Entwicklung eines Simulationsprogramms und Implementierung schneller Spurfitalgorithmen für den neuen H1-Driftkammertrigger

Vom Fachbereich Physik
der Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte

Dissertation

von

Dipl. Phys. Christoph Wissing
aus Hattingen (Ruhr)

Dortmund Dezember 2002

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Das moderne, allgemein akzeptierte, Bild der Elementarteilchen und der fundamentalen Wechselwirkungen ist durch das sogenannte Standardmodell gegeben. In diesem Modell wird die Materie aus Fermionen, die Spin 1/2 tragen, aufgebaut. Es gibt 12 fundamentale Fermionen, die noch einmal in 6 Quarks und 6 Leptonen unterteilt werden, siehe Tabelle 1.1. Zu jedem dieser Fermionen existiert ein Antifermion, bei dem alle ladungsartigen Quantenzahlen umgekehrtes Vorzeichen haben. Spin und Masse[1] von Fermion und Antifermion sind gleich.

Quark	el. Ladung	Masse	Lepton	el. Ladung	Masse
u	2/3	1,5 – 4,5 MeV	e^-	–1	511 keV
d	–1/3	5 – 8,5 MeV	μ^-	–1	106 MeV
s	–1/3	80 – 155 MeV	τ^-	–1	1,8 GeV
c	2/3	1,0 – 1,4 GeV	ν_e	0	< 3 eV
b	–1/3	4,0 – 4,5 GeV	ν_μ	0	$< 0{,}19$ MeV
t	2/3	174 ± 5 GeV	ν_τ	0	$< 18{,}2$ MeV

Tabelle 1.1: Übersicht der fundamentalen Fermionen des Standardmodells. Die Massenangaben stammen aus [1].

Zur Beschreibung von Teilchenwechselwirkungen haben sich sogenannte Eichtheorien bewährt, in denen die Kraft über Bosonen mit ganzzahligem Spin übertragen wird. Es sind folgende Wechselwirkungen bekannt:

- **Elektromagnetische Wechselwirkung**
  Die elektromagnetische Kraft wirkt zwischen allen Teilchen, die elektrische Ladung tragen. Das Boson, das diese Kraft überträgt ist das Photon. Es hat den Spin 1, ist elektrisch neutral und besitzt keine Masse. Die Eichtheorie, die elektromagnetische Prozesse beschreibt, ist die Quantenelektrodynamik (QED).

- **Schwache Kernkraft**
  Die schwache Kernkraft wirkt auf alle Teilchen des Standardmodells. Es existieren drei

[1] Massen, Impulse und Energien werden in dieser Arbeit in "natürlichen Einheiten" angegeben. Man setzt $\hbar = c = 1$.

massive Bosonen, die diese Kraft übertragen. Das elektrisch neutrale Z^0 hat eine Masse von 91,2 GeV [1], die geladenen Bosonen W^+ und W^- haben eine Masse von 80,4 GeV [1]. Im Rahmen des Modells von Glashow, Weinberg und Salam [2, 3, 4, 5, 6] ist gelungen, elektromagnetische und schwache Kraft in einer vereinheitlichten Eichtheorie zu beschreiben, die auch unter dem Namen elektroschwache Theorie bekannt ist.

- **Starke Kernkraft**
  Die starke Kernkraft wirkt nur zwischen Quarks (und Antiquarks). Neben elektrischer Ladung tragen Quarks eine sogenannte Farbladung. Diese wird von Gluonen übertragen. Da die Gluonen selbst Farbladung tragen, können sie mit sich selbst wechselwirken. Die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen wird durch die Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben.

- **Gravitation**
  Die vierte elementare Kraft ist die Gravitation. Gravitationskräfte wirken zwischen allen Teilchen, die Masse haben. Eine Beschreibung dieser Kraft im Rahmen einer Eichtheorie ist bisher nicht gelungen. Im Vergleich zu den oben genannten Kräften ist die Gravitation extrem schwach. Für Prozesse im Bereich der Elementarteilchenphysik kann diese Kraft im allgemeinen vernachlässigt werden.

Zur Aufklärung der Struktur der Materie haben sich Streuexperimente als effektives Werkzeug erwiesen. Zahlreiche fundamentale Erkenntnisse konnten durch die Auswertung solcher Experimente gewonnen werden. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde von Rutherford durch Streuung von α-Teilchen an Goldatomen gezeigt, daß nahezu die gesamte Masse eines Atoms im Kern konzentriert ist [7]. Da gemäß der Unschärferelation das Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge der eingesetzten Strahlung limitiert ist, bedurfte es Strahlung mit höherer Energie, um die Struktur der Atomkerne detailierter zu untersuchen. Im Jahre 1956 gelang es Hofstadter durch Streuung von Elektronen an einem Wasserstofftarget zu zeigen, daß das Proton nicht punktförmig ist, sondern einen mittleren Ladungsradius von etwa 0,8 fm besitzt [8]. Nachdem die Energie der Elektronen, die am Proton gestreut wurden, weiter erhöht wurde, ergab die Analyse der Messungen, daß das Proton aus punktförmigen Konstituenten, sogenannten Partonen, besteht [9]. Diese Partonen wurden später mit den Quarks identifiziert [10], wodurch das Fundament des modernen Standardmodells gelegt war.

Aufgabe der heutigen experimentellen Elementarteilchenphysik ist neben der Messung der Parameter des Standardmodells und der präzisen Prüfung der Vorhersagen die Suche nach Hinweisen, die eine Erweiterung des bestehenden Modells nötig machen. Generell ist man bestrebt, alle Kräfte in einer vereinheitlichten Theorie beschreiben zu können. Mit einer solchen *Grand Unified Theory (GUT)* hofft man auch, tiefere Einsicht in den Mechanismus zu erlangen, der die Teilchenmassen und die Stärke der Kopplungskonstanten festlegt.

Ein Forschungslabor, das sich diesen Fragestellungen zuwendet, ist das **D**eutsche **E**lektronen **Sy**nchrotron (DESY) in Hamburg. Dort werden am einzigen Elektron-Proton-Beschleuniger HERA[2] Streuprozesse von Elektronen und Protonen bei höchsten Energien untersucht und die Meßergebnisse mit QCD-Vorhersagen verglichen. Im Jahr 2001 wurden die Luminosität des Beschleunigers deutlich gesteigert und die Experimente erheblich modernisiert. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen dieses Upgrade-Programms durchgeführt.

[2]**H**adron **E**lektron **R**ing**a**nlage

Damit die Experimente von der erhöhten Leistung des Beschleunigers profitieren können und Messungen ermöglichen, die bisher nicht durchgeführt werden konnten, müssen besonders die Triggermechanismen der Experimente verbessert werden. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Entwicklung eines Konzeptes eines neuen Spurtriggersystems beigetragen. Von großer Wichtigkeit war dabei die Implementierung einer Simulation, mit der das Potential des Konzeptes untermauert werden konnte. Durch eine detailierte Analyse der eingesetzten Algorithmen und der verfügbaren Elektronik konnte gezeigt werden, daß eine Anwendung in einem Triggersystem möglich ist. In dieser Arbeit wurden Spurfitalgorithmen und ihre Implementierung eingehend untersucht.

Im folgenden werden die wichtigsten Grundlagen der Elektron-Proton-Streuung beschrieben. Im Kapitel 2 werden der HERA-Beschleuniger und im Kapitel 3 das H1-Experiment vorgestellt. Kapitel 4 stellt das **F**ast-**T**rack-**T**rigger-Projekt (FTT) und für dieses Projekt wichtige Algorithmen vor. Das zum FTT gehörende Simulationspaket FTTEMU wird im fünften Kapitel beschrieben. Die Realisierung des FTT in Hardware sowie Besonderheiten der Implementierung der Algorithmen sind Gegenstand des sechsten Kapitels.

1.1 Tiefinelastische Elektron-Proton-Streuung

In der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung (*ep*-Streuung) wird ein Elektron mit dem Viererimpuls k an einem Proton mit dem Viererimpuls p gestreut. Der Prozeß ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt. Die Wechselwirkung erfolgt durch Austausch eines Photons oder eines neutralen Z^0-Bosons. Das Elektron hat nach der Wechselwirkung den Viererimpuls k'. Bei dieser Prozeßklasse spricht man von *neutralem Strom*. Wird stattdessen ein geladenes W-Boson ausgetauscht, nennt man den Prozeß *geladenen Strom*. Hierbei liegt im Endzustand ein Neutrino mit dem Viererimpuls k' vor. Der hadronische Endzustand wird in beiden Fällen mit X bezeichnet.

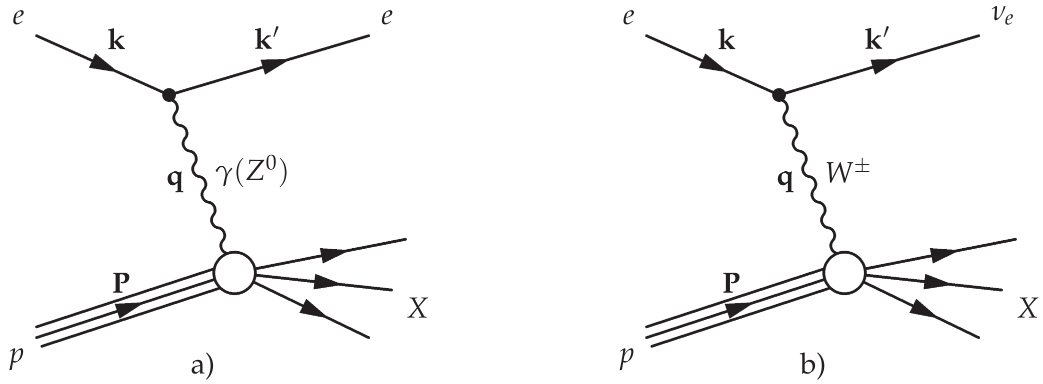


Abbildung 1.1: Feynman-Graphen niedrigster Ordnung für die Elektron-Proton-Streuung. Man unterscheidet zwischen Ereignissen mit Austausch von neutralen (a) und geladenen Eichbosonen (b).

1.1.1 Kinematik

Zur Beschreibung von Ereignissen der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung werden üblicherweise folgende Variablen benutzt:

- Das Quadrat der Schwerpunktsenergie
$$s = (p + k)^2.$$
Diese Größe ist durch die Energien der kollidierenden Teilchenstrahlen festgelegt.

- Das Quadrat des Impulsübertrages
$$Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2.$$

- Die Bjørkenskalenvariable
$$x = \frac{Q^2}{2pq}.$$
Im naiven Quark-Parton-Modell gibt diese Variable an, welchen Bruchteil vom Gesamtimpuls des Protons das an der Wechselwirkung teilnehmende Parton trägt. Der Wertebereich von dieser Variable ist $0 \leq x \leq 1$.

- Die Inelastizität
$$y = \frac{pq}{pk}$$
beschreibt im Ruhesystem des Protons den Energieübertrag des einlaufenden Leptons. Der Wertebereich ist ebenfalls auf $0 \leq y \leq 1$ beschränkt.

Nur drei der aufgelisteten lorenzinvarianten Größen sind unabhängig. Vernachlässigt man die Ruhemassen der Teilchen, so gilt folgende Beziehung:

$$Q^2 = xys. \tag{1.1}$$

1.1.2 Wirkungsquerschnitt der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung

Für kleine Impulsüberträge ($Q^2 \ll M_Z^2$) kann der Beitrag des Z^0-Austausches zum Wirkungsquerschnitt zur Reaktion $e + p \to e + X$ vernachlässigt werden. In niedrigster Ordnung (Bornsche Näherung) kann der Wirkungsquerschnitt der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung bei fester Schwerpunktsenergie wie folgt dargestellt werden:

$$\frac{d^2\sigma_{\text{Born}}}{dxdQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4}(y^2 x F_1(x, Q^2) + (1 - y)F_2(x, Q^2)). \tag{1.2}$$

Dabei ist α die elektromagnetische Feinstrukturkonstante. Die innere Struktur des Protons wird durch die Funktionen F_1 und F_2 parametrisiert.

Betrachtet man den Prozeß $e + p \to e + X$ bei höheren Impulsüberträgen, müssen für den Wirkungsquerschnitt ein zusätzlicher Term für den Z^0-Austausch sowie Interferenzterme berücksichtigt werden.

1.1.3 Das naive Quark-Parton-Modell

Im naiven Quark-Parton-Modell ist das Proton aus freien, punktförmigen Partonen, die den Spin 1/2 tragen, aufgebaut [10]. Die Streuung eines Elektrons am Proton wird in diesem Modell als Streuung an einem der Konstituenten beschrieben. Der gesamte Wirkungsquerschnitt ergibt sich als Überlagerung aller dieser Unterprozesse.

Die Partonen im Proton wurden als die Quarks identifiziert, die bereits zuvor von Gell-Mann postuliert worden waren, um die Vielzahl der bekannten Hadronen aus wenigen elementaren Bausteinen aufzubauen [11].

Im Quark-Parton-Modell wird die Verteilung der Quarks im Proton durch Dichtefunktionen $f_i(x)$ beschrieben. Diese Funktionen geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit man ein Quark des Typs i mit dem Impulsbruchteil x im Proton findet. Der Zusammenhang zu den Protonstrukturfunktionen F_1 und F_2 ist gegeben durch:

$$F_1(x, Q^2) = \frac{1}{2}\sum_i e_i^2 f_i(x) \tag{1.3}$$

$$F_2(x, Q^2) = x \sum_i e_i^2 f_i(x). \tag{1.4}$$

Dabei gibt e_i die elektrische Ladung des Teilchens i in Einheiten der Elementarladung an.

Die Gleichungen 1.3 und 1.4 können kombiniert werden zu:

$$F_2(x, Q^2) = 2xF_1(x, Q^2). \tag{1.5}$$

Diese Beziehung ist auch unter dem Namen Callan-Gross-Relation bekannt [12].

Es fällt auf, daß im Quark-Parton-Modell die Strukturfunktionen F_1 und F_2 unabhängig von Q^2 sind. Dieses Verhalten wurde von Bjørken vorhergesagt und ist auch unter dem Begriff *Skaleninvarianz* bekannt. Diese Skaleninvarianz ist 1968 in der Tat für mittlere Werte der Bjørkenskalenvariablen $x \approx 0{,}25$ beobachtet worden [13, 14].

In späteren Messungen ist dann der kinematische Bereich der Elektron-Proton-Streuung erweitert worden, wobei eine Verletzung der Skaleninvarianz beobachtet wurde. Um dieses Verhalten zu erklären, muß die Theorie der starken Wechselwirkung herangezogen werden, in der neben den Quarks die Gluonen als Träger der Wechselwirkung, eine wichtige Rolle spielen.

1.1.4 Das QCD-basierte Modell des Protons

In der Quanten-Chromo-Dynamik (QCD) gibt es das Konzept der Farbladung. Jedes Quark bekommt eine der Farben "rot", "grün" oder "blau" zugewiesen, wobei die Farbzusammensetzung stets so gewählt ist, daß die aus den Quarks aufgebauten Hadronen insgesamt farbneutral sind. Dadurch konnte gleichzeitig auch das Problem gelöst werden, daß es Hadronen gibt, die aus drei identischen Quarks zusammen gesetzt sind, wie zum Beispiel das Ω^-, das aus drei s-Quarks besteht. Ein solches Teilchen sollte es nach dem Pauli-Prinzip ohne Farbfreiheitsgrade nicht geben.

Die Farbe in der QCD kann als eine Art Ladung interpretiert werden. Diese Farbladung wird durch masselose Gluonen übertragen, die jedoch im Gegensatz zum elektrisch neutralen Photon der QED selbst Farbladung tragen. Dadurch können Gluonen miteinander wechselwirken.

Eine Konsequenz dieser Selbstwechselwirkung der Gluonen ist die Charakteristik der Kraft, die zwischen farbgeladenen Objekten wirkt. Vergrößert sich der Abstand, nimmt auch die Kraft zwischen den Objekten zu, was letztlich zur Folge hat, daß in der Natur nur farbneutrale Hadronen und keine einzelnen Quarks beobachtbar sind. Dieser Mechanismus wird auch als *Confinement* bezeichnet.

Bei sehr geringen Abständen stellt sich die Situation völlig gegensätzlich dar. Hier wird die Kraft zwischen farbgeladenen Objekten immer kleiner, so daß die Teilchen als "quasi frei" behandelt werden können. Man spricht hier von *asymptotischer Freiheit*.

In der tiefinelastischen Streuung ist die Virtualität des ausgetauschten Photons durch den Impulsübertrag Q^2 gegeben. Nach der Unschärferelation löst ein Photon mit hoher Virtualität kleine Abstände auf. Quantitativ wird das Q^2-abhängige Verhalten der Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung in führender Ordnung wie folgt beschrieben:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f)\,\ln(Q^2/\Lambda^2)}. \tag{1.6}$$

Dabei ist N_f die Zahl "aktiven" Quarksorten, für die gilt: $m_q^2 < Q^2$, und Λ ist ein Skalenparameter, der etwa zwischen 200 MeV und 300 MeV liegt. Nimmt α_s kleine Werte an, können Methoden der Störungsrechnung auf QCD-Probleme angewandt werden. Bei kleinen Impulsüberträgen, also großen Werten von α_s, werden diese Methoden zunehmend unbrauchbar.

Im QCD-basierten Bild besteht das Proton aus drei *Valenzquarks*, die über Gluonen miteinander wechselwirken. Die Gluonen können in ein virtuelles Quark-Antiquark-Paar (*Seequarks*) fluktuieren oder wegen ihrer Selbstwechselwirkung Gluonen abstrahlen, die dann ihrerseits wieder Quark-Antiquark-Paare erzeugen können. Dieser Mechanismus erklärt die Skalenverletzung, also die Abhängigkeit der Strukturfunktion F_2 von Q^2 [15]. Mit zunehmender Virtualität löst das Photon immer feinere Strukturen im Proton auf, das heißt, es werden immer mehr Seequarks "sichtbar" gemacht. Durch die fortwährenden Abstrahlungsprozesse tragen die Seequarks einen kleinen Impulsbruchteil des Protons. Man erwartet folglich, daß F_2 für kleine x mit steigendem Q^2 wächst.

Die Dichteverteilungen von Quarks und Gluonen können bisher nicht aus fundamentalen Prinzipien abgeleitet werden. Stattdessen wird versucht, durch einen Ansatz eines funktionalen Zusammenhangs eine Beschreibung der Partonverteilungen zu finden. Die freien Parameter dieser Ansätze werden durch Anpassung an Messungen bestimmt. Recht erfolgreiche Parametrisierungen der Partondichten stammen zum Beispiel von Glück, Reya und Vogt (GRV) [16], von Martin, Ryskin, Sterling und Thorne (MRST) [17] und der CTEQ Arbeitsgruppe [18].

