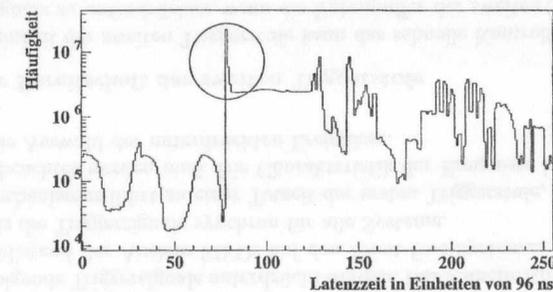


Abb. 6.9: Beispiel eines Trigger-Latenzzeit-Histogramms

Das schnelle Kontrollsystem markiert die Daten mit einer 8-Bit-Zahl, kann also Latenzzeiten bis zu  $255 \cdot 96 \text{ ns}$  erkennen. Benötigt die erste Triggerstufe länger als 255 Taktzyklen, so ergibt die Differenz ( $BX - BX\_FLT$ ) wieder kleine Werte, die im linken Bereich der Abb. 6.9 sichtbar sind. Da in diesem Fall noch nicht die speziell entwickelte Elektronik eingesetzt wurde, sondern die erste Triggerstufe einen Mikroprozessor (Motorola 68060 mit 50 MHz Bus- und 100 MHz internem Takt) enthält, läßt sich dieses Histogramm so interpretieren, daß es eine minimale Latenzzeit von 79 Taktzyklen, also

7,58  $\mu\text{s}$ , gibt, die recht häufig erreicht wird (Kreis in Abb. 6.9), und darüber hinaus eine über 255 Taktzyklen hinaus auslaufende Verteilung. Abb. 6.10 zeigt das Histogramm, nachdem die Einträge 0 bis 78 um 256 Einheiten an das Ende der Verteilung verschoben wurden.

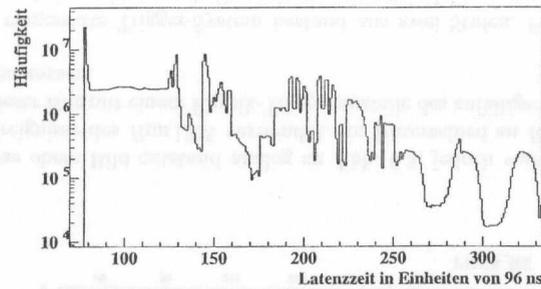


Abb. 6.10: Das selbe Histogramm nach der im Text beschriebenen Manipulation

Die Struktur dieses Histogrammes mit sichtbaren Minima und Maxima bei verschiedenen Zeiten ist nicht verstanden. Eine detaillierte Analyse dieses Zeitverhaltens ist, insbesondere wegen des Mikroprozessors, der z.Zt. noch eine tragende Rolle in der ersten Triggerstufe spielt, noch nicht interessant. Sie wird von Interesse sein, wenn alle Komponenten der ersten Triggerstufe in Betrieb sind. Die Funktion des Histogrammes sollte dann durch gezielte Einstellung der Latenzzeit des festverdrahteten Systems genau untersucht werden. Fehlfunktionen des Histogrammes im schnellen Kontrollsystem können vorher nicht ausgeschlossen werden. Eine derartige Untersuchung ist, wegen des komplexen Verhaltens des Mikroprozessors mit dem bisherigen Trigger-Prototypsystem noch nicht möglich.

Mit der Markierung der Protonenbündel und dem Latenzzeit-Histogramm wurden hier Werkzeuge vorgestellt, die das schnelle Kontrollsystem zur Diagnose der ersten Triggerstufe zur Verfügung stellt. Die Interpretation dieser und künftiger Ergebnisse soll zum Verständnis und zur Fehlerbereinigung der ersten Triggerstufe beitragen.

## 6.5 Mögliche Störeinflüsse auf das Experiment

Das schnelle Kontrollsystem veranlaßt für eine Auswahl von Ereignissen die Übergabe der Datenpakete aller Front-End-Zwischenspeicher an die Datenpuffer der zweiten Stufe. Diese speichern die Meßdaten komponentenweise bis zur Ereignisrekonstruktion. Hier entnehmen die höheren Triggerstufen die jeweils benötigten Daten (siehe Kap. 3).

Die Auswahl der Daten, die an die Puffer für die zweite Triggerstufe übergeben werden, kann bereits zu systematischen Fehlern für HERA - B -Messungen führen, insbesondere für die Messung der  $CP$ -Verletzung und des  $\sin 2\beta$ . Die Systeme, die die Auswahl dieses Datenensembles beeinflussen, sind der Detektor, die erste Triggerstufe und das schnelle Kontrollsystem.

Asymmetrien in Produktionsraten, Nachweiswahrscheinlichkeiten und der Detektorakzeptanz werden in [loh94] diskutiert. Detaillierte Untersuchungen der Einflüsse der er-

sten Triggerstufe stehen noch aus. Im folgenden sollen mögliche Störeinflüsse des schnellen Kontrollsystems auf die HERA - B -Messungen sowie Diagnosemöglichkeiten diskutiert werden.

### 6.5.1 Die Trigger-Unterdrückungs-Mechanismen

#### Überwachung der Auslesepuffer

Da die unterschiedlichen Systeme bis zu 300 HERA-Taktzyklen benötigen, um die Meßdaten eines Ereignisses an die Puffer der zweiten Triggerstufe zu senden, können schnell aufeinanderfolgende Triggersignale unterdrückt werden. Das schnelle Kontrollsystem überwacht den Füllstand der Auslese-FIFOs auf den Front-End-Systemen und unterdrückt gegebenenfalls die Triggersignale synchron für alle Systeme.

Dieser Mechanismus führt zu einer Totzeit der ersten Triggerstufe, die bei Ratenbestimmungen beachtet werden muß. Die Charakteristik der Ereignisse hat jedoch keinen Einfluß auf die Auswahl der unterdrückten Ereignisse.

#### Prüfung der Bereitschaft der zweiten Triggerstufe

Die Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe kann das schnelle Kontrollsystem veranlassen, Triggersignale zu unterdrücken, wenn die Datenpuffer der zweiten Stufe überlaufen.