Es ist jedoch mit Hilfe der QCD möglich, die Evolution dieser Verteilungen von einem gegeben Wert Q_0^2 zu einem anderen zu berechnen. Diese Q^2-Evolution der Quark- und Gluondichtefunktionen stammt von Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi (DGLAP)[19, 20, 21]:

$$\frac{\partial q_i(x,Q^2)}{\partial \ln Q^2} = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi}\int_x^1 \frac{dy}{y}\left[q_i(y,Q^2)P_{q_iq_i}\left(\frac{x}{y}\right) + g(y,Q^2)P_{q_ig}\left(\frac{x}{y}\right)\right], \tag{1.7}$$

$$\frac{\partial g(x,Q^2)}{\partial \ln Q^2} = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi}\int_x^1 \frac{dy}{y}\left[\sum_{i=1}^{N_f} q_i(y,Q^2)P_{gq_i}\left(\frac{x}{y}\right) + g(y,Q^2)P_{gg}\left(\frac{x}{y}\right)\right]. \tag{1.8}$$

Dabei bedeuten:

$q_i(y,Q^2)$	:	Quarkdichteverteilung für die Quarksorte i
$g(y,Q^2)$	:	Gluondichteverteilung
$P_{ij}(z)$	:	Die Splittingfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Prozeß an, daß ein Parton j ein Parton i erzeugt, das den Bruchteil z des Impulses des Partons j trägt
$\alpha_s(Q^2)$	:	Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung
N_f	:	Anzahl der Quarksorten

Die Splittingfunktionen sind in niedrigster Ordnung schematisch in Abbildung 1.2 dargestellt. Im Rahmen der QCD können die Werte dieser Funktionen berechnet werden.

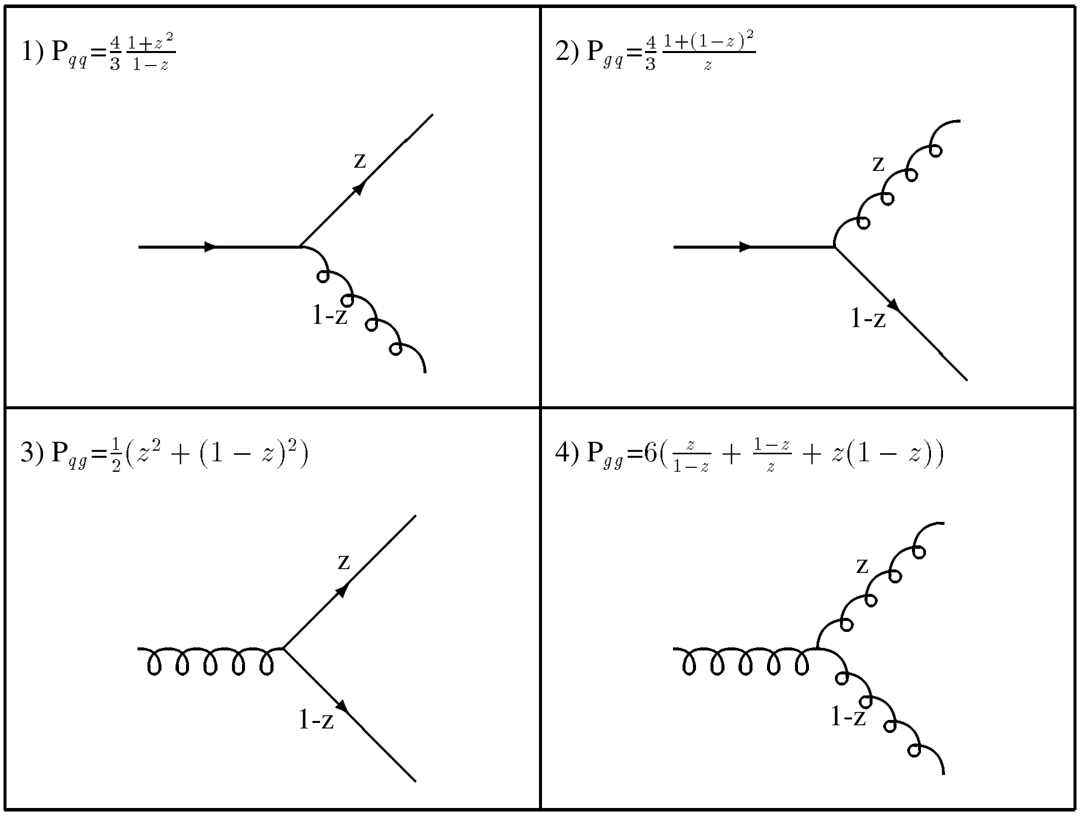


Abbildung 1.2: Splitting-Funktionen P_{ij} und die zugehörigen Graphen für die 4 Prozesse in niedrigster Ordnung.

Das QCD-basierte Modell des Protons ist außerordentlich erfolgreich. Abbildung 1.3 zeigt F_2 in Abhängigkeit von Q^2 für verschiedene x. Für $x \approx 0{,}25$ ist F_2 nahezu unabhängig von Q^2. Für kleine x sieht man deutlich den erwarteten Anstieg mit Q^2. Zu den Meßpunkten sind QCD-basierte Fits eingezeichnet. Über mehrerer Größenordnungen in Q^2 und x sind Messung und Vorhersage konsistent.

1.2 Weiterführende Messungen in der *ep*-Streuung

Für tiefinelastische *ep*-Streuung $e + p \rightarrow e + X$ gibt es im wesentlichen gute Meßwerte über einen großen Bereich der kinematischen Variablen x und Q^2. Die Fehler der in Abbildung 1.3 gezeigten Messungen sind abgesehen von den größten Werten für Q^2 durch systematische Effekte dominiert. Das zukünftige Programm bei HERA konzentriert sich auf Messungen, die bisher durch beschränkte Statistik limitiert waren. Hierzu gehören unter anderem die *ep*-Streuung bei höchsten Impulsüberträgen, die weitere Suche nach Prozessen und Teilchen jenseits des Standardmodells und die Analyse besonderer Endzustände der *ep*-Streuung [30].

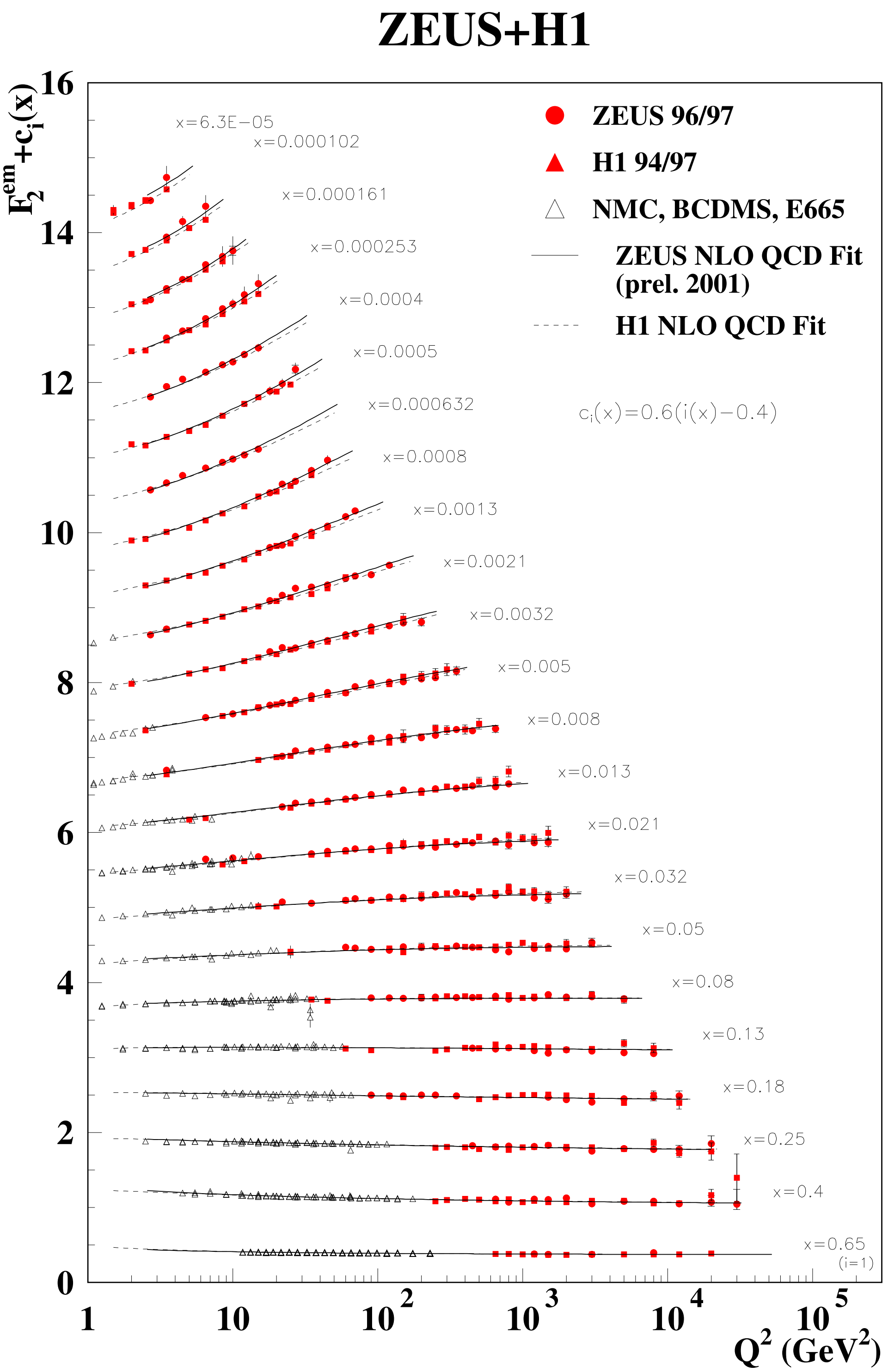


Abbildung 1.3: Protonstrukturfunktion in Abhängigkeit von Q^2 für verschiedene x. Neben den Messungen der HERA-Experimente H1 und ZEUS sind auch Daten von Fixed-Target-Experimenten eingetragen. Über mehrere Größenordnungen sind Messung und QCD-basierte Fits konsistent [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29].

1.2.1 DIS bei höchsten Q^2 und Prozesse jenseits des Standardmodells

Wie aus Formel 1.2 ersichtlich, ist Wirkungsquerschnitt für die tiefinelastische Elektron-Proton-Streuung proportional zu $1/Q^4$. Ereignisse mit sehr hohem Impulsübertrag sind folglich extrem selten. Dieser Q^2-Bereich ist aber sehr interessant, weil hier die Einflüsse durch den Z^0-Austausch sowie die Interferenz zwischen Z^0- und Photonaustausch Einfluß auf den Wirkungsquerschnitt haben. Daher erwartet man ein unterschiedliches Verhalten des Wirkungsquerschnitts für Elektron-Proton-Streuung und Positron-Proton-Streuung.

Abbildung 1.4 zeigt den reduzierten Wirkungsquerschnitt[3] für $e^- p \rightarrow e^- + X$ und $e^+ p \rightarrow e^+ + X$ als Funktion von Q^2 für verschiedene Werte der Bjørkenskalenvariablen x. Eingetragen ist neben Messungen verschiedener Experimente die Vorhersage eines Fits, der durch das Standardmodell motiviert ist.

Besonders im Bereich, wo man unterschiedliches Verhalten für Elektron- und Positronstreuung erwartet, sind die Fehler der Messung groß. Dominierende Unsicherheit ist hier der statistische Fehler, der durch den inneren Fehlerbalken gekennzeichnet ist. Die Präzision der Messung ist noch nicht ausreichend, um die Qualität der Vorhersage zu bewerten. Damit die Vorhersagen der elektroschwachen Theorie überprüft werden können, bedarf es deutlich verbesserter experimenteller Daten.

Neben der präzisen Vermessung der Protonstrukturfunktion ist eine wichtige Aufgabe der HERA-Experimente die Suche nach Phänomenen, die sich nicht im Rahmen des Standardmodells erklären lassen. Dies bezieht sich im besonderen auf die Suche nach "neuen" Teilchen und/oder Wechselwirkungen. Vorschläge zur Erweiterung des Standardmodells, die bisher nicht von experimentellen Daten ausgeschlossen werden, sagen Teilchen mit großer Ruhemasse und meist sehr kleinen Produktionsquerschnitten voraus. Damit solche "neue Physik" gefunden werden kann, müssen sehr viele Ereignisse zur Analyse vorliegen.

Trotz intensiver Suche in den HERA-I-Daten (1993 bis 2000) konnte weder vom H1-Experiment noch vom ZEUS-Experiment ein signifikantes Signal von neuen Phänomenen ausgemacht werden. Für eine bestimmte Ereignisklasse beobachtet das H1-Experiment jedoch etwas mehr Ereignisse als man vom Standardmodell erwartet [31]. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um Endzustände mit einem isolierten Leptonen (μ oder e) und fehlendem Transversalimpuls. Eine derartige Signatur kann im Standardmodell durch die Produktion realer W-Bosonen, die anschließend leptonisch zerfallen, erklärt werden. Das ZEUS-Experiment beobachtet für isolierte Myonen und Elektronen eine Zahl von Ereignissen, die mit dem Standardmodell verträglich ist. Allerdings werden vom ZEUS-Experiment mehr Ereignisse mit isoliertem τ-Lepton beobachtet als vom Standardmodell erwartet [32].

Neue Daten müssen zeigen, ob der leichte Überschuß in den Daten eine statistische Fluktuation ist, oder ob diese Ereignisse mit Prozessen jenseits des Standardmodells erklärt werden müssen. Eine besondere Herausforderung wird es bei der zukünftigen Datennahme sein, die Triggereffizienz für solche Ereignisse zu erhöhen. Insbesondere bei moderatem fehlenden Transversalimpuls im Bereich von etwa 12 GeV ist die Effizienz des Kalorimeter basierten Triggers mit etwa 50% nicht besonders zufrieden stellend. Erst bei fehlendem Transversalimpuls von mehr als 25 GeV erreicht man eine Triggereffizienz von 98% [33]. Es kann mit einer erheblichen Stei-

[3]Für den reduzierten Wirkungsquerschnitt wird im wesentlichen die $1/Q^4$-Abhängigkeit herausdividiert.

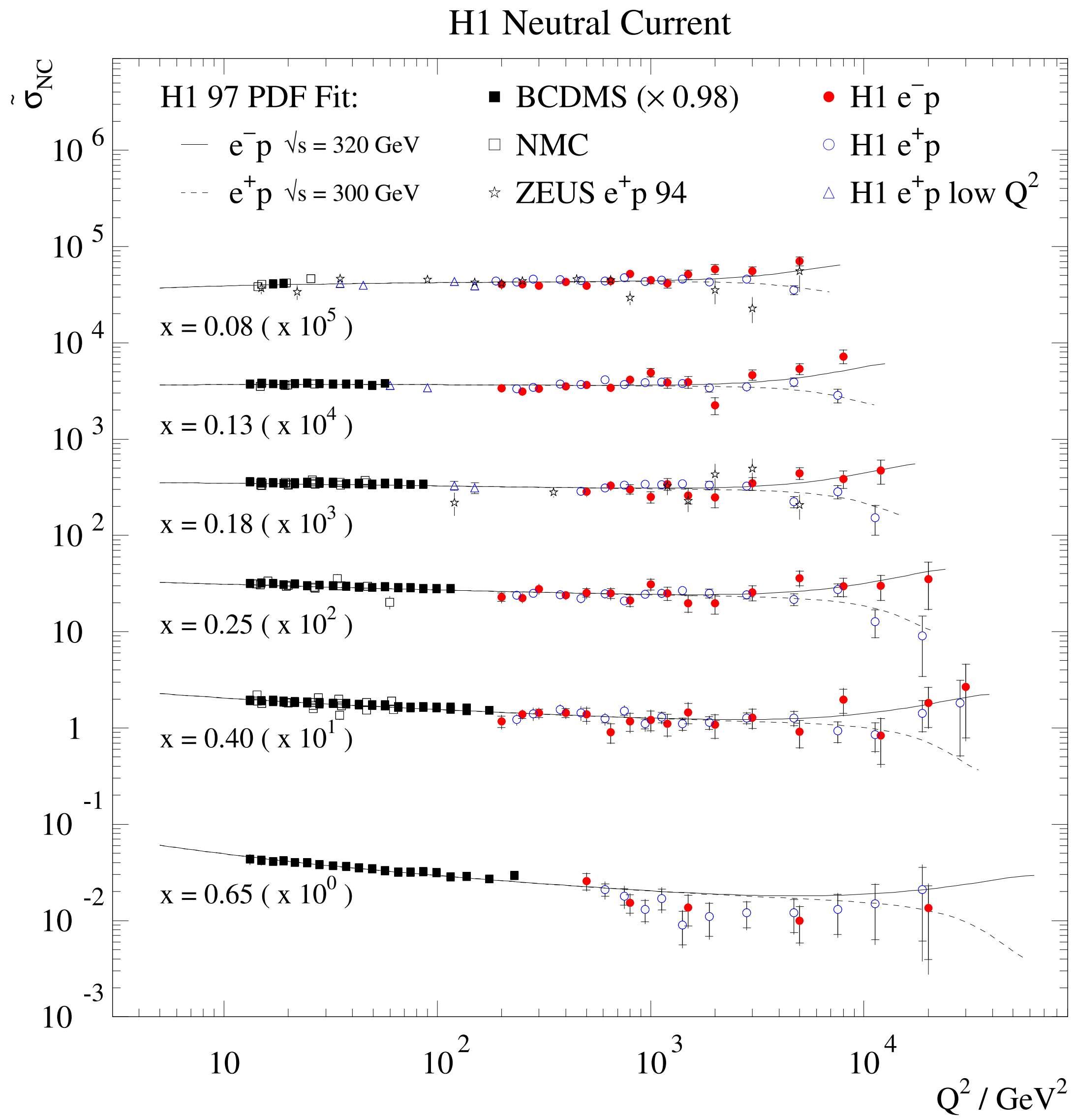


Abbildung 1.4: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den neutralen Strom in tiefinelastischer ep-Streuung bei großem x und hohem Q^2 [23].

gerung gerechnet werden, wenn es gelingt, die isolierte Spur des Leptons auf Triggerniveau zu identifizieren. Daher ist die gestiegene Kapazität des Spurtriggersystems, das in dieser Arbeit beschrieben wird, von Vorteil für die Selektion der genannten Ereignisklasse.

1.2.2 ep-Streuung mit besonderen Endzuständen

Zur Messung der Protonstrukturfunktion F_2 wird allgemein der Prozeß $e + p \to e + X$ betrachtet, wobei die Zusammensetzung des hadronischen Endzustands X unerheblich ist. Messungen von speziellen Endzuständen erlauben gezieltere Untersuchungen der Protonstruktur.

Ein wichtiges Beispiel für einen besonderen Endzustand ist die Produktion schwerer Quarks. Abbildung 1.5 zeigt einen Graphen für die $q\overline{q}$-Produktion in Photon-Gluon-Fusion in niedrigster Ordnung. Da es im Proton nur u- und d-Quarks als Valenzquarks gibt, ist der dominierende Prozeß zur Produktion eines $c(\overline{c})$-Quarks die Boson-Gluon-Fusion. Damit ist die Messung direkt sensitiv auf die Verteilung der Gluonen $g(x, Q^2)$ im Proton.