Diese Überlaufbedingung wird erfüllt, wenn entweder viele Ereignisse in schneller Folge von der ersten Triggerstufe akzeptiert wurden. Oder wenn die Ereignisse, die von der zweiten Triggerstufe bearbeitet werden, dort ungewöhnlich viel Zeit benötigen, z.B. dadurch, daß vorübergehend sehr wenige Ereignisse von den zuerst durchgeführten Trigger-Algorithmen verworfen werden.

In beiden Fällen sind es jedoch die vorangegangenen Ereignisse, die dazu führen, daß die Datenpuffer überlaufen. Die Auswahl der Ereignisse, die durch den Mechanismus unterdrückt werden, ist zufällig. Diese Unterdrückung fügt den Daten ebenfalls keinen Störeinfluß im Sinne einer bevorzugten Auswahl bestimmter Ereignisse zu.

Zu beachten ist aber, daß auch dieser Mechanismus effektiv eine Totzeit der ersten Triggerstufe bewirkt, die bei Ratenbestimmungen berücksichtigt werden muß.

#### Diagnose

Zur Überwachung der Trigger-Verlustraten, die durch diese beiden Mechanismen verursacht werden, wurde für den HERA - B -Betrieb 1999 auf der Basis der Client-Bibliotheksfunktionen ein Programm erstellt, das vom Server des schnellen Kontrollsystems in regelmäßigen Abständen das Trigger-Unterdrückungs-Histogramm abfragt, aus der zeitlichen Veränderung des Histogramm-Inhalts die Unterdrückungs-Raten berechnet und grafisch darstellt [san99]. Dieser Ansatz kann zur Totzeitbestimmung weiterverfolgt werden.

Im Betrieb im Frühjahr 1999 ist die Unterdrückung aufeinanderfolgender Triggersignale nicht aktiv. Bei einer Trigger-Rate, die mit ca. 6 kHz etwa eine Größenordnung kleiner als die letztendlich angestrebte ist, greift der FIFO-Überlaufschutz in ca. der Hälfte der Fälle. Die zweite Triggerstufe wird zumeist noch mit relativ wenig Prozessoren betrieben. Deshalb ist die Unterdrückung wegen des Stop-Signals von der zweiten Triggerstufe mit ca. 1 kHz Unterdrückungs-Rate ebenfalls häufig aktiv.

### Prüfung der Latenzzeit der ersten Triggerstufe

Im schnellen Kontrollsystem werden Triggersignale unterdrückt, wenn die erste Triggerstufe für das jeweilige Ereignis so lange benötigt hat, daß die Meßdaten in den Zwischenspeichern der Front-End-Module überschrieben sind, bevor das Triggersignal diese erreichen kann.

Hier wird jedes Ereignis im schnellen Kontrollsystem auf ein bestimmtes Kriterium, nämlich die Entscheidungszeit der ersten Triggerstufe, geprüft. Nach dieser Prüfung wird entschieden, ob das jeweilige Ereignis an die zweite Triggerstufe übergeben wird. Diese Prüfung kann durchaus die Auswahl der Ereignisse nach physikalischen Kriterien beeinflussen. Z.B. können  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ -Ereignisse gegenüber  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ -Ereignissen unterdrückt werden, da die Elektron-Pretrigger mehr Zeit benötigen als die Myon-Pretrigger. Oder andersherum, da die Spurverfolgung eines Myons drei Detektorlagen mehr einbezieht als die eines Elektrons.

Die asymmetrische Materialverteilung im Detektor (u.a. durch das Strahlrohr des Elektronenspeicherringes) führt zu asymmetrischer ortsabhängiger Belegungsichte der Detektorkomponenten. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Auslastung der verschiedenen TFUs. Wenn die Latenzzeit einer TFU von ihrer Auslastung abhängt, können durch die Unterdrückung von Ereignissen abhängig von der Latenzzeit der ersten Triggerstufe solche Asymmetrien in die Auswahl der Ereignisse eingebracht werden und z.B. Ereignisse mit einem  $B^+$ -Meson als Tagging- $B$ -Hadron gegenüber Ereignissen mit einem  $B^-$ -Meson bevorzugt oder unterdrückt werden.

Das schnelle Kontrollsystem wählt also diejenigen Ereignisse aus, die die erste Triggerstufe schnell genug akzeptiert hat. Welche physikalischen Auswahlkriterien dahinterstehen und bei der späteren Datenauswertung berücksichtigt werden müssen, muß eine detaillierte Simulation der ersten Triggerstufe klären. Das Simulationspaket `fltsim`, das auch das Zeitverhalten der ersten Triggerstufe korrekt beschreiben soll, befindet sich z.Zt. in der Entwicklung.

### 6.5.2 Einflüsse auf Ratenbestimmungen

Eine fehlerhafte Bestimmung der Wechselwirkungsrate würde sich in Fehlern bei der Bestimmung von Wirkungsquerschnitten niederschlagen. Deshalb ist zu klären, inwieweit das schnelle Kontrollsystem die Bestimmung der Wechselwirkungsrate stören kann.

Die Wechselwirkungsrate kann wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{N_{IA}}{\Delta t} = \frac{N_{rnd}}{\Delta t} \cdot \frac{f_{BX}}{f_{rnd}} \cdot \bar{n}_{IA/BX}. \quad (6.1)$$

Dabei ist:

$N_{IA}/\Delta t$	Anzahl der Wechselwirkungen im Zeitintervall $\Delta t$ ,
$N_{rnd}/\Delta t$	Anzahl der akquirierten Zufallstrigger-Ereignisse im Zeitintervall $\Delta t$ ,
$f_{BX}$	Strahlkreuzungsfrequenz,
$f_{rnd}$	Frequenz des Zufallstriggersignals,
$\bar{n}_{IA/BX}$	mittlere Anzahl von Wechselwirkungen pro Strahlkreuzung, ermittelt z.B. aus der Energiedeposition im Kalorimeter,

Diese Berechnung setzt voraus, daß die Daten zu jedem Zufallstrigger-Ereignis auf Massenspeicher aufgezeichnet werden. Totzeit, die durch die Trigger-Unterdrückungs-Mechanismen eingeführt wird, muß deshalb bestimmt und als Korrektur von  $f_{rnd}$  berücksichtigt werden.

### Bestimmung der Totzeit

Für jedes Triggersignal, daß vom Mutter-Modul weitergegeben wird, wird u.a. die Quelle des Signals der Kontrolleinheit der zweiten Triggerstufe mitgeteilt. Trifft ein Zufallstrigger ein Ereignis, daß von der ersten Triggerstufe akzeptiert wurde, ist die Koinzidenz zu erkennen. Zur Bestimmung der Totzeit kann also die Rate von Zufallstrigger-Ereignissen, die in die zweite Triggerstufe gelangen, mit der vorgewählten Zufallstrigger-Rate verglichen werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Totzeit erhält man dadurch, daß das Mutter-Modul einige elektrische Signalausgänge für Diagnosezwecke besitzt (s. Abb. 4.3 auf S. 56). Für jedes Triggersignal, das an die Tochter-Module und die zweite Triggerstufe weitergegeben wird, wird auch ein Impuls an einen koaxial-Anschluß (Bezeichnung: ACC) gegeben. Jedes Triggersignal, das das Mutter-Modul erhält (z.B. von der ersten Triggerstufe) oder erzeugt (z.B. Zufallstrigger) und in einem der Unterdrückungs-Mechanismen verwirft, wird durch einen Impuls an einem anderen Anschluß (Bezeichnung: REJ) angezeigt. Die beiden Anschlüsse lassen sich mit Impulszählern verbinden, um damit eine Information über die Totzeit zu gewinnen.

Z.Zt. können noch keine Totzeitbestimmungen durchgeführt werden, die für das Experiment relevant sind, da bisher weder die erste noch die zweite Triggerstufe voll in Betrieb sind.

Erste Aktivitäten zur Bestimmung von Wechselwirkungsraten wurden seit Ende des Jahres 1998 in Angriff genommen [loh99]. Das schnelle Kontrollsystem wurde seither noch dahingehend verändert, daß es nun ermöglicht, daß ein Signal der ersten Triggerstufe und ein Zufallstriggersignal das selbe Ereignis treffen können. Das oben erwähnte Programm, das aus der zeitlichen Veränderung des Unterdrückungs-Histogrammes die Unterdrückungs-Raten berechnet und grafisch darstellt [san99], kann hier eingesetzt und ggf. weiterentwickelt werden.

### 6.5.3 Verursachen von Ausfallzeiten

Ein trivialer Störeinfluß des schnellen Kontrollsystems wären Ausfallzeiten, die durch Ausfälle von Teilen des Systems entstünden.

Der Ausfall einzelner Tochter-Module würde zu unvollständigen Ereignisdaten führen. Eine Gruppe von Kanälen würde fehlen. Damit würde die Detektorakzeptanz eingeschränkt und zusätzliche Asymmetrien eingebracht.

Kritischer wäre der Ausfall einer Gruppe von Tochter-Modulen. Das kann durch den Bruch einer Glasfaser oder ein schadhaftes Empfänger-Modul geschehen. Damit würde ein größerer Teil des Detektors vom Datennahmesystem getrennt.

Jede Ausfallzeit des gesamten Systems führt natürlich dazu, daß weniger Ereignisse aufgezeichnet werden und dadurch mehr Meßzeit erforderlich wird, um die angestrebte Präzision der Messung von  $\sin 2\beta$  zu erreichen.

### Feststellen von Ausfällen

Der Ausfall vom Modulen des schnellen Kontrollsystems ist im Datennahmehetrieb dadurch zu erkennen, daß eine Gruppe von Front-End-Modulen keine Triggersignale mehr erhält und infolgedessen keine Meßdaten mehr absendet. Die Vollständigkeit der Daten kann in den Puffern der zweiten Triggerstufe kontrolliert werden.

Wenn ein Überwachungssystem, das auf die CAN-Bus-Schnittstellen der Tochter-Module zugreift, aufgebaut wird, kann dieses auch dafür eingesetzt werden, die Funktion der Module in regelmäßigen Abständen zu prüfen.

## 6.5.4 Störung der Ereignisrekonstruktion

### Bit-Fehler

Defekte Datenleitungen können dazu führen, daß Ereignis-Identifikationsnummern bei der Übertragung an die Komponenten verfälscht werden (z.B. Bit-Fehler). Dadurch würden von den Front-End-Modulen einzelner Detektorkomponenten Daten falscher Ereignisse an die zweite Triggerstufe gesendet.

Bei Komponenten, deren Meßsignale von den Trigger-Algorithmen berücksichtigt werden, kann das dazu führen, daß die betreffenden Ereignisse verworfen werden. Bei Komponenten, die erst bei der Rekonstruktion des Ereignis hinzugezogen werden, würde die Rekonstruktion zu keinen oder falschen Ergebnissen führen.

### Diagnose

Jedes Front-End-Modul fügt den Meßdaten, die an die zweite Triggerstufe gesendet werden, einige Kontrolldaten bei. Diese beinhalten die Identifikationsnummer BX.FLT sowie den Trigger-Zähler. In den höheren Triggerstufen kann überprüft werden, ob diese beiden Zahlen in allen Datenblöcken übereinstimmen. Damit können Übertragungsfehler zu einzelnen Modulen diagnostiziert werden. Dies wurden in der Datennahmepériode 1997 durchgeführt. Die dabei diagnostizierten Fehler wurden behoben. In der Datenanalyse 1998 wurde diese Prüfung offline durchgeführt. Im Datennahmehetrieb wird diese Überwachung seit 1998 nicht mehr durchgeführt [gel99].

### Fehler des Taktsignals

Instabilitäten der Zeitreferenz würden zu fehlerhaften Driftzeitmessungen führen. Diese können die Rekonstruktionseffizienz beeinträchtigen.

### Mögliche Diagnose

Zur Diagnose solcher Fehler wurde vorgeschlagen, in jedem Crate mit TDC-Front-End-Modulen ein Taktsignal an den Eingang eines TDC-Kanals anzuschließen [uwe98], um die Zeitreferenz zu überwachen. Problematisch wäre dabei, daß ein Referenz-Signal eingeführt werden muß, dessen Unsicherheiten in die Überwachung einfließen.