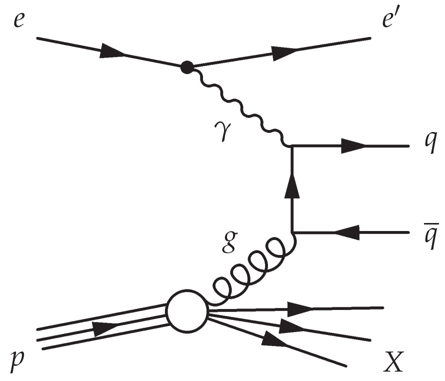


Abbildung 1.5: Graph zur Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares durch Photon-Gluon-Fusion.

Eine zur Messung der Gluondichte geeignete Ereignisklasse ist die *offene Charm-Produktion*. Einer der wichtigsten Kanäle ist die Produktion von geladenen D^*-Mesonen, deren Valenzquarkkonfigurationen $(c, \overline{d})$ für das positiv geladene Meson und $(\overline{c}, d)$ für negativ geladene Meson sind. Da die c-Quarks immer paarweise entstehen, liegen im Ereignis stets zwei Teilchen mit c-Inhalt vor. In der Praxis wird jedoch meist nur der Nachweis eines Kandidaten verlangt. Für den experimentellen Nachweis hat sich folgender Zerfall, der auch als *Goldener Charm-Zerfall* bekannt ist, als besonders geeignet erwiesen:

$$D^{*+} \stackrel{68{,}3\,\%}{\longrightarrow} D^0 \pi^+_{\text{slow}} \stackrel{3{,}85\,\%}{\longrightarrow} K^- \pi^+ \pi^+_{\text{slow}}. \tag{1.9}$$

Gleichung 1.9 gilt auch für den ladungskonjugierten Zerfall. Ebenfalls angegeben sind die Verzweigungsverhältnisse [1]. Das Pion aus dem Zerfall des D^* wird auch als langsames Pion (engl. slow) bezeichnet, weil es mit geringem Impuls erzeugt wird. Dies ist durch den geringen Massenunterschied zwischen D^* ($m(D^*) = 2010\,\text{MeV}$) und D^0 ($m(D^0) = 1865\,\text{MeV}$) begründet.

Um die Gluondichte mit Hilfe von Charm-Produktion zu extrahieren, muß eine große Zahl von Teilchen, die ein c-Quark enthalten, nachgewiesen werden. Dazu müssen die Teilchen in geeignete Kanäle zerfallen. Die Gluondichte des Protons wurde vom H1-Experiment mit Hilfe des bereits erwähnten Zerfalls von D^*-Mesonen bestimmt. Abbildung 1.6 zeigt das Ergebnis der Messung für tiefinelastische Streuung mit $Q^2 > 1\,\text{GeV}^2$ (DIS) und für Photoproduktion (γp), bei der $Q^2 \approx 0$ gilt. Bei beiden Messungen sind die Fehler der Messung durch den statistischen Fehler (innerer Fehlerbalken) besonders bei kleinem x dominiert. In der Abbildung sind zu den Meßwerten noch zwei QCD-basierte Vorhersagen eingezeichnet.

Damit zukünftige Messungen mit verbesserter Statistik möglich werden, müssen auch hier erhöhte Anforderungen an die Triggersysteme gestellt werden. Datensätze mit einer großen Zahl von D^*-Kandidaten können zur Analyse bereit gestellt werden, wenn man in der Lage ist,

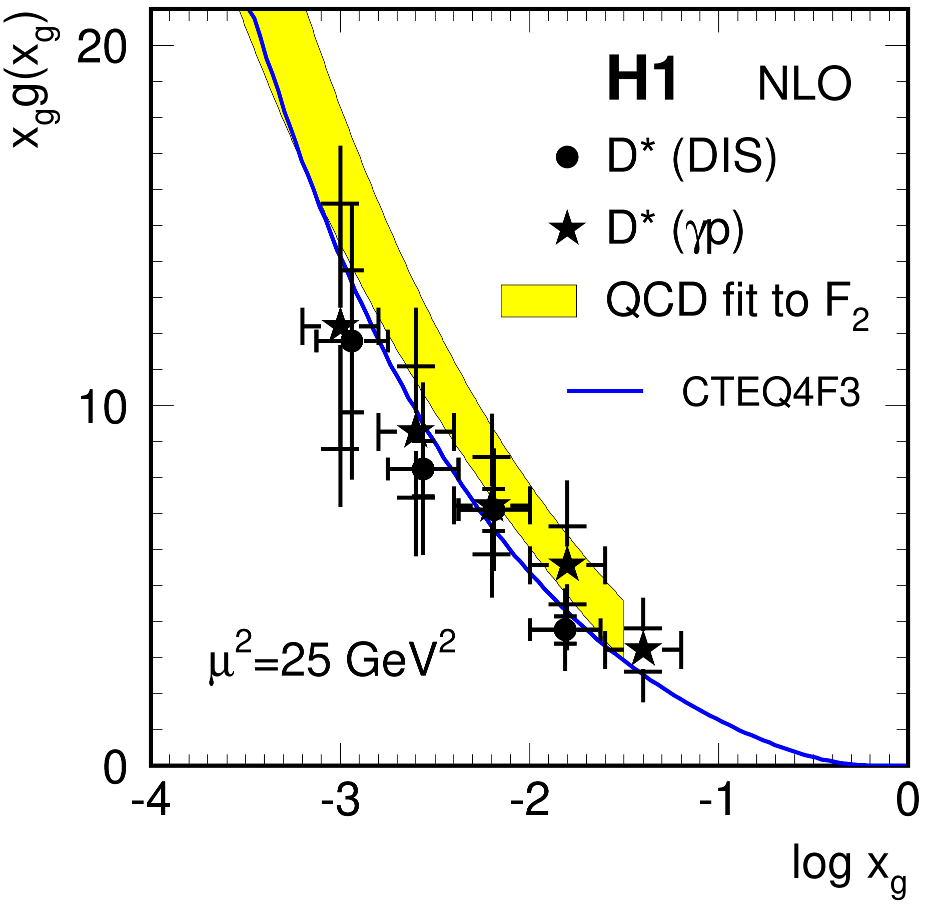


Abbildung 1.6: Gluondichte des Protons extrahiert aus Ereignissen der D^*-Produktion [34]. Zu den Meßdaten sind zwei Vorhersagen eingezeichnet.

solche Ereignisse bereits auf Triggerniveau zu identifizieren. Ein leistungsfähiger Spurtrigger ist hierfür das geeignete System.

Neben der offen Charm-Produktion ist auch die Produktion schwerer Vektormesonen sensitiv auf die Gluondichte im Proton. Das J/Ψ ist ein gebundener $c\bar{c}$-Zustand. Zum Nachweis benutzt man meist den leptonischen Zerfall in ein Elektron-Positron-Paar oder ein Myon-Antimyon-Paar. Beide Endzustände treten jeweils in etwa 6 % aller Zerfälle auf [1]. Mit einem guten Spurtriggersystem, das in der Lage ist, beide Zerfallsleptonen bereits auf Triggerniveau zu rekonstruieren, können mehr Ereigniskandidaten für die Analyse aufgezeichnet werden.

Ein weiteres Gebiet, das in den vergangen Jahren Interesse geweckt hat, ist die Messung des Wirkungsquerschnitts für die Produktion von b-Quarks (*Beauty* oder *Bottom*). Wegen der vergleichsweise hohen Masse des b-Quarks wurde vermutet, daß die theoretische Vorhersage des Produktionswirkungsquerschnitts mit perturbativen Methoden gut gelingen sollte. Abbildung 1.7 zeigt jedoch, daß von den Experimenten ein zu hoher Wirkungsquerschnitt gemessen wird. Lediglich das vorläufige Resultat [38] der ZEUS-Messung bei hohem Q^2 ist mit der theoretischen Vorhersage in Übereinstimmung.

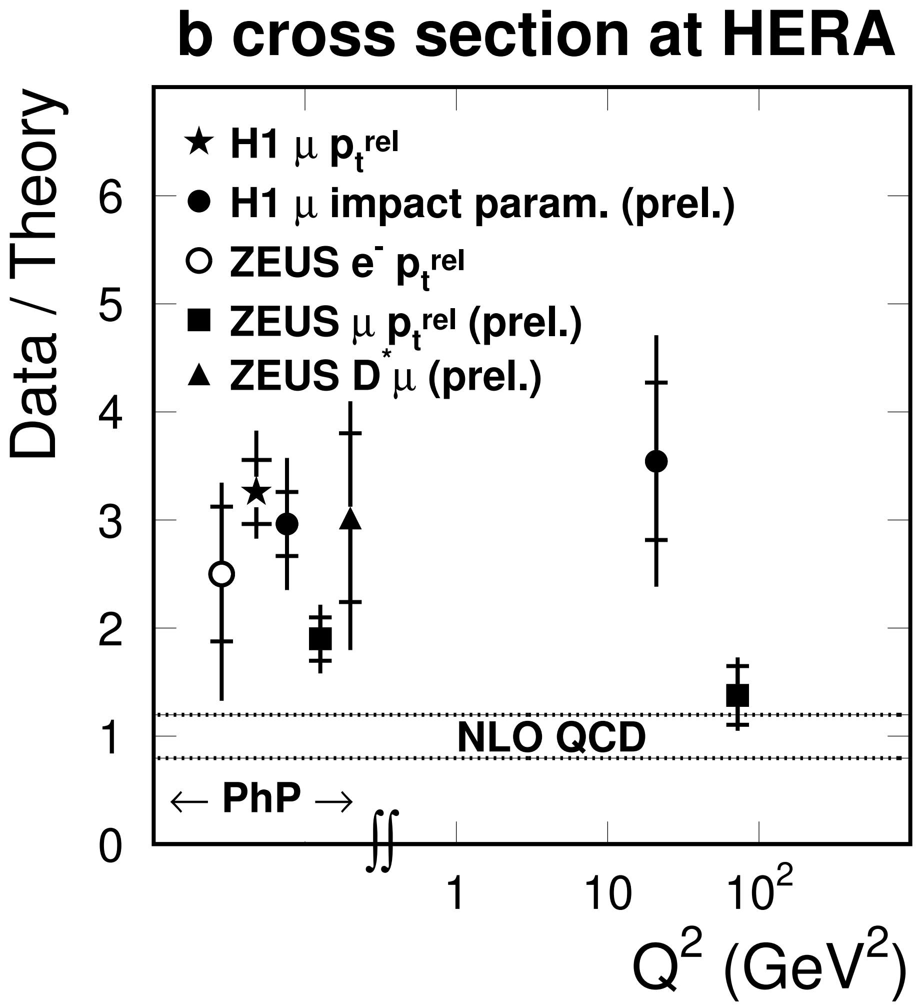


Abbildung 1.7: Vergleich zwischen theoretisch berechnetem Wirkungsquerschnitt für b-Quarkproduktion und Messungen der Experimente H1 und ZEUS [35, 36, 37, 38, 39].

Eine Methode zur Messung von b-Quarkproduktion erfolgt über den Nachweis von c-Quarks, die zumeist über Reaktion 1.9 gesucht werden. Besonders reine b-Quarksample können selektiert werden, indem zum D^*-Meson ein Myon aus dem Zerfall $b \to c + \mu + \nu$ verlangt wird [37]. Bei einer alternativen Methode zum b-Nachweis versucht man, ein geladenes Lepton, das im schwachen Zerfall $b \to c + l + \nu$ entsteht, mit einem Jet des hadronischen Endzustands zu korrelieren. Das Lepton kann entweder ein Elektron (siehe [35]) oder ein Myon (siehe [36, 38]) sein. In [39] wird das Myon aus dem schwachen Zerfall des b-Quarks mit einer Methode nachgewiesen, die sich zu Nutze macht, daß das b-Quark nicht am Primärvertex zerfällt.

Um den Sachverhalt aufzuklären, sind weitere Daten zur Steigerung der Präzision der Analysen nötig. Auch in diesem Fall führt ein selektiver Spurtrigger zu mehr Ereigniskandidaten.

Kapitel 2

Der HERA-Speicherring

2.1 Übersicht

Der HERA-Speicherring ist der einzige Elektron-Proton-Collider, bei dem beide Teilchenarten beschleunigt zur Kollision gebracht werden. Neben dem Betrieb mit Elektronen ist es auch möglich, Positronen zu beschleunigen. HERA wurde in den Jahren 1994 bis 1997 und 1999/2000 mit Positronen betrieben. In den Jahren 1993 und 1998 wurden Elektronen verwendet. Sofern es im folgenden nicht wichtig ist, wird nicht zwischen Elektronen und Positronen unterschieden.

Abbildung 2.1 zeigt den HERA-Ring, der einen Umfang von 6,3 km mißt, sowie die zahlreichen Vorbeschleuniger, die am Deutschen Elektronen Synchroton in Hamburg installiert sind. Nachdem beide Teilchensorten die Vorbeschleuniger durchlaufen haben, werden sie in den HERA-Ring injiziert, wo die Protonen auf ihre Endenergie von 920 GeV[1] und die Elektronen auf 27,5 GeV beschleunigt werden.

Elektronen und Protonen sind im HERA-Ring nicht als kontinuierliche Strahlen gespeichert, sondern in Teilchenpaketen, sogenannten *Bunches*. Es können für jede Teilchensorte bis zu 180 Bunche injiziert werden. An zwei Wechselwirkungszonen läßt man die Teilchenpakete alle 96 ns miteinander kollidieren. Die damit verknüpfte Frequenz von 10,4 MHz wird im folgenden mit *Bunchcrossing*-Frequenz bezeichnet.

An den Wechselwirkungszonen sind zwei Experimente aufgebaut, die die Reaktionen aus der *ep*-Streuung untersuchen. In der Halle Nord befindet sich das H1-Experiment, das in Kapitel 3 noch ausführlicher vorgestellt wird. Das ZEUS-Experiment [40], das im Prinzip sehr ähnlich aufgebaut ist, befindet sich in der Halle Süd.

Zwei weitere Experimente nutzen jeweils nur einen Teilchenstrahl des HERA-Rings. Beim Experiment HERMES [41], das in der Halle Ost aufgebaut ist, wird der Elektronstrahl an polarisierten Gastargets gestreut. Eine Zielsetzung des Experiments ist die Messung der Spinstruktur von Nukleonen. Da als Target Gase verwendet werden können, die Neutronen enthalten (z. B. Deuterium), kann auch die Strukturfunktion des Neutrons vermessen werden. In der Halle

[1] Bis zum Jahr 1998 betrug die maximale Energie der Protonen 820 GeV.

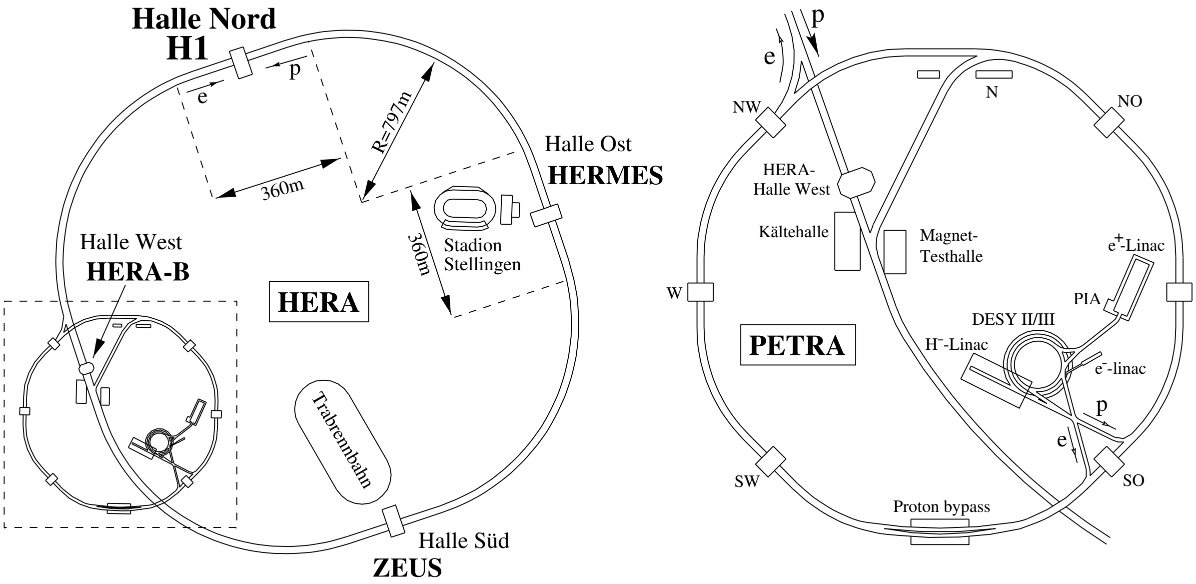


Abbildung 2.1: Der HERA-Speicherring und seine Vorbeschleuniger.

West wird das HERA-B-Experiment [42] betrieben. Dort werden mit Hilfe eine Drahttargets, das an den Protonstrahl gefahren wird, zahlreiche Hadronen erzeugt, welche dann in einem Spektrometer identifiziert und vermessen werden. Hauptziel ist die Untersuchung von Mesonen mit b- und c-Quarks. Schwerpunkte sind Messung des b-Produktionswirkunsquerschnitts und QCD-Analysen.

2.2 Luminositäts-Upgrade

Es gibt einen einfachen Zusammenhang zwischen der Luminosität eines Beschleunigers $\mathcal{L}$ und der Rate n, mit der ein Prozeß mit dem Wirkungsquerschnitt σ beobachtet werden kann:

$$n = \mathcal{L}\sigma. \tag{2.1}$$

Sollen seltene Ereignisse, also solche mit kleinem Wirkungsquerschnitt, beobachtet werden, muß eine hohe Luminosität bereitgestellt werden.

In den Betriebsjahren 1993 bis 2000 hat der HERA-Beschleuniger etwa 110 pb^{-1} integrierte Luminosität geliefert.

Für die instantane Luminosität $\mathscr{L}$ eines ep-Colliders gilt folgende Abhängigkeit:

$$\mathscr{L} \sim \frac{I_e N_p}{\sigma_x \sigma_y}.$$

Dabei sind:

I_e : Strahlstrom des Elektronstrahls
N_p : Zahl der Protonen pro Bunch
σ_x, σ_y : Transversale Ausdehnung der Teilchenpakete im Wechselwirkungspunkt

Um eine möglichst hohe Luminosität zu erreichen, sind oben genannten Parameter zu optimieren. Zur Steigerung der Luminosität gibt es im wesentlichen zwei Optionen:

- **Steigerung der Strahlströme**
  Generell wird angestrebt, Speicherringe mit möglichst großem Strahlstrom zu betreiben. Die Handhabung der Strahlen wird jedoch bei zunehmendem Strom schwieriger. Wenn die Teilchenstrahlen in der Nähe der Kollisionspunkte dicht aneinander geführt werden, erzeugen sie in der der Optik des Rings Störungen, die vom Strahlstrom abhängen und für einen stabilen Betrieb kompensiert werden müssen.
  Die Energieverluste des Elektronstrahls durch Synchrotronstrahlung müssen durch Zufuhr von Hochfrequenzleistung ständig kompensiert werden. Für den Betrieb mit deutlich erhöhtem Strom hätte das Hochfrequenzsystem bei HERA umfangreich ausgebaut werden müssen [30].
  Der maximale Strom im Protonring bei HERA ist durch Raumladungseffekte beim Injektionsprozeß limitiert. Nur durch aufwendige Änderungen in der Struktur der Vorbeschleuniger ließe sich Abhilfe schaffen [30].

- **Transversale Strahlausdehnung**
  Bevor die Strahlen sich im Experiment durchkreuzen, werden sie transversal zu möglichst kompakten Paketen fokussiert. Dieser Vorgang gelingt um so besser je näher die Fokussierungsmagnete am Wechselwirkungspunkt positioniert sind. Vor dem Jahr 2000 befanden sich im zentralen Bereich der Experimente keine Fokussierungsmagnete. Die Magnetstruktur des Speicherrings war mehr als 5 m vom Wechselwirkungspunkt im Zentrum des Detektors entfernt. Um eine erheblich verbesserte Fokussierung zu erreichen, müssen geeignete Magnete so dicht an die Wechselwirkungszone gebracht werden, daß sie in den Experimenten eingebaut sind. Mit dieser Maßnahme kann das transversale Strahlprofil derart verbessert werden, daß die Luminosität um einen Faktor drei bis fünf gesteigert wird.
  Ein derartiger Eingriff erfordert natürlich erhebliche Umbauten an den Experimenten.

Für das Upgradeprogramm bei HERA hat man sich entschlossen, der zweiten Option den Vorzug zugeben. Wichtige Parameter des HERA-I-Beschleunigers sind in Tabelle 2.1 mit den Werten von HERA-II nach dem Upgrade verglichen.

Für den Betrieb von HERA-II sind etwa fünf Jahre geplant. Das Ziel ist das Erreichen einer integrierten Luminosität von 1000 pb^{-1}, wobei etwa zur Hälfte e^--Betrieb vorgesehen ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei HERA-II ist der Betrieb mit longitudinal polarisiertem Elektron- bzw. Positronstrahl. Insbesondere Prozesse der elektroschwachen Theorie sind sensitiv auf longitudinale Polarisation. Bei geeigneter Kombination von Leptonladung und Polarisation kann der geladene Strom des Standardmodells unterdrückt werden. Wenn in dieser

	HERA-I (2000)		**HERA-II**	
	e-Strahl	*p*-Strahl	*e*-Strahl	*p*-Strahl
Strahlenergie	27,5 GeV	920 GeV	27,5 GeV	920 GeV
Bunches gesamt/kollidierend	189/174	180/174	189/174	180/174
Teilchen pro Bunch	$3{,}5 \cdot 10^{10}$	$7{,}3 \cdot 10^{10}$	$4{,}0 \cdot 10^{10}$	$10{,}3 \cdot 10^{10}$
Maximaler Strahlstrom	50 mA	100 mA	58 mA	140 mA
Strahlausdehnung $\sigma_x \times \sigma_y$	$192\,\mu\mathrm{m} \times 50\,\mu\mathrm{m}$	$189\,\mu\mathrm{m} \times 50\,\mu\mathrm{m}$	$112\,\mu\mathrm{m} \times 30\,\mu\mathrm{m}$	$112\,\mu\mathrm{m} \times 30\,\mu\mathrm{m}$
Luminosität	$1{,}69 \cdot 10^{31}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$		$7{,}57 \cdot 10^{31}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$	
Spezifische Luminosität	$0{,}66 \cdot 10^{30}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{mA}^{-2}$		$1{,}82 \cdot 10^{30}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{mA}^{-2}$	
Steigerung HERA-I zu HERA-II	4,5			

Tabelle 2.1: Vergleich der Betriebsparameter von HERA-I mit den Parametern von HERA-II [43].

Konfiguration trotzdem Ereignisse beobachtet werden, liegt ein Hinweis für Prozesse jenseits des Standardmodells vor.

Kapitel 3

Der H1-Detektor

Eine ausführliche Beschreibung des H1-Detektors findet man in [44, 45]. Im folgenden wird der Detektor in der Konfiguration für HERA-II beschrieben.

Zur Beschreibung des Detektors sowie der im Detektor beobachteten Teilchen hat man sich auf ein einheitliches Koordinatensystem geeinigt. Das rechtshändige kartesische Koordinatensystem ist dabei derartig orientiert, daß die x-Achse zum Inneren des HERA-Rings zeigt. Die Flugrichtung der Protonen liegt in Richtung der positiven z-Achse. Den Ursprung des Koordinatensystems wählt man an der Stelle, wo Protonen und Elektronen zur Kollision gebracht werden. Dieser Punkt wird auch als nomineller Wechselwirkungspunkt bezeichnet.

Oft ist es zweckmäßig, statt der kartesischen sphärische Koordinaten zu benutzen. Dazu wird der Azimutalwinkel Φ in der xy-Ebene definiert. $\Phi = 0$ wird in Richtung der x-Achse gewählt. Der Polarwinkel Θ wird bezüglich der Strahlachse definiert. $\Theta = 0$ wird in Protonstrahlrichtung gewählt.

Abbildung 3.1 zeigt eine Seitenansicht des H1-Detektors. In Tabelle 3.1 sind die mit $\boxed{\text{Zahlen}}$ markierten Komponenten aufgelistet. Deutlich zu erkennen sind die neuen Fokussierungsmagnete GO $\boxed{17}$ im Bereich 1,75 m $< z <$ 5,50 m und GG $\boxed{16}$ im Bereich -3,50 m $< z <$ 1,70 m.

3.1 Die zentralen Spurdetektoren

Durch die Installation der neuen Fokussierungsmagnete entsteht im Zentralbereich des Detektors in erheblichem Maße Synchrotronstrahlung, die so intensiv ist, daß sie nicht durch Kollimatoren abgeschirmt werden kann und möglichst ohne Streuung den Detektor verlassen sollte. Dazu wurde in der Nähe des Wechselwirkungspunkts ein Strahlrohr mit elliptischem Profil installiert. Als Konsequenz mußten Komponenten nahe des Strahlrohrs erheblich modifiziert werden. In Abbildung 3.2 ist das zentrale Spurdetektorsystem in einer xy-Ansicht gezeigt.

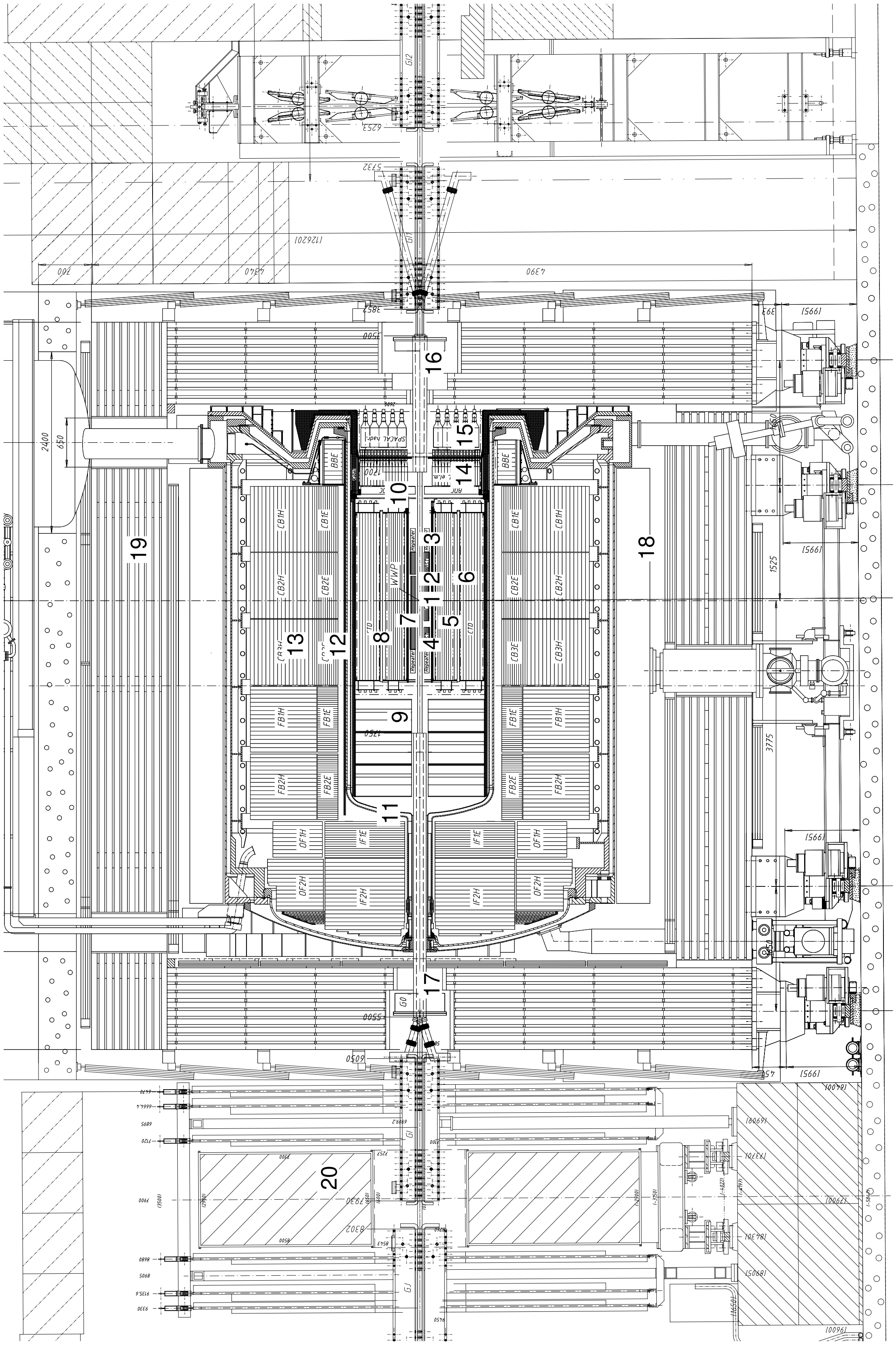


Abbildung 3.1: Seitenansicht des H1-Detektors. Erläuterungen siehe Text.

	Detektorkomponente	Abkürzung	Upgradeaktivität
1	Nomineller Wechselwirkungspunkt	IP	—
	Spurdetektoren		
2	Zentraler Silizium Detektor	CST	modifiziert
3	Rückwärtiger Silizium Detektor	BST	modifiziert
4	Vorwärtiger Silizium Detektor	FST	neu
5	Zentrale Innere Proportionalkammer	CIP2000	neu (ersetzt CIP & CIZ)
6	Zentrale Äußere Proportionalkammer	COP	—
7	Innere Zentrale Jetkammer	CJC1	—
8	Äußere Zentrale Jetkammer	CJC2	—
9	Vorwärts Spurkammersystem	FTD	erneuert & modifiziert
10	Rückwärtige Proportionalkammer	BPC	neu
	Kalorimeter		
11	Flüssig-Argon-Kryostat		—
12	Flüssig-Argon-Kalorimeter (elektromagnetischer Teil)	LAr elm.	—
13	Flüssig-Argon-Kalorimeter (hadronischer Teil)	LAr hadr.	—
14	Spaghetti-Kalorimeter (elektromagnetischer Teil)	SpaCal elm.	modifiziert
15	Spaghetti-Kalorimeter (hadronischer Teil)	SpaCal hadr.	modifiziert
	Magnete		
16	Fokussierungsmagnet GO	GO	neu
17	Fokussierungsmagnet GG	GG	neu
18	Solenoidspule		—
	Myondetektoren		
19	Zentrales Myonsystem	CMD	—
20	Vorwärts Myonsystem mit Toroidmagnet	FMD	—

Tabelle 3.1: Komponenten des H1-Detektors. Die Zahlen beziehen sich auf Abbildung 3.1.

3.1.1 Die Silizumdetektoren

Dem nominellen Wechselwirkungspunkt $\boxed{1}$ am nächsten gelegen ist der zentrale Siliziumdetektor (**C**entral **S**ilicon **T**racker, CST) [46] $\boxed{2}$. Er dient zur genauen Vermessung des Ereignisvertex. Die Positionen der sensitiven Teile des CSTs sind dem elliptischen Profil des Strahlrohrs angepaßt worden. Es werden zwei Lagen aus Silizium benutzt, die parallel zum Strahlrohr montiert sind. Die Polarwinkelakzeptanz des CST ist $30^\circ < \Theta < 150^\circ$. Die intrinsische Ortsauflösungen der vom CST gemessen Hits liegen bei $\sigma_{r\Phi} = 12\,\mu\text{m}$ und $\sigma_z = 22\,\mu\text{m}$ [47].

Sowohl in positiver wie negativer z-Richtung schließt sich an den CST ein weiter Siliziumdetektor an. Im rückwärtigen Bereich befindet sich der rückwärtige Silizium Detektor (**B**ackward **S**ilicon **T**racker, BST) [48, 49] $\boxed{3}$. Er dient zur Messung des Streuwinkels von Elektronen, die in den Rückwärtsbereich nahe des Strahlrohrs gestreut werden. Seine Konfiguration mußte ebenfalls der elliptischen Form des Strahlrohrs angepaßt werden. Der BST hat eine Polarwinkelakzeptanz von $164^\circ < \Theta < 176^\circ$. Ausgewählte Lagen des BST werden benutzt, um Informationen für den zentralen Trigger bereit zu stellen. Im Rahmen des Upgrades wurde ein neuer Siliziumzähler dem System hinzugefügt, der vorwärts Silizium Detektor (**F**orward **S**ilicon **T**racker, FST) [50], $\boxed{4}$. Sein Aufbau ist dem des BST sehr ähnlich. Die Ortsauflösung beider Detektoren ist etwa $\sigma_{r\Phi} = 20\,\mu\text{m}$. Im Gegensatz zum CST sind die Siliziumzähler von BST und FST senkrecht zum Strahlrohr angebracht.

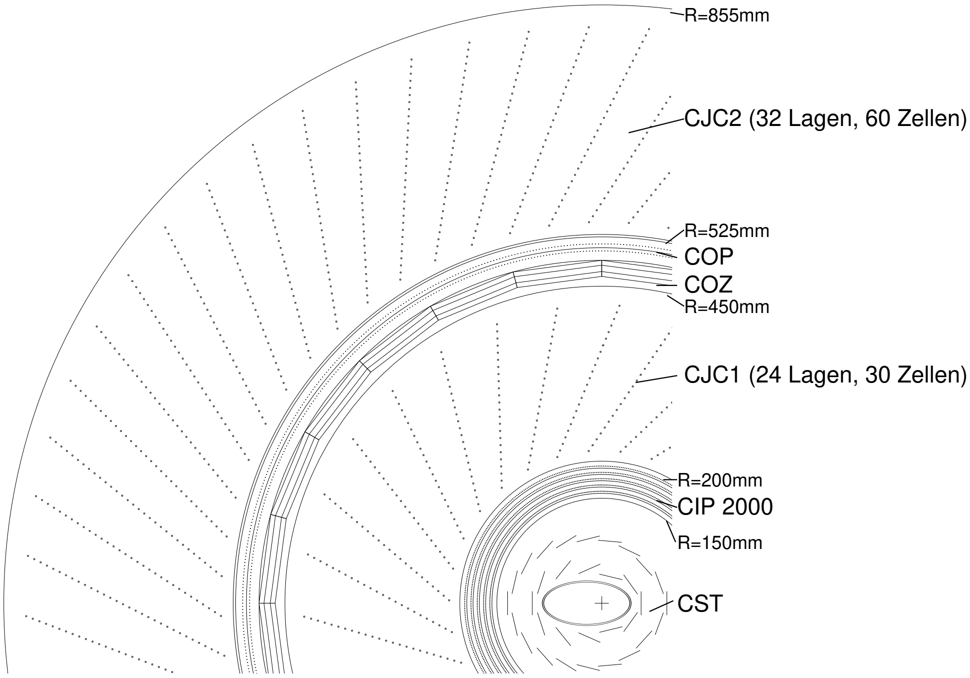


Abbildung 3.2: Frontalansicht der zentralen Spurdetektoren im H1–Experiment.

3.1.2 Die Proportionalkammern CIP und COP

In das zentrale Spurkammersystem sind zwei Proportionalkammern integriert. Die innere Proportionalkammer (**C**entral **I**nner **P**roportional chamber, CIP [51]) wurde für den Betrieb nach dem HERA-Upgrade neu entwickelt. Diese neue CIP2000-Kammer [52] $\boxed{5}$, ersetzt die alte CIP-Kammer sowie die CIZ (**C**entral **I**nner **Z**-chamber), die zentrale innere z-Driftkammer. Der Radius der CIP2000 erstreckt sich über einen Bereich von $r_i = 15\,\text{cm}$ bis $r_o = 20\,\text{cm}$. Die äußere Proportionalkammer (**C**entral **O**uter **P**roportional chamber, COP) $\boxed{6}$ wurde im Upgrade nicht modifiziert. Sie befindet sich zwischen den beiden großen Jetkammern.

Durch kleine Gasvolumina und eine geeignete Kombination von Gaseigenschaften und angelegter Hochspannung kann erreicht werden, daß man ein schnelles Signal[1] nach dem Durchgang eines Teilchens erhält. Daher sind diese Kammern besonders geeignet, Informationen für den Trigger zur Verfügung zu stellen.

Hauptaufgabe des Triggersystems der Proportionalkammern ist die Bestimmung des Ereignisvertex auf der z-Achse. Abbildung 3.3 zeigt das Prinzip des z-Vertextriggers [54]. Mit diesem System soll für jedes Ereignis die z-Position des Vertex bestimmt werden. Liegt der z-Vertex in der Nähe des nominellen Wechselwirkungspunktes, lag wahrscheinlich ein Ereignis aus der ep-Streuung vor.

Die Treffer in den Kammern werden als Stützstellen für eine Spurrekonstruktion benutzt, wobei die Spuren durch Geraden angenähert werden. Die Werte, bei denen diese Spuren die

[1] Typische Zeiten für Proportionalkammern liegen bei etwa 10 ns [53].

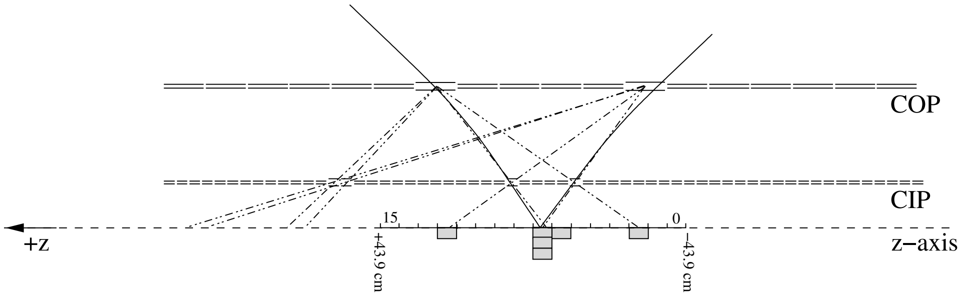


Abbildung 3.3: Das Prinzip des z-Vertextriggers. Zur Rekonstruktion von Spuren, werden alle Trefferkoinzidenzen in den beiden Proportionalkammern paarweise durch Geraden verbunden. Der Vertex befindet sich dort, wo sich die meisten Geraden auf der z-Achse schneiden.