### „Coasting beam“

In den letzten Monaten zeigte sich, daß die Bunche manchmal auseinanderlaufen, so daß im Extremfall ein kontinuierlicher Protonenstrahl im Speicherring ist. Dieser Effekt, man spricht vom „coasting beam“ (etwa: vagabundierender Strahl), ist noch nicht verstanden. HERA - B ist jedoch darauf ausgelegt, daß die Wechselwirkungszeitpunkte durch kurze Bunche definiert sind. Auswirkungen des „Coasting beam“ auf das Experiment werden z.Zt. untersucht [ehr99]. Wechselwirkungen von Protonen, die sich außerhalb der HF-Buckets durch das Strahlrohr bewegen, führen zu falschen Driftzeitmessungen. Die Zeitreferenz, die vom schnellen Kontrollsystem an die TDC-Module geliefert wird, paßt in diesen Fällen nicht zum Wechselwirkungszeitpunkt. Der „Coasting beam“ hat also die gleiche Auswirkung wie Instabilitäten der Zeitreferenz an zentraler Stelle.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das schnelle Kontrollsystem für HERA – B aufgebaut. Die wichtigsten Aufgaben dieses Systems sind die Verteilung von Zeitreferenzen und Triggersignalen an die Front-End-Systeme mit dem Ziel der Synchronisierung dieser Systeme. Zum schnellen Kontrollsystem gehören eine Zentraleinheit (Mutter-Modul), die durch eine VME-Schnittstelle von der Kontroll- und Überwachungssoftware angesprochen wird, des weiteren ein Tochter-Modul in jedem Front-End-Elektronik-Crate. Die Kommunikation vom Mutter- zu den Tochter-Modulen erfolgt unidirektional durch Lichtwellenleiter. Optische Sender sind mit dem Mutter-Modul verbunden. Ein optischer Empfänger ist jeweils mit bis zu zehn Tochter-Modulen elektrisch verbunden, um die Anzahl der Lichtwellenleiter klein zu halten.

Die Arbeit begann mit dem Test der ersten Elektronik-Prototypen, die, einer vorläufigen Spezifikation von D. Reßing folgend, von der DESY-Elektronikentwicklung FEA hergestellt waren. Das Prototyp-System wurde zunächst unabhängig getestet. Später wurden zahlreiche Tests gemeinsam mit den Front-End-Systemen durchgeführt. Die in diesen Tests gewonnenen Erkenntnisse wurden verwendet, um zunächst Fehler der Module zu beseitigen und dann die Spezifikation des Systems zu überarbeiten und zu erweitern. Das Wechselspiel zwischen Elektroniktests, Systemtests, Überarbeitung und Erweiterung der Anforderungen sowie der Entwicklung neuer Prototypen durch FEA wurde durch mehrere Generationen von Prototypen betrieben.

Parallel zu den Tests und der Weiterentwicklung der Elektronik wurde Steuerungs- und Überwachungssoftware entwickelt. Diese besteht aus einem Server, der Zugriffe auf die Elektronik durch die VME-Schnittstelle zur Verfügung stellt, und aus Clients, die solche Zugriffe anfordern. Eine Bibliothek von Client-Funktionen sowie einige Client-Programme, die sowohl in der Datennahme eingesetzt werden als auch als Beispiel für die Verwendung der Funktionsbibliothek dienen, stehen für verschiedene Betriebssysteme zur Verfügung.

Testmessungen der Elektronik und einzelne Tests gemeinsam mit Systemen, zu denen Schnittstellen existieren, waren Voraussetzung für eine erfolgreiche Systemintegration. Im HERA – B -Datennahmebetrieb 1997 wurde ein Prototyp-System, bestehend aus einem Mutter-, einem Sender-, zwei Empfänger- und fünf Tochter-Modulen eingesetzt. Danach wurden die endgültigen Module fertiggestellt, die seit August 1998 in der Datennahme eingesetzt werden. Seit dem Beginn der Datennahmeperiode 1998 wurde das Kontrollsystem, parallel zur Inbetriebnahme von Detektor- und Front-End-Elektronik-Komponenten, schrittweise soweit vergrößert, daß im April 1999 etwa ein Drittel der Tochtermodule in Betrieb sind. Die Inbetriebnahme zusätzlicher Module soll, parallel zur Vervollständigung des Detektors, fortgeführt werden.

Während der Datennahme 1998 wurden der Switch<sup>1</sup> und ein Prototyp-System der ersten Triggerstufe in Betrieb genommen und dabei die Trigger-Raten erhöht. Mit dem Betrieb zahlreicher Tochter-Module und der Schnittstellen zu unterschiedlichen Front-End-Systemen gleichzeitig sowie der Erweiterung der Trigger-Systeme wurden Anfor-

derungen an das schnelle Kontrollsystem gestellt, die in Testumgebungen zuvor nicht erreicht wurden. Dabei wurden Fehler des schnellen Kontrollsystems sichtbar, die in den vorangegangenen Tests nicht erkannt werden konnten, so daß die Datennahmeperiode 1998 von ständiger Fehleranalyse und Fehlerbeseitigung in der Elektronik begleitet war. Die Kontroll- und Überwachungssoftware, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, ist seit Beginn der Datennahme 1998 ständig zuverlässig im Einsatz.

Bei der Analyse der Zeitreferenzsignale, die durch das System verteilt werden, wurde festgestellt, daß die Konfigurierbarkeit des Taktsignals die Anforderungen erfüllt; das Signal kann in jedem Tochter-Modul linear in Schritten von  $\approx 490$  ps über mehr als einen ganzen Taktzyklus (96 ns) verzögert werden, um Signallauf- und Teilchenflugzeiten auszugleichen. Dabei liegt die Unsicherheit des Taktsignals bei  $\approx 200$  ps RMS. Stabilität und Präzision des Signals erfüllen die Anforderungen des Driftkammer-Systems, sofern die neueste Generation der optischen Empfänger verwendet wird.

Die Verteilung von Triggersignalen an die Front-End-Systeme mit einer minimalen Durchlaufzeit eines Triggersignals durch das schnelle Kontrollsystem von  $1,28 \mu\text{s}$  sowie die Identifikation der jeweils richtigen Speicherzelle funktionieren.

Die gelungene Synchronisierung der Teildetektoren konnte anhand von Daten der Meßperiode 1998 verifiziert werden. Der Dateneingang für Signale von der ersten Triggerstufe konnte mit einem Testboard getestet werden. Beim Einsatz eines Trigger-Prototyp-Systems wurden erste Möglichkeiten demonstriert, die das schnelle Kontrollsystem zur Analyse der Funktion der ersten Triggerstufe bietet. Abschließend wurden mögliche Störeinflüsse des Kontrollsystems auf die angestrebten Messungen des Experimentes HERA – B qualitativ diskutiert.