Strahlachse schneiden, werden im z-Vertexhistogramm gespeichert. Man erwartet, daß dieses Histogramm an der Stelle des Ereignisvertex ein Maximum besitzt. Das z-Vertexhistogramm besitzt 16 Bins und erfaßt den z-Bereich von –43,9 cm bis +43,9 cm.

Mit der CIP2000 ist auch ein neuer z-Vertextrigger entwickelt worden [55]. Der neue CIP2000-Trigger erfaßt in z-Richtung ein Intervall von 2,2 m, das in der Grundkonfiguration symmetrisch um den Ursprung gewählt ist. Durch programmierbare Chips kann dieses Intervall jedoch flexibel ein Abständen von etwa 20 cm auf der z-Achse verschoben werden. Damit ist es möglich, die Akzeptanz zu negativen z-Werten zu erhöhen und proton-induzierten Untergrund effizienter zu identifizieren.

Das vom CIP2000-Trigger erzeugte Histogramm hat 15 Bins für einen vergrößerten z-Bereich hat, so daß das z-Intervall eines Bins gröber ist als beim Vorgänger. Damit man im Zentralbereich weiterhin ein z-Vertexhistogramm mit vergleichsweise hoher Auflösung erhält, wird die Elektronik des z-Vertextriggers, wie sie vor dem Upgrade benutzt wurde, mit Ausgangssignalen der neuen CIP2000 und der COP-Kammer auch nach dem Upgrade weiter betrieben.

3.1.3 Die zentralen Driftkammern

Hauptkomponenten des zentralen Spurkammersystems sind zwei große zylindrische Driftkammern. Die wichtigsten geometrischen Daten sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die innere Kammer CJC1 (**C**entral **J**et **C**hamber) $\boxed{7}$ besteht aus 720 parallel zur z-Achse gespannten Signaldrähten, die auf 24 radiale Lagen in 30 azimuthalen Zellen verteilt sind. Die äußere Kammer CJC2 $\boxed{8}$ besitzt 32 Lagen und 60 Zellen. Zusätzlich befinden sich in den Kammern noch Felddrähte, Potentialdrähte sowie Kathodendrähte (siehe Tabelle 3.2).

Die beiden Driftkammern befinden sich in einem homogenen Magnetfeld dessen Feldlinien entlang der z-Richtung verlaufen. Durch die Lorenzkraft werden geladene Teilchen in der xy-Ebene auf eine Kreisbahn gezwungen, aus dessen Radius sich der Transversalimpuls der Teilchen bestimmen läßt. Damit die Kreisbahn präzise bestimmt werden kann, müssen in der xy-Ebene Raumpunkte mit möglichst großer Genauigkeit ermittelt werden. Dazu werden in jedem Ereignis an den Signaldrähten die Driftzeiten gemessen. Aus der geometrischen Position der Drähte, der Driftgeschwindigkeit und der Driftrichtung können die Raumpunkte der Ionisa-

	CJC1	CJC2
Aktive Länge Δz	2200 mm	
Beginn des aktiven Bereichs	$z = -1125$ mm	
Gesamtlänge (einschl. Vorverstärker) Δz	2500 mm	
Gesamte mechanische Länge Δz	2230 mm	
Innerer Radius R_i	203 mm	530 mm
Äußerer Radius R_o	451 mm	844 mm
Polarwinkelakzeptanz	$25° < \Theta < 155°$	
Anzahl der Zellen	30	60
Anzahl der Signaldrähte pro Zelle	24	32
Anzahl der Potentialdrähte pro Zelle	50	66
Anzahl der Felddrähte pro Zelle	10	10
Anzahl der Kathodendrähte pro Zelle	49	65
Maximale Driftstrecke bei R_i	22,9 mm	28,5 mm
Maximale Driftstrecke bei R_o	44,5 mm	43,1 mm
Driftgeschwindigkeit	≈ 50 mm/µs	
Auflösung in $r\Phi$	170 µm	
Auflösung in z	22 mm	

Tabelle 3.2: Parameter der zentralen Driftkammern. Quelle [45].

tionsspur rekonstruiert werden. Im Rahmen dieses Rekonstruktionsprozesses muß die Zweideutigkeit aufgelöst werden, von welcher Seite die Ladungsträger zum Signaldraht gedriftet sind. Treffer, die auf der "falschen" Seite rekonstruiert werden, werden auch als *Spiegelhits* bezeichnet.

Die Ortsauflösung in der $r\Phi$-Ebene beträgt 170 µm. Die Auflösung für die Messung des Transversalimpulses ist $\sigma_{p_t}/p_t^2 = 0{,}01\,\mathrm{GeV}^{-1}$ [45].

Zwischen den Jetkammern CJC1 und CJC2 befindet sich neben der COP eine weitere Driftkammer COZ (**C**entral **O**uter **Z**-chamber), die zur Messung der z-Koordinate dient. Im Gegensatz zu allen anderen zentralen Spurkammern verlaufen bei der COZ die Signaldrähte nicht parallel sondern senkrecht zum Strahlrohr. Die Driftrichtung der Ladungsträger ist in z-Richtung, weshalb dieser Detektor zur Messung der z-Koordinate von Spuren benutzt wird. In z-Richtung wird hier eine Auflösung von $\sigma_z = 350\,\mu\mathrm{m}$ [45] erreicht.

Die zwei Triggersysteme der zentralen Jetkammern sind der DC$R\Phi$-Trigger [56, 57] und der im Aufbau befindliche Fast-Track-Trigger (FTT) [58, 59]. Der DC$R\Phi$-Trigger benutzt 10 Drahtlagen der zentralen Driftkammern, 7 aus aus CJC1 und 3 aus CJC2. Die an diesen Drähten gemessenen Driftzeiten werden Driftzeitspektren verglichen, die von Spuren erzeugt werden, die vom Vertex kommen. Dazu müssen etwa 10 000 Masken analysiert werden. Die untere Impulsschwelle, bei der Spuren getriggert werden, liegt bei $p_t > 400\,\mathrm{MeV}$.

Der FTT soll den DC$R\Phi$-Trigger mittelfristig ersetzen. Das grundlegende Prinzip des FTT ist dem des DC$R\Phi$-Triggers ähnlich. Moderne programmierbare Elektronik hat es ermöglicht, die Granularität deutlich zu steigern, was sich in einer erhöhten Zahl von Masken niederschlägt. Neben einer verbesserten Auflösung kann der FTT Spuren in drei Dimensionen rekonstruieren, während der DC$R\Phi$-Trigger auf die Transversalebene beschränkt ist.

3.2 Das Vorwärts-Spurkammersystem

Teilchen, die aus dem Wechselwirkungspunkt in den Winkelbereich zwischen 7° und 25° gestreut werden, werden vom Vorwärts-Spurkammersystem $\boxed{9}$ vermessen. Dieses System besteht aus drei Supermodulen, die aus verschiedenen Kammertypen zusammengesetzt sind. Große Teile dieses Detektorsystems sind im Rahmen des Upgrades erneuert worden [60]. Vom neuen System verspricht man sich eine verbesserte Auflösung von Mehrdeutigkeiten in Ereignissen mit hoher Spurmultiplizität.

3.3 Die Kalorimeter

3.3.1 Das SpaCal-Kalorimeter und die BPC

Im rückwärtigen Bereich befindet sich ein Spaghetti-Kalorimeter (SpaCal) [61, 62]. Der Akzeptanzbereich in Θ beträgt 155° bis 177°. Das SpaCal ist ein Kalorimeter, in dem dünne szintillierende Fasern in Blei eingelassen sind. Teilchen deponieren ihre Energie in Form eines Schauers, der in den Fasern Lichtblitze erzeugt. Die Fasern sind an Sekundärelektronenvervielfacher angeschlossen, die die Lichtblitze in ein elektrisches Signal konvertieren. Das SpaCal hat eine elektromagnetische Sektion $\boxed{14}$, sowie eine hadronische Sektion $\boxed{15}$. Beide Bereiche sind aus Zellen mit quadratischem Profil aufgebaut. Die Granularität der Zellen im elektromagnetischen Teil ist viermal feiner als die der hadronischen.

Die Energieauflösung des elektromagnetischen Teils ist $7\%/\sqrt{E/\mathrm{GeV}} \oplus 1\%$ [62]. Durch die sehr feine Granularität wird eine gute Ortsauflösung von etwa 3 mm erreicht. Darüberhinaus besitzt das SpaCal eine gute Zeitauflösung von etwa einer Nanosekunde [63].

Sowohl Orts- als auch Zeitinformationen werden genutzt, um den zentralen Trigger mit Informationen zu versorgen. Besonders wichtig ist hier der Inklusive-Elektron-Trigger (IET), der bereits auf Triggerniveau Elektronkanditaten selektiert.

Durch den Einbau des neuen Fokussierungsmagenten GG mußte der innere Bereich des SpaCals angepaßt werden [64]. In der hadronischen Sektion wurden einige Module entfernt. Für den elektromagnetischen Teil ist ein neues *Insert* [65] gebaut worden.

Damit der Auftreffpunkt eines Teilchens auf die SpaCal-Oberfläche möglichst genau vermessen werden kann, befindet sich zwischen zentralem Spurkammersystem und SpaCal eine weitere Spurkammer. Die BPC (**B**ackward **P**roportional **C**hamber) wurde für den Betrieb bei HERA-II komplett neu konstruiert.

3.3.2 Das Flüssig-Argon-Kalorimeter

Im Winkelbereich von 5° bis 156° wird das Spurkammersystem von einem Flüssig-Argon-Kalorimeter [66] umgeben. Hierbei handelt es sich um ein Samplingkalorimeter, bei dem sich aktive Schichten aus Argon mit Schichten aus Absorbermaterial abwechseln. Damit das Argon flüssig gehalten werden kann, ist das gesamte Kalorimeter in einem Kryostaten $\boxed{11}$ plaziert. Im elektromagnetischen Teil $\boxed{12}$ kommt als Absorber Blei zum Einsatz. Für den hadronischen Teil $\boxed{13}$ wird eine Stahllegierung benutzt. Die Energieauflösung der elektromagnetischen Sektion wurde in Teststrahlmessungen bestimmt und beträgt $\sigma_E/E \approx 11\,\%/\sqrt{E/\mathrm{GeV}} \oplus 1\,\%$. Für den hadronischen Teil wurde ein für die Energieauflösung ein Wert von $\sigma_E/E \approx 50\,\%/\sqrt{E/\mathrm{GeV}} \oplus 2\,\%$ gemessen [66].

Das gesamte Flüssig-Argon-Kalorimeter besitzt etwa 45 000 Kanäle. Für das Triggersystems dieses Kalorimeters werden die Signale einzelner Kanäle zu Triggerzellen analog aufsummiert, wobei der elektromagnetische und der hadronische Teil getrennt behandelt werden. Mehrere solcher Triggerzellen bilden einen sogenannten Trigger-Tower (TT). Dabei sind die Trigger-Tower auf den Wechselwirkungspunkt ausgerichtet. Bis zu vier TT bilden einen Big-Tower (BT), siehe Abbildung 3.4. Im Polarwinkel Θ gibt es 14 Bereiche, wobei die Segmentierung in Vorwärtsrichtung feiner ist. Abhängig von der Position in Θ beträgt die Segmentierung in Φ bis zu 32.

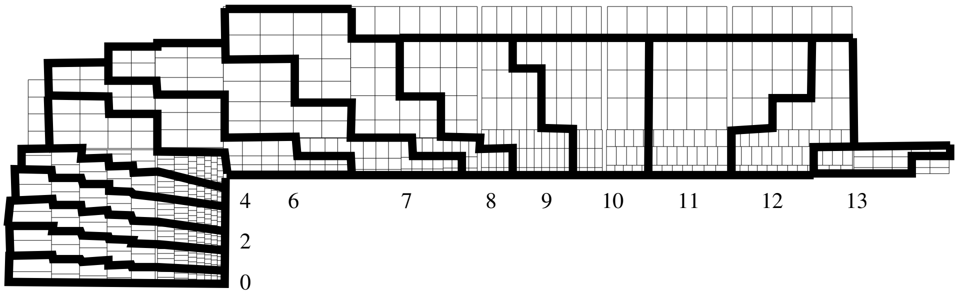


Abbildung 3.4: Big-Tower des Flüssig-Argon-Kalorimeters.

Die analogen Signale werden getrennt nach elektromagnetischer und hadronischer Energiedeposition digitalisiert. Wird lokal im elektromagnetischen Bereich eine hohe Energie und im hadronischen Teil wenig Energie gemessen, wird ein Triggersignal für einen Elektronkandidaten generiert. Darüberhinaus werden mehrere verschiedene Energiesummationen über das gesamte Flüssig-Argon-Kalorimeter gebildet, wodurch bestimmte Ereigniskonfigurationen unterschieden werden können. So kann zum Beispiel schon vom Trigger entschieden werden, ob in einem Ereignis Transversalimpuls "fehlt". Solch eine Topologie deutet auf die Produktion eines Neutrinos hin.

In Zukunft soll der existierende Trigger durch ein System mit erhöhter Granularität ergänzt werden. Durch den Einsatz moderner Elektronikkomponenten können im Kalorimeter bereits vom Trigger Jet-Signaturen[2] erkannt werden. Dieser neue Jettrigger [67] befindet sich zur Zeit in der Aufbauphase.

[2]Ein Jet ist eine eng kollimierte Energiedeposition.

3.4 Das Myonsystem

Die Kalorimeter und das Spurkammersystem werden von supraleitenden Magnetspule $\boxed{18}$ umschlossen, die in z-Richtung ein Feld der Stärke 1,15 Tesla erzeugt. Außerhalb dieser Spule befindet sich das instrumentierte Eisenjoch $\boxed{19}$ des zentralen Myonsystems. Die in den ep-Reaktionen entstehenden Myonen werden meist nicht im Kalorimeter absorbiert. Sie erzeugen dann eine Spur in den Myonkammern. Für den Trigger des zentralen Myonsystems werden die Kammern in 64 Gruppen zusammengefaßt, die in Abbildung 3.5 gezeigt sind.

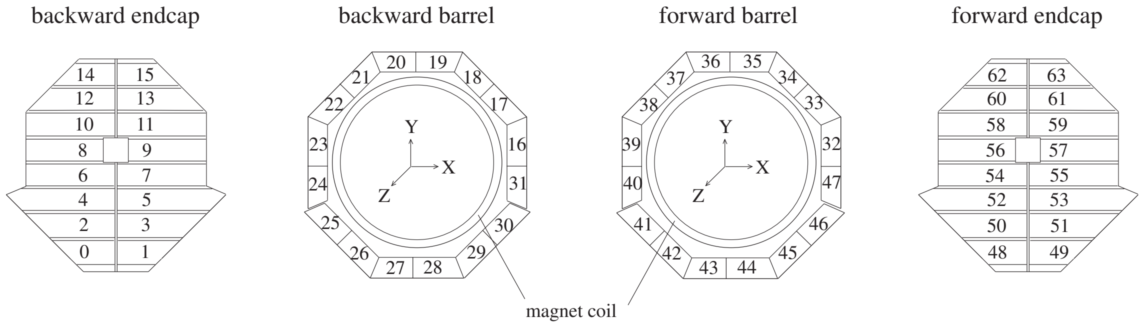


Abbildung 3.5: Verteilung der 64 Triggermodule auf das zentrale Myonsystem.

In Vorwärtsrichtung ist das Vorwärts-Myonspektrometer [68] $\boxed{20}$ installiert. Es dienst zur Messung von Impulsen von Myonen, die in einem Winkelbereich zwischen 3° und 17° gestreut werden. Dazu werden Teilchenspuren durch jeweils drei Driftkammerlagen vor und hinter einem Toroidmagneten vermessen. Aus der Krümmung der Teilchenbahn kann der Impuls berechnet werden.

Im Triggersystem des Vorwärts-Myonsystems [69] wird unterschieden zwischen Spurstücken, die in den Driftkammern vor dem Toroidmagneten nachgewiesen werden, und Spurstücken, die in beiden Driftkammersystemen registriert wurden. Beide Arten von Spurstücken können in 8 Φ-Sektionen, die nochmals in 8 r-Abschnitte unterteilt sind, auftreten.

3.5 Das Flugzeit- & Vetosystem

An mehreren Stellen sind im H1-Experiment nahe des Strahlrohres Szintillationszähler montiert, die mit Hilfe von Photomultiplieren ausgelesen werden. Diese Detektoren besitzen ein Zeitauflösungsvermögen von etwa einer Nanosekunde. Damit ist es möglich, Ereignisse anhand ihrer Zeitstruktur als Untergrund oder als ep-Reaktionskandidaten zu klassifizieren. Da das Signal schnell zur Verfügung steht, eignet sich das ToF-System[3] besonders für den Einsatz im Triggersystem.

Das Flugzeitsystem umfaßt mehrere Zähler. Abbildung 3.6 zeigt schematisch das H1-

[3] Im folgenden wird statt Flugzeitsystem auch der englische Begriff ToF (Time-of-Flight) verwendet.

Experiment und die installierten Flugzeitzähler. Im Rahmen des Upgrade-Programms sind einige ToF-Komponenten neu installiert, andere wegen der Veränderungen am Strahlrohr zum Teil erheblich modifiziert worden. Komplett neu ist das FTi-System. Es besteht aus zwei Szintillatorscheiben, von denen eine (FTi2) bei $z = 2{,}65$ m vor dem Vorwärts-Spurkammersystem und die andere (FTi1) bei $z = 1{,}4$ m zwischen zentralem und Vorwärts-Spurkammersystem installiert ist. Das FTi1 wird mit Photodioden ausgelesen, das FTi2 wird mit Photomultiplieren betrieben. Das FIT befindet sich vor dem FTi2 und ist als Testinstallation bereits 1998 eingebaut worden [70].

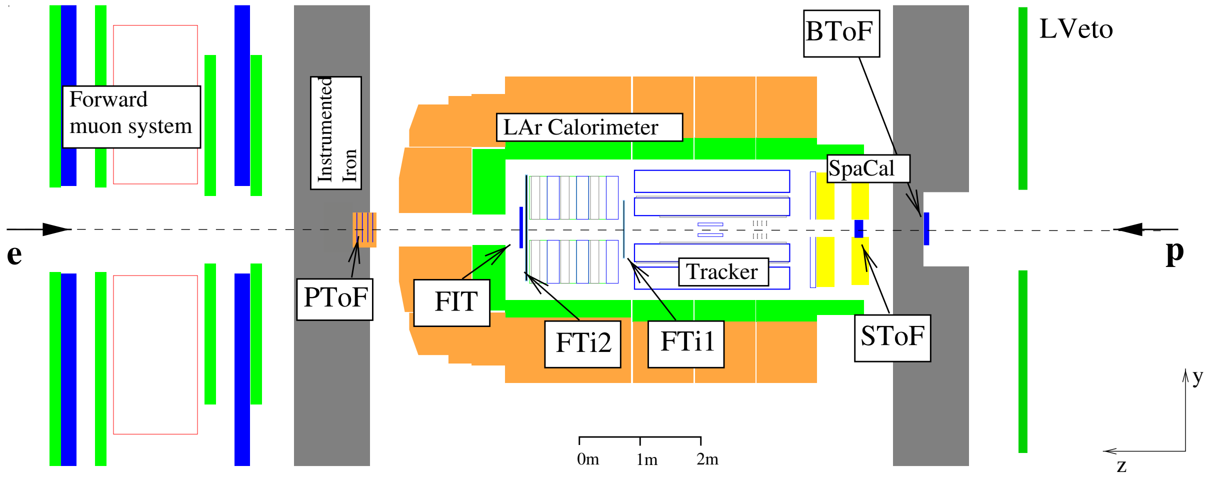


Abbildung 3.6: Anordnung der Szintillatoren des Flugzeitsystems.

Im rückwärtigen Bereich wurden komplett neue Flugzeitzähler installiert, da durch den Einbau des GG-Magneten umfangreiche Veränderungen in diesem Bereich des Detektors nötig waren. Bei $z \approx -3,20$ m wurde von 1998 bis 2000 ein spezielles Rückwärtskalorimeter, das VLQ [71], betrieben. Dieses Kalorimeter war mit einem eigenen ToF-System (VLQ-ToF [72]) ausgestattet. Nach dem Upgrade ist an dieser Stelle ein BToF (Backward ToF) im Einsatz. Sein Aufbau ist sehr ähnlich zum BToF, welches in den Jahren 1996 bis 1997 Verwendung fand [73, 74].

Beim Umbau der hadronischen Sektion des SpaCals mußten einige Kalorimetermodule entfernt werden [64], so daß zwischen dem Strahlrohr und den verbliebenen Modulen ein speziell angepaßtes Szintiallatorsystem, genannt SToF (SpaCal-ToF), eingepaßt werden konnte.

Im Bereich des Plug-Kalorimeters ist bei $z \approx 5{,}3$ m ein weiterer Szintillationszähler eingebaut. Das PToF (Plug-ToF) ist ebenfalls im Rahmen des Upgrade-Programms modifiziert worden.

Bei $z = -6,50$ m befindet sich die große Vetowand (LVeto). Mit $5\,\text{m} \times 4\,\text{m}$ überdeckt sie fast die gesamte Querfläche des Flüssig-Argon-Kalorimeters. Die kleine Vetowand war in der HERA-I-Phase bei $z =$ –8,1 m installiert. Wegen Umbauten an der Magnetstruktur des Speicherrings konnte diese Komponente nicht wieder eingebaut werden. Weitere Details über das Vetosystem findet man in [75].

3.6 Das Luminositätssystem

Zur Bestimmung der Luminosität im H1-Experiment [76] wird die Rate eines Referenzprozesses mit genau bekanntem Wirkungsquerschnitt gemessen. In der *ep*-Streuung wird als Referenzprozeß der Bethe-Heitler-Prozeß verwendet, bei dem das einlaufende Lepton elastisch am Proton streut und zusätzlich ein Photon abstrahlt: $e + p \rightarrow e + p + \gamma$ [77].

Das erzeugte Photon wird in einem Kalorimeter bei $z = -105\,\mathrm{m}$ nachgewiesen. Die geladenen Teilchen treffen nicht in dieses Kalorimeter, da sie durch Magnetstruktur des Speicherrings einer anderen Bahn folgen. Zusätzlich kann auch das gestreute Lepton nachgewiesen werden. Wegen des Impulsverlusts beim Streuprozeß folgt dieses Lepton nicht exakt der Sollbahn der Teilchen im Speicherring. Stattdessen kann es von sogenannten Elektrontaggern, die bei $z = -6\,\mathrm{m}$ und $z = -40\,\mathrm{m}$ dicht am Strahlrohr montiert sind, nachgewiesen werden. Neben dem Nachweis von Elektronen aus der Bethe-Heitler-Streuung werden die Elektrontagger auch zum Nachweis von Ereignissen der Photoproduktion benutzt. Je nach Ereigniskinematik kann das Elektron in einen der Tagger nachgewiesen werden. Abbildung 3.7 zeigt das Luminositätssystem und seine Installation in der Magnetstruktur des HERA-Rings.

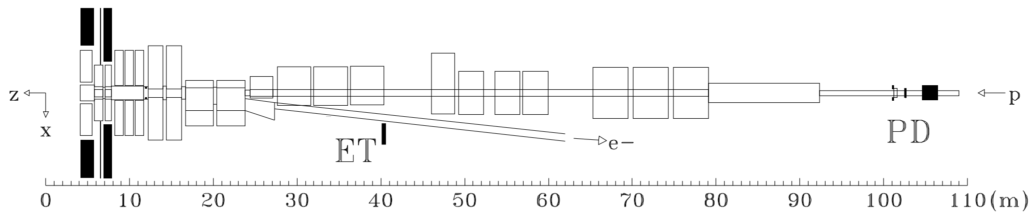


Abbildung 3.7: Konfiguration des Luminositätssystems. ET bezeichnet den Elektrontagger bei -40 m und PD den Photondetektor bei -105 m.

3.7 Das Triggersystem

Die Rate, mit der Untergrundereignisse im H1-Detektor ein Signal erzeugen, kann abhängig von der Strahlqualität mehr als 1000-mal größer sein als die Rate, die auf *ep*-Streuung im Wechselwirkungspunkt zurückzuführen ist. Die komplette Auslese von den etwa 200 000 Kanälen des Detektors dauert ungefähr eine Millisekunde. In dieser Zeit können keine weiteren Ereignisse registriert werden.

Im H1-Experiment kommt ein komplexes mehrstufiges Triggersystem zum Einsatz, um sicherzustellen, daß der Detektor nur für solche Ereignisse ausgelesen wird, in denen mit großer Wahrscheinlichkeit ein Ereignis aus der *ep*-Streuung vorgelegen hat. Dabei wird die Eingangsrate in die nächsthöhere Triggerstufe fortlaufend verringert. Dies erlaubt eine "Analyse" des Ereignisses auf Basis immer komplexerer Detektorinformationen, weil die Zeit, die zur Entscheidungsfindung zur Verfügung steht, von Triggerstufe zu Triggerstufe erhöht wird. Im H1-System kann beim Auslesevorgang eine Totzeit nicht vermieden werden. Daher ist man bestrebt den Auslesevorgang möglichst schnell abzubrechen, falls auf einer Triggerstufe eine negative Entscheidung getroffen wird.

Abbildung 3.8 zeigt schematisch den Aufbau des H1-Triggersystems. Wichtige Eckdaten des H1-Triggersystems sind die Eingangsrate von etwa 50 Hz in die L4-Filterfarm sowie die Rate von etwa 10 Hz, mit der Daten dauerhaft gespeichert werden können. Weitere Informationen findet man in [78].

3.7.1 Die erste Triggerstufe L1

Im Wechselwirkungspunkt des H1-Detektors kommt es alle 96 ns zu einem Bunchcrossing. Da es schon wegen der Signallaufzeiten unmöglich ist, bereits bis zum Auftreten des nächsten Bunchcrossings zu einer Triggerentscheidung zu gelangen, speichern alle Subdetektoren ihre Daten in Ringspeichern. Die Größe der Ringspeicher ist so bemessen, daß nach einer Zeit von 2,3 µs entschieden werden muß, ob ein Ereignis aus dem Ringspeicher ausgelesen werden soll oder nicht. Parallel generieren einzelne Subdetektoren Informationen für die zentrale Triggerlogik. Da diese Information alle 96 ns und spätestens nach 2,3 µs zur Verfügung stehen muß, ist die Präzision zwangsläufig limitiert.

Der zentrale Trigger kann 256 *Triggerelemente* empfangen, die von einzelnen Subsystemen erzeugt werden. Diese 256 Elemente können in der Triggerelektronik durch logische Verschaltung zu 128 sogenannten *Subtriggern* kombiniert werden. Die Konfiguration der Subtrigger wird über eine RAM-Lookup-Tabelle in den zentralen Trigger geladen. Für jedes Bunchcrossing prüft der zentrale Trigger, ob eine der 128 Subtrigger-Bedingungen erfüllt ist. Falls ja, wird ein `L1keep`-Signal generiert, was zum sofortigen Anhalten der Ringspeicher führt. Von diesem Moment an beginnt die primäre Totzeit des Detektors, da keine weiteren Informationen mehr in die Ringspeicher geschrieben werden. Eine allgemeine Darstellung über den Einfluß der Totzeit auf die Datennahmeeffizienz findet man in [79].

Auf den folgenden Triggerstufen wird nun mit verfeinerten Methoden versucht, interessante Ereignisse noch besser vom Untergrund zu trennen, um schließlich die Detektordaten komplett auszulesen und zu speichern. Anschließend werden die Ringspeicher wieder aktiviert, so daß der Detektor weitere Daten aufzeichnen kann [80].

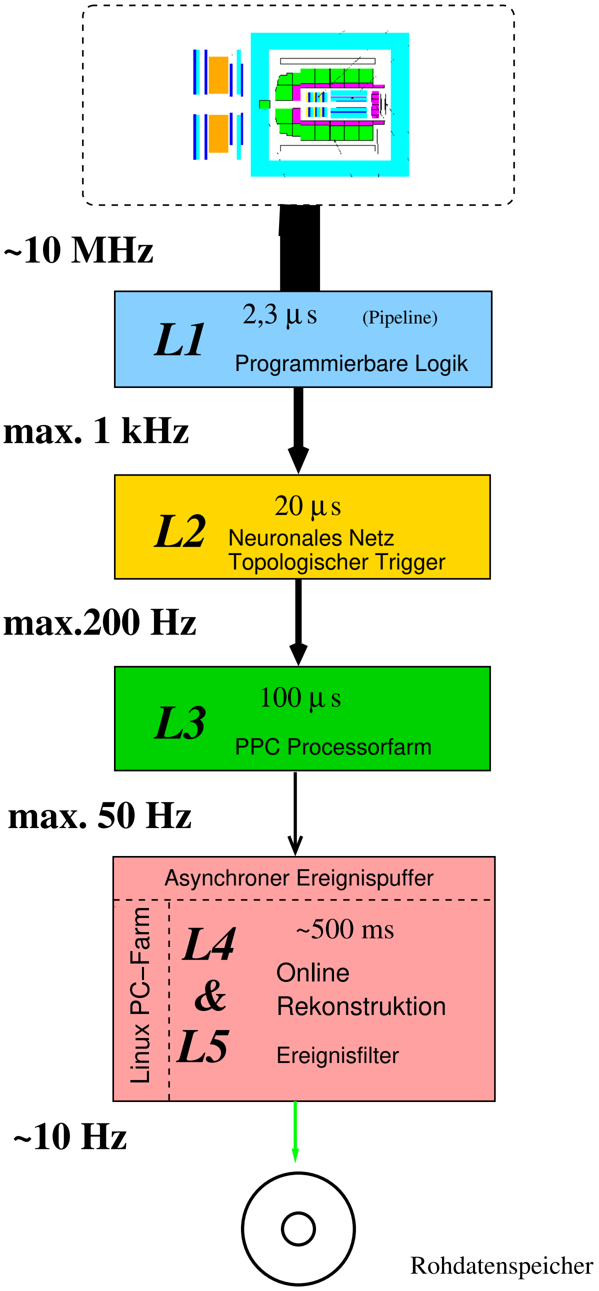


Abbildung 3.8: Das mehrstufige Triggersystem des H1-Detektors.

3.7.2 Die zweite Triggerstufe L2

Wird ein Ereignis von der ersten Triggerstufe akzeptiert, werden die Ringspeicher angehalten, und die Triggerinformationen der einzelner Subsysteme werden den L2-Triggersystemen zur Verfügung gestellt. Die L2-Systeme, bestehend aus einem Neuronalen-Netz-Trigger (L2NN) und einem Topologischen Trigger (L2TT), müssen innerhalb von 20 µs entscheiden, ob das Ereignis weiter als Physikkandidat von den weiteren Triggerleveln analysiert werden soll, oder ob die Datennahme durch Senden eines `L2-Reject`-Signals wieder gestartet wird.

Die L2-Triggersysteme werden von den Triggersystemen einzelner Subdetektoren über das PQZP-System [81] mit Informationen versorgt. Das Ergebnis der L2-Triggersysteme wird dem zentralen Trigger in Form von 88 L2-Triggerelementen mitgeteilt. In der Praxis werden hiermit ausgesuchte L1-Subtrigger validiert.

Der topologische Trigger

Die Informationen der einzelnen Subsysteme werden im toplogischen Trigger [82] zunächst in zweidimensionalen Histogrammen gespeichert, wobei die Achsen der Polarwinkel (Θ) und der Azimutalwinkel (Φ) sind. Anschließend werden die Histogramme, die die Einträge verschiedener Systeme enthalten, unter mehreren Aspekten analysiert. Dabei wird versucht, die Information verschiedener Subsysteme zu korrelieren und nach bestimmten Ereignistopologien zu suchen. Im Zuge des Upgrade-Programms wird auch der toplogische Trigger modernisiert. Durch den Einsatz eines moderneren Prozessors können komplexere Analysen der Θ-Φ-Diagramme durchgeführt werden.

Der Neuronale-Netzwerk-Trigger

Spezielle Prozessoren erlauben eine parallele Implementierung von neuronalen Netzen. Da für Triggerzwecke die Eingangsdaten schnell ausgewertet werden müssen, bietet sich der Einsatz solcher Prozessoren an.

Die neuronalen Netze werden durch ausgesuchte Datensätze trainiert. Dazu gibt man einen Satz von Signalereignissen in das Netz, sowie einen Satz, der aus Untergrund besteht. Konfrontiert man das Netz anschließend mit einem neuen Ereignis, so berechnet das Netz einen Wert zwischen 0 und 1, wobei Werte nahe 1 Signalkandidaten sind und Werte nahe 0 Untergrund bedeuten. Ein geeigneter Schnittwert, der zu einer positiver Triggerentscheidung führt, muß vorher bestimmt werden [83, 84]. Auch der Neuronale-Netzwerk-Trigger soll im Upgrade-Programm modernisiert werden.

3.7.3 Die dritte Triggerstufe L3

Die dritte Stufe des H1-Triggersystems [85] ist Bestandteil des Fast-Track-Triggers. Sie besteht aus einer Farm von PowerPC-Prozessoren, die Spuren guter Qualität vom FTT selbst und alle Informationen, die den L2-Systemen über das PQZP-System zur Verfügung stehen, zur Triggerentscheidung nutzen können. Mit diesen Daten kann gezielt nach bestimmten Teilchenzerfällen oder Topologien gesucht werden.

Jeder Prozessor führt im wesentlichen eine Analyse durch und teilt das Ergebnis dem zentralen Trigger, der bis zu 32 Eingangssignale von der dritten Stufe verarbeiten kann, mit. Diese 32 Signale können benutzt werden, um L1-Subtrigger zu validieren. Wird für alle zu validierenden Subtrigger eine negative L3-Entscheidung berechnet, wird vom zentralen Trigger ein `L3-Reject`-Signal generiert, das zum sofortigen Abbruch aller Auslesevorgänge führt und die Ringspeicher für die weitere Datennahme vorbereitet. Ziel ist es, mit dem L3-System nach spätestens 100 µs zu einer Entscheidung zu gelangen.

3.7.4 Ereignisfilter und Online-Rekonstruktion

Nach einem `L2-Keep`-Signal startet der Auslesevorgang der Ringspeicher für das getriggerte Ereignis. Falls kein `L3-Reject`-Signal zum Abbruch führt, werden alle Daten der Subdetektoren im *Eventbuilder* zu einem kompletten Ereignis zusammengeführt. Anschließend werden die Ereignisse auf eine Farm von Prozessoren verteilt.

Diese Prozessorfarm ist aus konventionellen PCs aufgebaut, die mit dem Betriebssystem Linux laufen. Die Rekonstruktion eines Ereignisses dauert etwa 500 ms. Auf Basis dieser rekonstruierten Daten werden die Ereignisse in bestimmte Klassen eingeordnet. Ereignisse, die keiner Klasse zugeordnet werden können, werden, abgesehen von einem kleinem Bruchteil, der zu Kontrollzwecken gespeichert wird, verworfen.

Die Trennung zwischen L4 und L5 ist historisch. In der HERA-I-Datennahmeperiode wurden die Ereignisse für die Klassifizierung (L4) mit einem modifizierten Programm rekonstruiert und erst später der vollständigen Rekonstruktion (L5) zugeführt. Beide Systeme wurden im Zuge des Upgrades kombiniert [86].

3.7.5 Triggergewichte und Prescale-Faktoren

Die Eingangskapazität der L4-Filterfarm muß auf die 128 L1-Subtrigger verteilt werden. L1-Subtigger, die von einem L2-System oder von L3 validiert werden, tragen erst nach ihrer Validierung zur L4-Eingangsrate bei.

Die Bandbreite ist dabei nicht gleichmäßig auf die Subtrigger verteilt. Neben der eigentlichen Triggerbedingung hat die Strahlqualität einen Einfluß auf die Rate, die ein Subtrigger verursacht. Es kann passieren, daß einzelne Subtrigger derart oft Ereignisse akzeptieren, daß die Eingangsrate für die Filterfarm zu groß wird oder andere Subtrigger benachteiligt werden. Daher hat man das Konzept der *Prescale*-Faktoren eingeführt [87]. Versieht man einen Subtrigger mit dem Prescale-Faktor d, dann wird nur jedes d-te Ereignis akzeptiert. In einer anschließenden Analyse wird ein Ereignis dann mit dem Faktor d gewichtet.

Seit einigen Jahren hat sich in der Datennahme ein Autoprescale-Programm [88] bewährt. Dieses Werkzeug erlaubt es, die Prescale-Faktoren flexibel an die sich ändernden Bedingungen anzupassen. Dazu werden die Raten der einzelnen Subtrigger im laufenden Betrieb analysiert und eine Vorhersage über den zukünftigen Verlauf der Raten gemacht. Über eine komplexe Strategiedatei kann die Aufteilung der Bandbreite detailiert gesteuert werden.

3.7.6 Ereignis- und Triggerraten

Die Raten, mit denen bestimmte Typen von Ereignissen im H1-Experiment auftreten, variieren zum Teil erheblich. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über einige beispielhaft ausgewählte Reaktionen. Für die Luminosität wurde eine Wert von 70 $\mu b^{-1}s^{-1}$ angenommen [58]. Die Angaben sind als grober Anhaltspunkt zu verstehen. Die genauen Zahlen hängen von der Definition des sichtbaren Wirkungsquerschnitts ab [59]. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß Untergrundereignisse 10 bis 100-mal häufiger ein Signal im Detektor erzeugen als Ereignisse der *ep*-Streuung.