Um die Funktion der unidirektionalen Kommunikation zu den Tochter-Modulen überachen zu können, wurde vorgeschlagen, ein System aufzubauen, durch das Signale von diesen zurückgelesen werden können, z.B. Testpulse, Reset-Signale oder die Anzahl empfangener Triggersignale. Zur Wegbereitung für ein solches Überwachungssystem wurde auf den Tochter-Modulen eine Schnittstelle für die Anbindung an einen CAN-Feldbus implementiert.

Die Datennahme 1999 erfolgt, im Verhältnis zu den angestrebten Raten, noch relativ langsam. Mit der Beschleunigung des Systems durch fortschreitende Arbeit am Switch und an den ersten beiden Triggerstufen wird die stabile, präzise Funktion des Kontrollsystems stärker beansprucht werden als bisher. Auch der Detektor ist noch nicht vollständig aufgebaut. Zur Zeit wird das schnelle Kontrollsystem deshalb mit etwa einem Drittel der angestrebten ca. 30 Empfänger- und ca. 210 Tochter-Module betrieben. Parallel zur Inbetriebnahme zusätzlicher Detektorteile samt ihrer Front-End-Elektronik wird die Anzahl der Module weiter erhöht.

Mit dem schnellen Kontrollsystem steht eine zentrale Komponente des Datennahmesystems von HERA – B zur Verfügung, um nach der vollständigen Inbetriebnahme des Experimentes die Messungen zur CP-Verletzung in Zerfällen neutraler B-Mesonen durchzuführen.

<sup>1</sup>Netzwerk aus digitalen Signalprozessoren für den Datentransfer innerhalb der zweiten Triggerstufe

## Anhang A

### Glossar

Es ist nicht immer einfach, den Laborjargon in Schriftdeutsch zu übersetzen. Wörtliche Übersetzungen englischer Begriffe entsprechen nicht immer dem, was ausgedrückt werden soll, oder klingen verkrampft. Im folgenden sollen die englischen Ausdrücke, deren Verwendung mir unvermeidlich erschien, sowie die in der Arbeit verwendeten Abkürzungen zusammenfassend erläutert werden.

**ASIC:** Application Specific Integrated Circuit, Anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis.

**Bucket:** Bereich im  $E$ - $\phi$ -Raum, in dem Teilchen stabile Synchrotronschwingungen ausführen können.

**Bunch:** Bündel oder Paket von Teilchen, die sich innerhalb eines Buckets befinden.

**CAN:** Controller Area Network. Feldbus, der von der Firma Bosch für Anwendungen im Fahrzeugbau entwickelt wurde. Wird aber z.B. auch in Überwachungssystemen für die HERA-Magnete verwendet.

**Client/Server:** Ein Prozeß bzw. Rechner, der *Server*, stellt Dienste zur Verfügung, die von anderen Prozessen bzw. Rechnern, den *Clients*, in Anspruch genommen werden.

**DPRAM:** Dual Ported Random Access Memory, Speicher, auf den von zwei getrennten Bussen Wahlfrei zugegriffen werden kann.

**DSP:** Digitaler Signal-Prozessor

**FADC:** Fast Analog Digital Converter, Schneller Analog-Digital-Wandler.

**FCS:** Fast Control System. Das schnelle Kontrollsystem.

**FIFO:** First In First Out. Speicher, aus dem das Element, das zuerst hineingeschrieben wurde, auch zuerst wieder ausgelesen wird. Wird z.B. verwendet, um unregelmäßig eintreffende Signale, vor einer Verbindung mit Konstanter Übertragungsgeschwindigkeit zu puffern.

**FPGA:** Field Programmable Gate Array. Ein programmierbares logisches Bauelement.

**Front-End-Systeme:** Elektronik-Systeme, die dazu dienen, die Detektor-Signale aufzunehmen, zu digitalisieren und für die Zeit, die der ersten Triggerstufe zur Verfügung steht, zwischenspeichern.

**LEMO:** Standard für Steckverbindungen zwischen Koaxialkabeln.

**LVDS:** Low Voltage Differential Signal. Differentieller Spannungspegel, der zur Übertragung von Digitalsignalen über Twisted-Pair-Leitungen verwendet wird.

**L1, L2, L3, L4:** Bezeichnungen für die Triggerstufen. (englisch Level = Stufe)

**Phasenjitter:** Zittern der Periodendauer eines periodischen Signals

**Pretrigger:** Trigger-Vorstufe. Drei verschiedene Systeme (Elektron-, Myon- und „High- $pr$ “-Pretrigger, die durch Treffer in den entsprechenden Detektoren die Spurensuche der ersten Triggerstufe starten.

**Pretrigger-Link:** Schnittstelle vom Front-End-System zum Myon- oder „High- $pr$ “-Pretrigger-Prozessor. Ein eigenes Modul, daß Ausgangsdaten der Front-End-Systeme für die Übertragung zum Pretrigger aufbereitet und mit Ereignis-Identifikationsnummern versieht.

**RICH:** Ringbild-Čerenkovdetektor

**RPM:** Really Powerful Messaging. Auf UDP aufgesetztes Datenaustauschprotokoll für Prozesse der HERA - B -Datennahmesoftware.

**Tagging:** indirekte Identifikation eines neutralen  $B$ -Mesons durch Identifikation des zweiten erzeugten  $b$ -Quarks.

**Target:** Ziel. Materie, die in einen Teilchenstrahl gebracht oder auf die ein Teilchenstrahl gelenkt wird, um hochenergetische mit ruhenden Teilchen zur Wechselwirkung zu bringen.

**TDC:** Time-to-Digital-Converter. Ein Chip, der den zeitlichen Abstand zweier Eingangssignale als Digitalwert ausgibt. Wird zur Messung von Driftzeiten verwendet, indem der Abstand des Kammsignals zu einer Zeitreferenz digitalisiert wird.

**TDU:** Trigger Decision Unit. Prozessor, der die Entscheidung der ersten Triggerstufe trifft.

**TFU:** Track Finding Unit. Prozessor der ersten Triggerstufe zur Suche von Teilchen Spuren.

**TFU:** Track Parameter Unit. Prozessor der ersten Triggerstufe zur Ermittlung von Spurparametern wie Ladung und Impuls.