Prozeß	Rate
Bunchcrossing	10,4 MHz
Strahlinduzierter Untergrund	$\approx$ 1–50 kHz
Photoproduktion ($Q^2 < 1\,\mathrm{GeV}^2$)	$\approx$ 1000 Hz
DIS ($1\,\mathrm{GeV}^2 < Q^2 < 10\,\mathrm{GeV}^2$)	$\approx$ 40 Hz
DIS ($Q^2 > 10\,\mathrm{GeV}^2$)	$\approx$ 4 Hz
Produktion schwerer Quarks	$\approx$ 0,05 Hz
Geladener Strom	$\approx$ 0,01 Hz
$D^* \rightarrow K\pi\pi$	mehrere 1000 pro Jahr
DIS bei höchsten Q^2	einige pro Jahr

Tabelle 3.3: Raten für einige Beispielprozesse wie man sie bei HERA-II erwartet. Die genauen Raten hängen stark von den Annahmen über den sichtbaren Wirkungsquerschnitt ab [58, 59].

Wie nach Gleichung 1.2 erwartet, sind Ereignisse mit hohen Impulsüberträgen Q^2 seltener als solche mit niedrigem. Sollen spezielle Endzustände betrachtet werden, verringern sich die Raten nochmals. Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von J/Ψ-Mesonen in Photoproduktion zum Beispiel ist fast 1000-mal kleiner als der totale Photoproduktionsquerschnitt. Um Ereignisse mit besonders kleinem Wirkungsquerschnitt registrieren zu können, müssen im wesentlichen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Der Beschleuniger muß eine ausreichend hohe Luminosität liefern, damit überhaupt eine Chance besteht, den gewünschten Prozeß zu beobachten
- Das Experiment muß in der Lage sein, das Ereignis zu triggern, wobei eine mögliche Begrenzung der Bandbreite berücksichtigt werden muß.

Auf Ereignisse mit kleinem Wirkungsquerschnitt will man bei HERA-II besonderen Wert legen. Im nächsten Abschnitt soll die Triggerstrategie genauer diskutiert werden.

3.7.7 Triggerstrategie nach dem HERA-Upgrade

Nach dem Upgrade des HERA Speicherrings erwartet man eine Steigerung der Luminosität um etwa einen Faktor fünf. Die Experimente werden sich hauptsächlich auf die Analyse von Ereignissen konzentrieren, die bisher mit nur geringer Statistik aufgezeichnet werden konnten. Dazu zählen die bereits in Kapitel 1.2 erwähnten Prozesse, wie etwa die *ep*-Streuung bei höchsten Impulsüberträgen, die Selektion besonderer exklusiver Endzustände (z. B. elastische J/Ψ-Produktion) oder semi-inklusiver Endzustände (z. B. D^*-Produktion) und die Suche nach Phänomenen jenseits des Standardmodells.

Hinsichtlich der Triggerstrategie sind die Ereignisse mit hohem Q^2 unproblematisch. Für Ereignisse mit Impulsüberträgen $Q^2 \gtrsim 1000\,\mathrm{GeV}^2$ wird das Elektron in das Flüssig-Argon-Kalorimeter gestreut und kann vom Elektrontrigger dieses Kalorimeters erfaßt werden. Die Triggerrate dieses Triggers wird auch nach dem Upgrade einen Wert haben, der das Setzen eines Prescale-Faktors unnötig macht.

Schwieriger stellt sich die Situation für die Selektion exklusiver Endzustände dar. Der Wirkungsquerschnitt für solche Ereignisse umfaßt nur einen kleinen Bruchteil des Gesamtwirkungsquerschnitts. Sollen diese Ereignisse in möglichst großer Zahl aufgezeichnet werden, muß versucht werden, sie in Bereich kleiner Q^2 zu selektieren, wo auch der Gesamtwirkungsquerschnitt groß ist.

Bei diesen kleinen Werten von Q^2 sind allerdings die Triggerraten extrem hoch. Eine akzeptable Eingangsrate in die vierte Triggerstufe kann durch Einführen von Prescale-Faktoren erreicht werden. Dadurch werden nach dem Zufallsprinzip Ereignisse verworfen, unabhänigig davon, ob sie Kandidaten für einen besonderen Endzustand enthalten. Sollen Ereignisse nicht zufällig durch Prescale-Faktoren in hohem Maße verworfen werden, muß auf frühen Triggerstufen (L1 bis L3) die Triggerrate signifikant gesenkt werden. Dazu muß im besonderen der hadronische Endzustand analysiert werden. Für diesen Zweck werden die Triggerkapazitäten des H1-Experiments für HERA-II deutlich ausgebaut. Die existierenden Level-2-Systeme L2TT und L2NN werden leistungsfähiger. Für eine detailierte Analyse des Endzustandes auf Triggerniveau sind der Fast-Track-Trigger [58, 59] und der neue Jettrigger [67] konzipiert. Mit dem FTT wird eine dritte Triggerstufe (L3) aktiviert, die zur weiteren Ratenreduktion beiträgt.

Kapitel 4

Das Konzept des Fast-Track-Triggers

Der Fast-Track-Trigger (FTT) ist an das mehrstufige Triggersystem des H1-Experiments angepaßt. Ziel ist es, die ersten drei Triggerstufen (L1, L2 und L3) mit den bestmöglichen Spurinformationen zu versorgen. Dabei sollen bis zu 48 Spuren mit Transversalimpulsen von $p_t > 100\,\mathrm{MeV}$ im Zentralbereich ($25° < \Theta < 155°$) des Detektors rekonstruiert werden. Weitere Dokumente, die das Projekt beschreiben, sind [58, 59, 89].

Neben dem Gesamtkonzept des Triggers sollen in diesem Kapitel wichtige Algorithmen vorgestellt werden, die die Realisation des Triggers erlauben. Auf Besonderheiten der Umsetzung dieser Algorithmen wird in den Kapiteln 5 und 6 eingegangen.

Das generelle dreistufige Konzept ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Auf der ersten Stufe werden innerhalb der Latenzzeit der ersten Triggerstufe von 2,3 µs Treffer (Hits) auf ausgewählten Drahtlagen der CJC gesucht und die Driftzeitspektren mittels schneller Mustererkennung mit Driftzeitspektren verglichen, die von gültigen Spuren stammen. Daraus können *Spursegmente* gebildet werden, die anschließend noch grob zu Spuren zusammengefügt werden. Auf der zweiten Stufe, die innerhalb der Latenzzeit der zweiten Triggerstufe von 20 µs ihre Berechnungen durchführt, werden Spuren rekonstruiert, deren Auflösung nur wenig schlechter ist als die der vollständigen H1-Rekonstruktion. Dazu werden die Spursegmente mit einer verfeinerten Methode bei erhöhter Auflösung erneut zusammengefügt und die dreidimensionalen Spurparameter durch Fitalgorithmen optimiert. Diese Spuren dienen auf der dritten Stufe als Grundlage zur Suche von Teilchenzerfällen. Für diese Aufgabe können bis zu 100 µs verwendet werden.

Die Eingangsdaten des FTT stammen von ausgesuchten Drahtlagen der zentralen Spurkammern CJC1 und CJC2. Dabei gibt es vier Triggerlagen, die aus je drei Drahtlagen bestehen, so daß folglich insgesamt 12 Drahtlagen für den Trigger zum Einsatz kommen. Drei der vier Triggerlagen befinden sich in der inneren Spurkammer CJC1 und eine in der äußeren Kammer CJC2. Abbildung 4.2 zeigt eine Ansicht der zentralen Spurkammern in der $r\Phi$-Ebene, wobei die Drahtlagen des FTT markiert sind. Die Auswahl der Lagen kann im Bedarfsfall abgeändert werden, sollten einzelne Signaldrähte aufgrund technischer Probleme nicht zur Verfügung stehen. Die Grundkonfiguration ist in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Eine sogenannte Triggergruppe besteht aus den drei Drähten einer Triggerlage innerhalb einer Spurkammerzelle und je einem weiteren Draht aus den beiden Nachbarzellen, so daß insge-

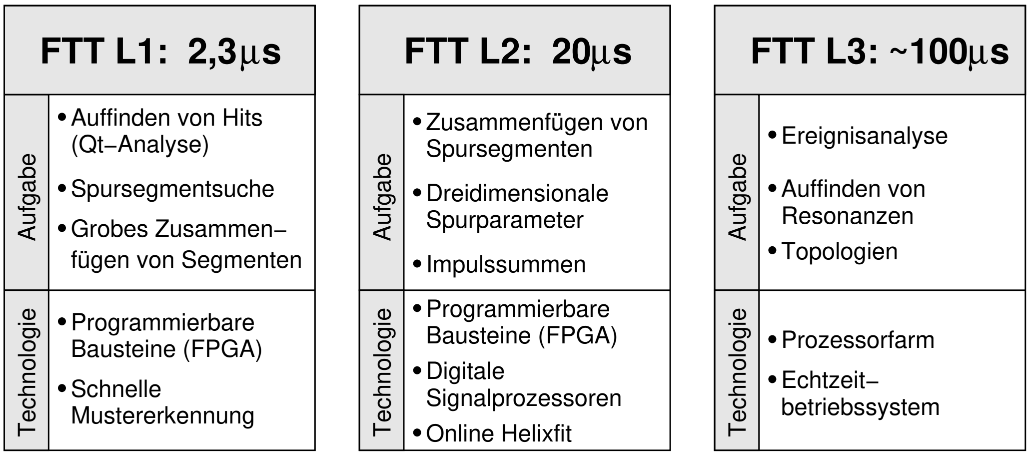


Abbildung 4.1: Hauptaufgaben und Technologien des dreistufigen FTT-Systems.

Triggergruppe	Kammer	Drahtlagen	mittlerer Radius	Anzahl Zellen
1	CJC1	3,5,7	25,1 cm	30
2	CJC1	10,12,14	31,3 cm	30
3	CJC1	18,20,22	38,7 cm	30
4	CJC2	4,6,8	58,7 cm	60

Tabelle 4.1: Vom FTT verwendete Drahtlagen.

samt fünf Drähte zu einer Triggergruppe gehören. Abbildung 4.3 zeigt, welche Drähte aus den Nachbarzellen mitbenutzt werden.

Bei der Auswahl der Drahtlagen hat sich gezeigt, daß es ungünstig ist, Lagen auszuwählen, die zu dicht an der inneren oder äußeren Grenze der Kammer liegen. Auf einer Seite solcher Drähte schneiden die potentiellen Driftstrecken von Ladungsträgen schon nach kurzer Entfernung vom Draht die Kammerwand. Bei Drahtlagen, die weiter im Innern der Kammer liegen, können die Driftstrecken bis zur Zellgrenze genutzt werden.

4.1 Spursegmente für FTT-Level-1

Der FTT benutzt insgesamt 450 Drähte, die an beiden z-Enden ausgelesen werden. Das analoge Signal wird, nachdem es einen Verstärker passiert hat, mit Hilfe eines FADCs (**F**ast **A**nalog **D**igital **C**onverter) digitalisiert. Treffer auf einem Signaldraht werden mit der Difference-of-Samples-Technik (DOS) gesucht. Ein Qt-Algorithmus liefert eine Zeit t, zu der der Treffer gemessen wurde, sowie die auf dem Draht deponierte Ladung Q. Die Beschreibung ist in Abschnitt 4.3.1 zu finden.

Die vom Qt-Algorithmus gefundenen Treffer werden in sogenannte Schieberegister gefüllt, die mit einer Frequenz von 80 MHz[1] getaktet sind. Das Prinzip zeigt Abbildung 4.4. Zum Zeit-

[1] Alle Frequenzen werden aus der HERA-Clock (10,4 MHz) abgeleitet. Wenn im folgenden zur Vereinfachung von 80 MHz oder 20 MHz die Rede ist, sind die exakten Frequenzen von 20,8 MHz und 83,2 MHz gemeint.

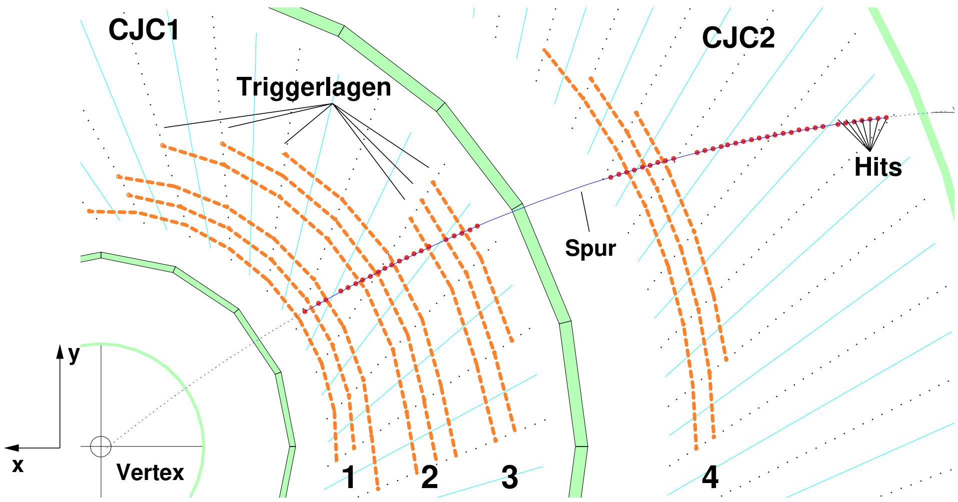


Abbildung 4.2: Drahtlagen, die vom FTT benutzt werden. Es gibt vier Triggerlagen aus je drei Drahtlagen. Drei Triggerlagen befinden sich in der CJC1 und eine in der CJC2.

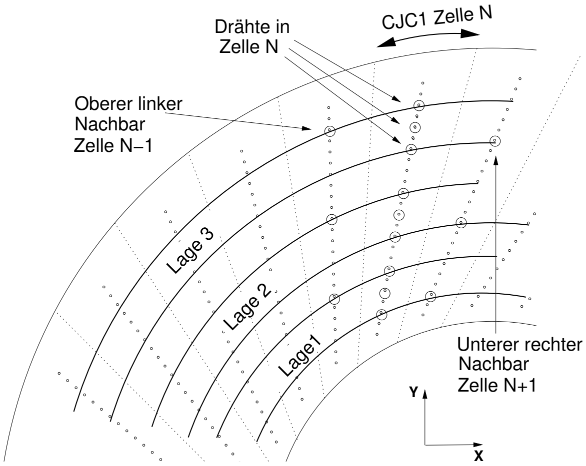


Abbildung 4.3: Zuordnung von Drähten zu Triggergruppen.

punkt des Füllens der Schieberegister kann noch nicht entschieden werden, auf welcher Seite des Drahtes die Ionisationsspur vorbei gelaufen ist. Die Auflösung dieser Mehrdeutigkeit muß zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Parallel dazu gibt es ein Schieberegister, das mit einer Frequenz von 20 MHz arbeitet. Effektiv wird dieses Register durch Veroderung von vier benachbarten Einträgen im 80 MHz-Register erzeugt. Das 20 MHz-Register wurde eingeführt, um das Datenvolumen für die erste Triggerstufe des FTT zu reduzieren. Die volle Auflösung wird erst auf der zweiten Stufe genutzt.

Innerhalb der Schieberegister einer Triggergruppe entstehen charakteristische Muster. Man kann die Muster, die von gültigen Spuren erzeugt werden, im Voraus berechnen. Sind die geometrische Position der Drähte, Driftrichtung, Driftgeschwindigkeit und der Zeitnullpunkt des

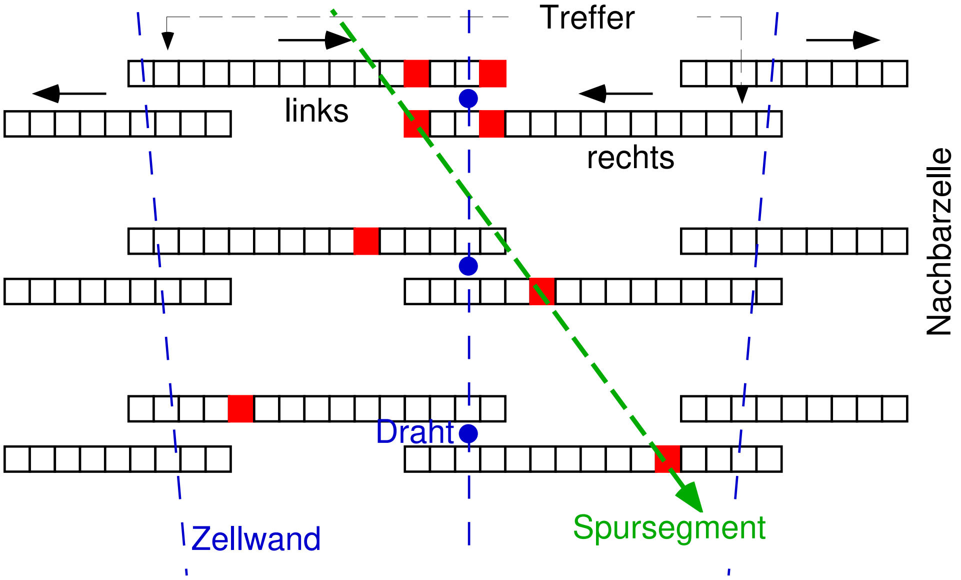


Abbildung 4.4: Einfüllen von Treffern in Schieberegister. Gezeigt ist eine Triggergruppe mit den drei Drähten (•) innerhalb einer Zelle. Da nicht entschieden werden kann, von welcher Seite die Ladungsträger zum Draht gedriftet sind, gibt es für jede Richtung ein eigenes Schieberegister.

Ereignisses bekannt, können aus den Schieberegistereinträgen drei Raumpunkte in der $r\Phi$-Ebene rekonstruiert werden. Als gültig wird ein Muster dann definiert, wenn man in der $r\Phi$-Ebene durch die drei Raumpunkte und den nominellen Ereignisvertex einen Kreis fitten kann. Alle gültigen Muster werden im Voraus berechnet, so daß gültige Muster durch Vergleichen gefunden werden können. Zu jedem gültigen Muster gehört ein Spursegment mit seinen zugehörigen Spurparameter κ (Krümmung) und Φ (Winkel am Vertex).

Spuren werden aus den in den Triggergruppen gefundenen Spursegmenten aufgebaut. Eine Spur gilt als gefunden, wenn in mindestens zwei der vier Triggerlagen ein Spursegment im selben κ-Φ-Bereich vorhanden ist. Der L1-Triggeralgorithmus, der in der Latenzzeit der ersten Triggerstufe von 2,3 µs ablaufen muß, ist in [90, 91] ausführlich beschrieben. Mögliche Triggerelemente, die vom FTT-L1-System an den Zentralen Trigger übermittelt werden können, sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Grundlage für die Berechnung der Triggerelemente sind die Spuren, die in der κ-Φ-Ebene gefunden werden.