**Trigger:** Auslöser. Der Begriff wird im Sinne eines Systems verwendet, das die Weitergabe von Meßdaten zur detaillierteren Analyse auslöst, wenn sie bestimmten Kriterien genügen. Z.T. wird auch das Triggersignal kurz als Trigger bezeichnet.

**Trigger-Link:** Modul, daß Ausgangssignale der Front-End-Systeme der Spurdetektoren den Spurfundungsprozessoren der ersten Triggerstufe zur Verfügung stellt.

**TTL:** Transistor-Transistor-Logik. Definition von Spannungspegeln für Digitalsignale:  $> 2,3 \text{ V} = \text{TRUE}$ ,  $< 0,7 \text{ V} = \text{FALSE}$ . Der Bereich dazwischen ist verboten.

**VME:** VERSA Module on Eurocard. Ein Standard, der eine Bus-Schnittstelle und Platinenformate definiert.

## Anhang B

### Der Front-End-Kontroll-Bus

Die Verbindung der Tochter-Module des schnellen Kontrollsystems mit den Front-End-Modulen erfolgt über einen speziellen Bus, der 64 Leitungen belegt. Verwendet werden dafür die a- und c-Leiste des VME-P2-Steckers. Die Belegung der Leitungen ist in der folgenden Tabelle angegeben.

	a	b	c		
1	+5V	+5V	GND		
2	Test*	GND	Test		
3	GND	res.	GND	Test	Testpuls für die Front-End-Systeme, differentielles Signal
4	FLT-type0		FLT-type1	FLT-type	(3 Bit) Codierung der Trigger-Quelle
5	TX-error		FLT-type2	TX-error	signalisiert einen Übertragungsfehler der Glasfaserstrecke
6	FLT-acc		BX-FLT0	FLT-acc	Trigger-Impuls
7	BX-FLT1		BX-FLT2	BX-FLT	(7 Bit) Identifikationsnummer der auszulesenden Speicherzellen (des akzeptierten Ereignisses)
8	BX-FLT3		BX-FLT4	FLT	(16 Bit) laufende Nummer des akzeptierten Ereignisses
9	BX-FLT5		BX-FLT6	BX	(8 Bit) HERA-Taktzyklus-Identifikationsnummer (Schreibadresse für die Zwischenspeicher der Front-End-Module)
10	FLT0		FLT1	Reset	löst ein Zurücksetzen der Front-End-Module aus
11	FLT2	GND	FLT3	Strobe	(7 Bit)
12	FLT4	+5V	FLT5	SIG-1, -2	Externe Signale, die durch das Tochter-Modul geführt werden (zum Stoppen des Elektronik-Pretriggers).
13	FLT6		FLT7	BX-clock	HERA-Taktsignal, differentiell
14	FLT8		FLT9		
15	FLT10		FLT11		
16	FLT12		FLT13		
17	FLT14		FLT15		
18	GND		GND		
19	BX0		BX1		
20	BX2		BX3		
21	BX4		BX5		
22	BX6	GND	BX7		
23	GND		GND		
24	Reset		Strobe1		
25	Strobe2		Strobe3		
26	Strobe4		Strobe5		
27	Strobe6		Strobe7		
28	GND		GND		
29	SIG-2		SIG-1		
30	GND		GND		
31	BX-clock*	GND	BX-clock		
32	+5V	+5V	GND		

## Anhang C

### Das Server-Hauptprogramm

```

#include <string.h>           /*Definitionen der C-Standardbibliothek*/
#include <stdio.h>           /*-----*/
#include <stdlib.h>         /*-----*/
#include "vme.h"             /*Definitionen für VME-Zugriffe*/
#include "grr.h"             /*Definitionen für HERA-B-Fehlerbehandlung*/
#include "class.h"          /*Definitionen für das HERA-B-Netzwerkprotokoll*/
#include "rpm.h"            /*-----*/
#include "FCS_hardware.h"   /*Definitionen für das schnelle Kontrollsystem*/
#include "FCS_logical.h"   /*-----*/
#include "FCS_srv_subs.h"   /*-----*/
#include "FCS_server.h"     /*-----*/

int main (int argc, const char **argv) {
    extern vmelong *base;           /*Variablendeklarationen*/
    extern int printFlag;
    extern int maxMessageSize;
    extern rpm_hdr *header;
    extern message *msg;
    extern FCS_daughter daughter_state[NUM_CLUS][NUM_DAU];
    int err=0;
    int exit_flag=0;

    FCSSRV_init(argc,argv);        /*Server-Prozeß und Elektronik initialisieren*/
    while ( 1 ) {
        err=rpm_receive(header, msg, maxMessageSize, BLOCK_FOREVER); /*Warten*/
        if (err) {                  /*Fehlerbehandlung*/
            if (printFlag) printf ("rpm_receive - error:%i\n",err);
            grr_error(GRR_SERROR,"FCS_server: rpm_receive failed",err);
        } else {
            switch (header->type){   /*Nachricht interpretieren*/
                case MINIT:          /*Elektronik neu initialisieren*/
                    FCSSRV_reinit(msg);
                    break;
                case MRESET:        /*Front-End-Systeme zurücksetzen*/
                    FCSSRV_reset(header, msg);
                    break;
                :
            }
        }
    }
}

```

(Weitere Möglichkeiten der Kürze halber ausgelassen)

```

:
case MEXIT: /*Server beenden*/
    exit_flag = 1; /*Flagge setzen*/
    break;
default: /*Nachricht nicht identifiziert?*/
    FCSSRV_complain(header);
    break;
} /*Ende der switch-Anweisung*/
if (exit_flag) break; /*Falls Flagge gesetzt, Server beenden*/
} /*Ende der if-else-Verzweigung*/
} /*Ende der Endlosschleife*/
FCSSRV_exit(); /*Zurücksetzen der Elektronik, Freigabe von Speicher*/
return 0; /*Programmende*/
}

```

## Literaturverzeichnis

- [alb90] Albrecht H et al.  
*Determination of the tau-neutrino helicity.*  
Phys Lett **B250** (1990), 164.
- [alb92] Albrecht H et al.  
*A new determination of the  $B^0\bar{B}^0$  oscillation strength.*  
Z Phys **C55** (1992), 357.
- [alb92a] Albrecht H et al.  
*HERA - B . An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring. Letter of Intent.*  
DESY-PRC 92/04.
- [ang98a] Angelopoulos A et al.  
*First direct observation of time-reversal non-invariance in the neutral kaon system.*  
CERN-EP/98-153, eingereicht bei Phys Lett B.
- [ang98b] Angelopoulos A et al.  
*A determination of the CPT parameter  $Re(\delta)$  from the semileptonic decay of strangeness-tagged neutral kaons.*  
CERN-EP/98-154, eingereicht bei Phys Lett B.
- [are98] Arenton M.  
Präsentation bei dem Internationalen Symposium „Heavy Quarks 98“.
- [atl94] ATLAS Technical Proposal. CERN/LHCC 94-43. section 5.3.4.
- [avo96] Avoni G et al.  
*The ECAL radout board.*  
HERA - B internes Dokument 96-018.
- [bar93] Bartelt J et al.  
*Measurement of Charmless Semileptonic Decays of B Mesons.*  
Phys Rev Lett **71** (1993), 4111.
- [bul97] Bulla A.  
*Die Entwicklung eines ringabbildenden Čerenkov-Zählers für den Detektor HERA - B .*  
Dissertation Universität Hamburg. 1997.
- [cdf99] CDF Collaboration.  
*A Measurement of  $\sin 2\beta$  from  $B \rightarrow J/\psi K_s^0$  with the CDF Detector.*  
Preliminary Result for Distribution. CDF/PUB/BOTTOM/CDF/4855.

- [chr64] Christenson JH et al.  
*Evidence for the  $2\pi$  decay of the  $K_s^0$  meson.*  
Phys Rev Lett **13** (1964), 138.
- [cms94] CMS Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38. section 9.4.5.
- [des99] WWW-Server des DESY. <http://www.desy.de>
- [duh98] Duhme, HT (DESY-MKI). Persönliche Mitteilung. 1998.
- [edw93] Edwards DA and Syphers MJ.  
*An introduction to the physics of high energy accelerators.*  
New York: Wiley; 1993.
- [ehr99] Ehret K. Persönliche Mitteilung. 1999.
- [feu96] Feuerstack-Raible M et al.  
*The Microstrip Detector Readout System at HERA - B .*  
in: Second Workshop on Electronics for LHC Experiments 23-27 Sept. 1996, Balatonfred, Hungary (published as CERN/LHCC/96-39).
- [ful97] Fuljahn T et al.  
*Implementation of the HERA - B First Level Trigger.*  
Proc Computing in High Energy Physics. 1997, 246-248.
- [ful97a] Fuljahn T et al.  
*Concept of the First Level Trigger for HERA - B .*  
Proc Xth IEEE Real Time Conference. Beaune, France, 1997, 71-75,  
IEEE Trans Nucl Sci **45** (1998), 1782-1786.
- [ful98] Fuljahn T.  
*FCS Documentation.*  
HERA - B internes Dokument **98-212**.
- [ful98a] Fuljahn T et al.  
*The Fast Control System for HERA - B .*  
IEEE Nucl Sci Symp, Toronto, Canada, 1998.
- [ful99] Fuljahn T.  
*Documentation of FCS software.*  
HERA - B internes Dokument **99-014**.
- [gel99] Gellrich A. Persönliche Mitteilungen. 1998-1999.
- [ger98] Gerndt E.  
*FLT status February 1998.*  
HERA - B internes Dokument **98-043**.
- [glä95] Gläß J et al.  
*Design of the HERA - B First Level Trigger.*  
Proc IEEE Nucl Sci Symp, San Francisco, USA, 1995, 612-616.

- [gol58] Goldhaber M, Grodzins L and Sunyar WA.  
*Helicity of Neutrinos.*  
Phys Rev **109** (1958), 1015.
- [har95] Hartouni E et al.  
*HERA - B . 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.
- [hoc99a] Hochweller G, Gasiorek P und Delfs G. Persönliche Mitteilungen. 1998-1999.
- [hoc99b] Hochweller G, Gasiorek P und Delfs G.  
WWW-Server der DESY-Elektronikgruppe FEA.  
FEA-Manuals. HERA - B Fast Control System.  
<http://www-fea.desy.de/manuals/manuals.htm>
- [igo97] Igonkina O et al.  
*ECAL performances for  $J/\psi$  reconstruction.*  
HERA - B internes Dokument **97-150**.
- [jar88] Jarlskog C.  
*Phenomenology of CP Violation.*  
Proc XVI Int. Meeting on Fundamental Phys. World Scientific 1988, 40ff.
- [kal60] Kalman RE.  
*A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems.*  
Trans ASME, J Basic Engineering, series D, Vol. 82 (1960), 35-46.
- [kal61] Kalman RE and Bucy RS.  
*New Results in Linear Filtering and Prediction Problems.*  
Trans ASME, J Basic Engineering, series D, Vol. 83 (1961), 95-108.
- [kap98] Kapitza H und Steinkamp O. Persönliche Mitteilungen. 1998.
- [ker90] Kernighan BW and Ritchie DM.  
*Programmieren in C. Zweite Ausgabe. ANSI C.*  
London: Prentice-Hall International; 1990.
- [kob73] Kobayashi M and Maskawa T.  
*CP-Verletzung in the Renormalizable Theory of Weak Interaction.*  
Prog Theor Phys **49** (1973), 652.
- [lee56] Lee TD and Yang CN.  
*Question of Parity Conservation in Weak Interactions.*  
Phys Rev **104** (1956), 254.
- [loh92] Lohrmann E.  
*Hochenergiephysik.*  
Stuttgart: Teubner; 1992.

- [loh94] Lohse T et al.  
*HERA - B . An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring. Proposal.*  
DESY-PRC 94/02.
- [loh99] Lohse T, Somov A, Wagner G. Persönliche Mitteilungen. 1999.
- [lue57] Lüders G.  
*Proof of the TCP Theorem.*  
Ann Phys 2 (1957), 1.
- [med99] Medinnis M. Persönliche Mitteilung. 1999.
- [mel98] Mele S.  
*Indirect Measurement of the Vertex and Angles of the Unitarity Triangle.*  
CERN-EP/98-133.
- [msc98] *Front End Driver Board for DESY HERA - B Outer Tracker System*  
*DES GB-0000-TDC Technical Reference Manual V1.0*  
MSC Vertriebs GmbH, Stutensee.
- [nir97] Nir Y.  
*Recent Developments in Theory of CP Violation.*  
hep-ph/9709301.
- [noe18] Noether E.  
*Invariante Variationsprobleme.*  
Nachr v d Ges d Wiss zu Göttingen 2 (1918), 235.
- [pdg98] The Particle Data Group.  
*Review of Particle Physics.*  
The European Physical Journal 3 (1998), 1-794.
- [per90] Perkins DH.  
*Hochenergiephysik.*  
Addison-Wesley; 1990.
- [per98] Pernack R.  
*Untersuchung von Gasmischungen mit Blick auf die im Spurkammersystem des HERA - B -Detektors erreichbare Effizienz und Auflösung*  
Diplomarbeit Universität Rostock. 1998.
- [res95] Reßing D.  
*DAQ Architecture & Protocols.*  
HERA - B internes Dokument 95-051.
- [res96] Reßing D.  
*First level trigger for HERA - B .*  
Nucl Instr Meth A 384 (1996), 131-135.

- [rie97] Rieling J.  
*Entwicklung eines Silizium-Vertex-Detektors für das HERA - B Experiment.*  
Dissertation Universität Heidelberg. 1997.
- [sam99] Samtleben D. Persönliche Mitteilung. 1999.
- [san99] Sanchez F. Persönliche Mitteilung. 1999.
- [scha98] Scharein S. Persönliche Mitteilung. 1998.
- [schu95] Schulz HD.  
*Trigger Concept of the HERA - B Experiment.*  
Nucl Phys B 44 (1995), 441-447.
- [schu99] Schubert KR.  
*Verletzung der Zeitumkehr direkt beobachtet.*  
Phys Bl 55 (1999), 14-16.
- [schw98] Schwanke U et al.  
*Status der Arbeiten an der Online-Rekonstruktionsfarm des HERA - B - Experimentes.*  
Vortrag T 310.3. Frühjahrstagung der DPG 1998.
- [spr96] Spratte S.  
*Untersuchungen zu den Eigenschaften eines internen Drahttargets für das HERA - B Experiment.*  
Diplomarbeit Universität Dortmund. 1996.
- [sym98] Symalla M. Persönliche Mitteilung. 1998.
- [tho96] Thom J.  
*Vorbereitung eines Experimentes zur Messung der  $B_s^0 \bar{B}_s^0$ -Mischung bei HERA - B .*  
Diplomarbeit Universität Hamburg. 1996.
- [toi98] Toifl T et al.  
*A 4-Channel Rad-hard delay generation ASIC with 1ns Timing Resolution for Atlas/LHC.*  
IEEE Nucl Sci Symp, Toronto, Canada, 1998.
- [uwe98] Uwer, U. Persönliche Mitteilung. 1998.
- [wan99] Wanke, R. Persönliche Mitteilung. 1999.
- [wol64] Wolfenstein L.  
*Violation of CP invariance and the possibility of very weak interactions.*  
Phys Rev Lett 13 (1964), 562.
- [wol83] Wolfenstein L.  
*Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix.*  
Phys Rev Lett 51 (1983), 1945.

- [wu57] Wu CS et al.  
*Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay.*  
Phys Rev **105** (1957), 1413.
- [wur96] Wurth R, Beck M und Zimmermann R.  
*Methods and Results of the TDC-Hit-Chip Tests at Heidelberg*  
HERA – B internes Dokument **96-192**.
- [zwe98] Zweizig, J. Persönliche Mitteilungen. 1998.

## Danksagung

Zahlreiche Personen haben zum Gelingen der Arbeit und zur Gestaltung der vergangenen dreieinhalb Jahre beigetragen.

Dr. Andreas Schwarz danke ich für die Betreuung der Arbeit, die kritische Durchsicht meiner allmählich wachsenden Entwürfe und die Anfertigung des Gutachtens.

Prof. Dr. Walter Schmidt-Parzefall war meine Schnittstelle zur Universität, während ich in der DESY-Gruppe arbeitete. Ich danke ihm für manche Diskussion und die Anfertigung der Gutachten über Dissertation und Disputation.

Prof. Dr. Peter Schmüser danke ich, daß er als Gutachter der Disputation zur Verfügung stand.

Dr. Dominik Reßing, der die Entwicklung des schnellen Kontrollsystems begonnen hatte, hat meine Arbeit im Alltag betreut und großen Anteil an ihrem erfolgreichen Abschluß.

Dr. Gerd Hochweller, Peter Gasiorek und Günter Delfs von der DESY-Elektronikentwicklung FEA danke ich für die angenehme Zusammenarbeit und die Geduld, mit der sie die Fehlermeldungen, Änderungs- und Terminwünsche, die ich immer wieder an sie herantrug, aufnahmen und bearbeiteten.

Zahlreiche Kollegen der HERA – B -Kollaboration trugen mit Ihren Verständnisfragen zu Hard- und Software, Fehlerbeschreibungen und Verbesserungsvorschlägen zur Entwicklung des Kontrollsystems bei. Stellvertretend seien genannt: Dr. John Zweizig, Dr. Bernhard Schwingenheuer, Dr. Reinhard Eckmann, Dr. Marco Bruschi, Dr. Ulrich Uwer, Michael Beck und Raoul Zimmermann.

Für ihre positiven Beiträge zur Arbeitsatmosphäre in der Anfangszeit meiner Tätigkeit bei HERA – B danke ich Dr. Jörg Lüdemann, Dr. Fouzia Saadi-Lüdemann, Dr. Norbert Tesch und Dr. Holger Thurn.

Den Eisprinzessinnen danke ich für fröhliche Mittagspausen, „das erste Highlight des Tages“, das häufig das einzige war. Auch das „Promotions-Antifrust-Paket“ von meinen Mitdoktoranden Dirk Kahnert, Joachim Flammer und Marko Bahte hat seinen Zweck erfüllt.

Zahlreiche weitere Kollegen in der HERA – B -Kollaboration haben zum Gelingen meiner Arbeit oder zur Verbesserung der Atmosphäre beigetragen. Hiermit bedanke ich mich bei allen, die nicht namentlich genannt sind.

Meiner Freundin Dorothee und unseren beiden Familien danke ich für die vielfältige Unterstützung, die ich in den vergangenen Jahren erfahren habe.