4.2 Spuren für FTT-Level-2

Die zweite Stufe des FTT wird aktiviert, sobald der zentrale Trigger ein `L1Keep`-Signal erzeugt hat, wobei dieses Signal sowohl vom L1-Teil des FTT als auch auf jeden anderen Triggersubsystem hervorgerufen worden sein kann. Im FTT werden dann die zu allen gültigen 20 MHz-

TE	Definition	**TE**	Definition
0	Ereignis t_0	10,11	$\sum Q$ (<0, =0, >0)
1,2,3	0–7 Spuren $p_t > 100\,\text{MeV}$	12	Back-to-Back Topologie
4,5	0–3 Spuren $p_t > 300\,\text{MeV}$	13	Jet-Topologie
6,7	0–3 Spuren $p_t > 500\,\text{MeV}$	14	Topologie X
8,9	0–3 Spuren $p_t > 1\,\text{GeV}$	15	Topologie Y

Tabelle 4.2: Mögliche Triggerelemente (**TE**), die vom L1-Teil des FTT bereitgestellt werden können. Die Transversalimpulsschwellen und die Topologien können flexibel programmiert werden.

Masken entsprechenden hochauflösenden 80 MHz-Masken geprüft, und, falls sie gültig sind, die zugehörigen κ- und Φ-Werte herausgesucht. Diese werden dann gemeinsam mit den drei z-Werten für die betreffende Gruppe an den FTT-L2-Linker geschickt. Mit dieser Komponente werden die hochaufgelösten Spursegmente, die zu einer Spur gehören, erneut zusammen gefügt. Dabei wird für das Auffinden einer Spur mindestens das Vorhandensein von zwei (und höchstens vier) passenden Spursegmenten verlangt. Weitere Einzelheiten zum Algorithmus werden im Kapitel 4.3.3 beschrieben. Abbildung 4.5 zeigt ein Beispielereignis.

Die Spurparameter können anschließend erheblich verbessert werden, wenn man die Ortskoordinaten der zusammengefügten Spursegmente und die Position des Vertex in der $r\Phi$-Ebene einem Kreisfit zuführt. Anschließend wird mit den z-Werten der zusammengefügten Spursegmente sowie der z-Position des Vertex, wie sie vom z-Vertextrigger ermittelt wurde, ein Fit in der rz-Ebene durchgeführt. Ergebnis sind dreidimensionale Spuren, die durch die fünf Parameter einer Helix beschrieben werden können:

- Die Krümmung κ ist ein Maß für den Transversalimpuls des Teilchen, das die Spur verursacht hat. Es gilt:
$$p_t[\text{GeV}] = -Q \cdot 0{,}29979 \cdot B_z\,[\text{T}] \cdot \frac{1}{\kappa\,[\text{m}^{-1}]}, \tag{4.1}$$
wobei B_z das Magnetfeld in z-Richtung ist und Q die Ladung des Primärteilchens.

- Die Größe d_{ca} (**D**istance of **c**losest **a**pproach) mißt den kleinsten Abstand, den der Kreis in der $r\Phi$-Ebene vom Koordinatenursprung hat. (Siehe auch Abbildung 4.6).

- Der Azimutalwinkel Φ gibt an, welchen Winkel die Tangente im d_{ca}-Punkt mit der Speicherringebene (x-Achse) einschließt. (Siehe Abbildung 4.6).

- Der Polarwinkel Θ ist der Winkel zwischen Teilchenspur und der z-Achse (Protonstrahlrichtung).

- Der Wert z_0 ist die z-Koordinate der Spur im d_{ca}-Punkt.

Alle genannten Aufgaben müssen in der Latenzzeit der zweiten Triggerstufe von 20 µs abgearbeitet werden. Details zu den eingesetzten Algorithmen sowie ihrer Leistungsverhalten sind in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

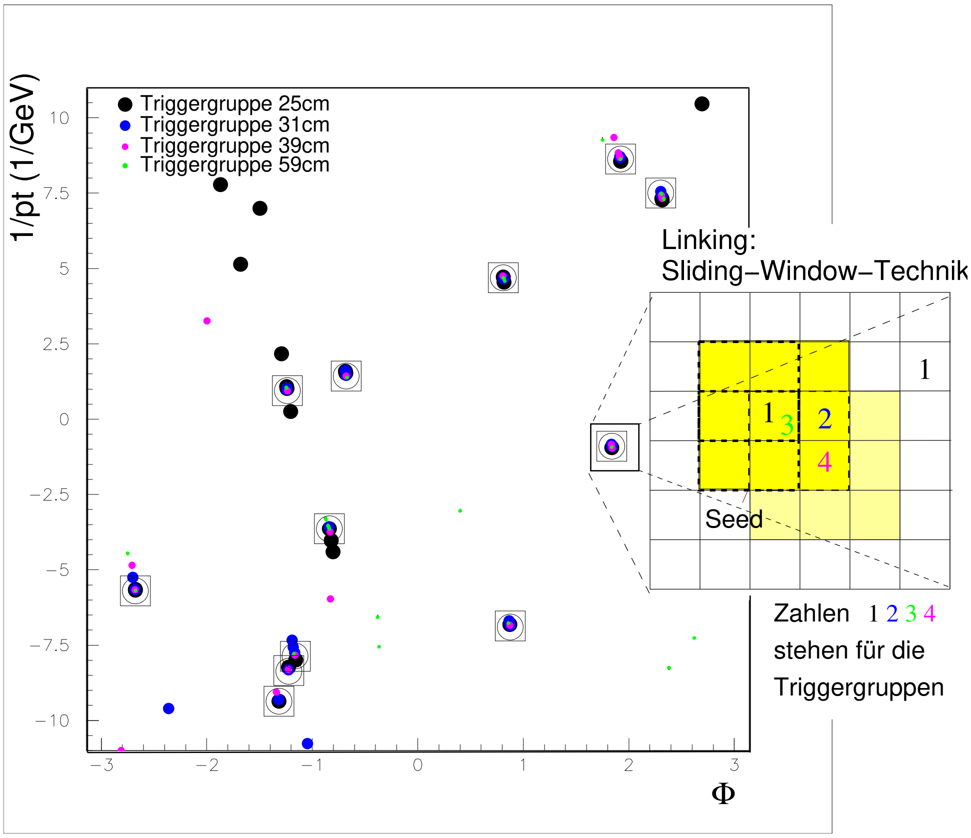


Abbildung 4.5: Prinzip des Linkens (Zusammenfügen) von Spursegmenten im κ-Φ-Histogramm. Damit eine Spur gefunden wird, müssen in mindestens zwei der vier Triggerlagen Segmente mit nahezu gleichen κ- Φ-Werten gefunden werden. Die Spursegmente, die in den einzelne Triggergruppen auf der ersten Stufe gefunden werden, sind durch geschlossene Punkte (●) dargestellt. Offene Kreise (◯) markieren die vom FTT rekonstruierten Spurparameter $1/p_t$ und Φ. Offene Quadrate (□) zeigen das Ergebnis der vollständigen Spurrekonstruktion. Für eine Spur sind Details für das Linking hinzugefügt. Siehe dazu Kapitel 4.3.3.

Mögliche Triggerelemente für die zweite Stufe des zentralen Triggern sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Der FTT kann bis zu 32 Triggerelemente generieren. Die Liste kann um zusätzliche Elemente ergänzt werden, falls diese sich noch innerhalb der L2-Latenzzeit berechnen lassen.

Wird ein Ereignis durch ein `L2Keep`-Signal vom zentralen Trigger akzeptiert, werden alle Spuren zur dritten Stufe transferiert, wo eine weitere Analyse der Spuren erfolgt. Weiterhin kann auf alle Informationen, die auch an die L2-Systeme (L2TT und L2NN) verschickt werden, zurückgegriffen werden. Die L3-Triggeralgorithmen treffen ihre Entscheidung innerhalb von 100 µs.

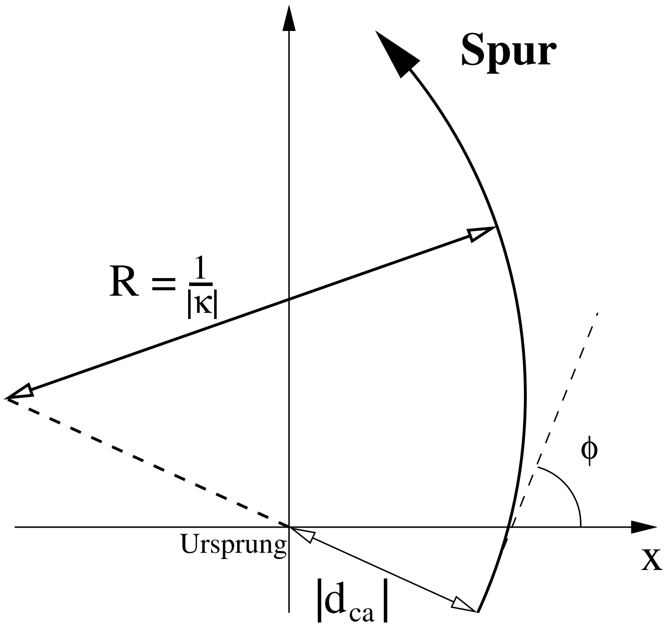


Abbildung 4.6: Definition der Spurparameter κ, Φ und d_{ca}.

TE	Definition	TE	Definition
0,1	p_t-Bereiche der Spur mit höchstem p_t	9,10	$\sum Q$ (<0, =0, >0)
2,3	p_t-Bereiche der Spur mit zweithöchstem p_t	11,12,13	Vektormesonen (z. B. $J/\Psi, \Upsilon$)
4,5,6	Zahl der Spuren	13	Back-to-Back-Topologie
7,8	Bereiche $\sum \lvert p_t \rvert$	14	Jet-Topologie

Tabelle 4.3: Mögliche Triggerelemente (**TE**) der zweiten Stufe des FTT. Die Definition ist variabel programmierbar. Für die p_t-Bereiche können unterschiedliche Schwellen programmiert werden. Die Komplexität der Algorithmen ist im wesentlichen durch die Latenzzeit des L2-Systems limitiert.

4.3 Wichtige Algorithmen für den FTT

4.3.1 Qt-Algorithmus

Der für den FTT verwendete Qt-Algorithmus verwendet die sogenannte **D**ifference-**o**f-**S**amples-Methode (DOS). Die Grundidee basiert darauf, das digitalisierte Signal zu differenzieren und einen starken Anstieg zu suchen.

Dazu wird jeweils die Differenz zwischen zwei Digitalisierungsschritten gebildet. In Abbildung 4.7a sind die digitalisierten Signale, die an beiden Enden des Zähldrahtes ausgelesen worden sind, zu sehen. Im Histogramm 4.7b ist die Differenz $\text{Bin}_{n+1} - \text{Bin}_n$ eingetragen. Liegt diese Differenz über einem Schwellenwert, kann ein Treffer (Hit) auf dem Draht gefunden werden. Ein Treffer gilt dann als gefunden, wenn nach mindestens einem Eintrag über der Schwelle das Differenzsignal in mindestens drei aufeinander folgenden Bins Null oder negativ ist. Die Zeit des Hits entspricht dem Bin, in dem das Differenzsignal sein Maximum erreicht (siehe Abbildung).

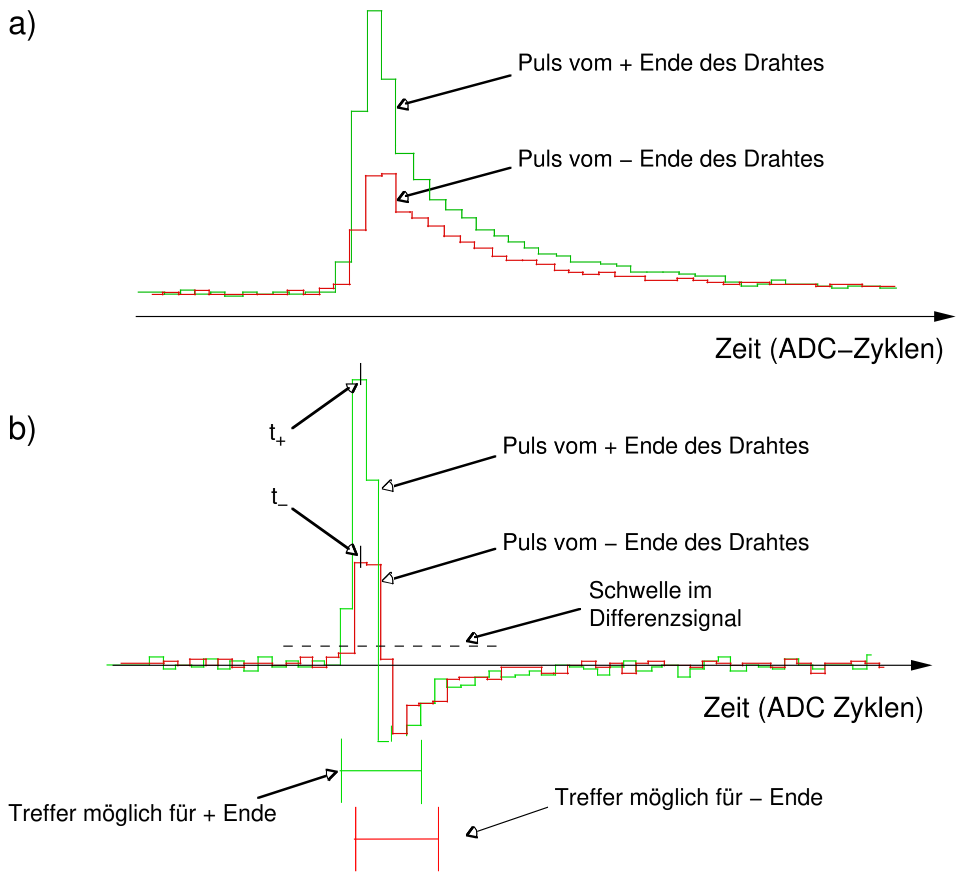


Abbildung 4.7: Prinzip des *Qt*-Algorithmus: Digitalisierte Pulse eines Signaldrahtes (a). Differenz-of-Samples (DOS) (b). Aus [92] mit aktuellen Änderungen [93].

Weitere Details zum *Qt*-Algorithmus, wie etwa das Auflösen von Doppelhits (zwei Treffer auf einem Draht kurz hintereinander), sind in [92] beschrieben.

4.3.2 Messung von z durch Ladungsteilung

Die z-Koordinate wird durch Ladungsteilung bestimmt. Nachdem vom *Qt*-Algorithmus ein Hit gefunden worden ist, wird über einen definierten Zeitraum das Signal aufsummiert. In der derzeitigen Implementierung wird das Signal über 6 Bins [93] integriert, wobei ein Bin vor dem Bin, das die Zeit des Hits definiert, gestartet wird.

Abhängig vom Auftreffpunkt der von der Teilchenspur ausgelösten Ladungsdeposition verteilt sich die meßbare Ladung mit unterschiedlichen Amplituden auf die beiden Drahtenden. Das Prinzip der Methode ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Der Auftreffpunkt der Ladungsdeposition auf einem Draht der Länge L_{Draht} ist durch die Differenz der Ladungen geteilt durch ihre Summe gegeben:

$$z = \frac{L_{\text{Draht}}}{2} \cdot \frac{Q^+ - Q^-}{Q^+ + Q^-},$$

wobei mit Q^+ und Q^- die am $+z$-Ende beziehungsweise am $-z$-Ende des Drahtes gemessene Ladungen bezeichnet sind. Der Mittelpunkt des Drahtes befinde sich bei $z = 0$.

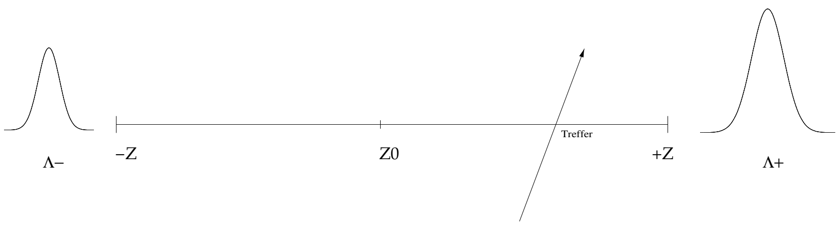


Abbildung 4.8: Prinzip der Bestimmung der z-Koordinate durch Ladungsteilung.

In der Praxis berücksichtigt man noch Effekte in der Elektronik durch Verstärkungsfaktoren g^+ und g^-. Aus den gemessen Pulsamplituden Λ^+ und Λ^- kann man dann auf die deponierte Ladung schließen:

$$\Lambda^+ = Q^+ \cdot g^+ \qquad\qquad \Lambda^- = Q^- \cdot g^-$$

Daraus erhält man für z:

$$z = z_0 + \frac{L_{\text{eff}}}{2} \cdot \frac{1 - \frac{\Lambda^- g^+}{\Lambda^+ g^-}}{1 + \frac{\Lambda^- g^+}{\Lambda^+ g^-}}, \tag{4.2}$$

wobei durch den Parameter z_0 berücksichtigt wird, daß das Spurkammerzentrum nicht notwendigerweise exakt mit dem Koordinatenursprung zusammenfällt. Außerdem wird statt der geometrischen Länge des Drahtes eine effektive Länge L_{eff} benutzt, die durch eine Kalibrationsprozedur ermittelt wird.

4.3.3 L2-Linkalgorithmus

Grundidee des Linkalgorithmus ist es, die auf des ersten Triggerstufe gefundenen Spursegmente in ein κ-Φ-Histogramm zu füllen und dort nach *Clustern*[2] zu suchen. Man erwartet, daß Segmente, die zur selben Spur gehören, gleiche Werte von κ und Φ haben. Wegen begrenzter Auflösung fallen die Segmente der unterschiedlichen Gruppen nicht zwangsläufig in das selbe Histogrammbin, so daß auch Nachbarbins berücksichtigt werden müssen.

Gemäß der unterschiedlichen Auflösungen in κ und Φ hat das Histogramm für den Linkalgorithmus 40 Bins in κ und 640 Bins in Φ. Innerhalb des Histogramms werden stets 5×5 Bins zu einem sogenannten *Sub-Array* zusammengefaßt. Abbildung 4.9 zeigt schematisch das Histogramm und die Aufteilung in Sub-Arrays. Ein Bin im Histogramm ist durch die Angabe der κ-Binnummer $(0\ldots7)$, der Φ-Binnummer $(0\ldots127)$ und der CAM-Nummer $(0\ldots24)$ eindeutig bestimmt. Die Sub-Array-Nummer wird aus der Φ-Binnummer und κ-Binnummer berechnet.

Ein von der ersten FTT-Stufe kommendes Spursegment wird entsprechend seiner Position im κ-Φ-Histogramm in eines von 25 CAMs[3] geschrieben, die es für jede der vier Triggerlagen gibt,

[2] Die Anhäufung nahe beieinander liegender Objekte wird im folgenden als Cluster bezeichnet.
[3] **C**ontent **A**ddressable **M**emory, siehe auch Kapitel 18.

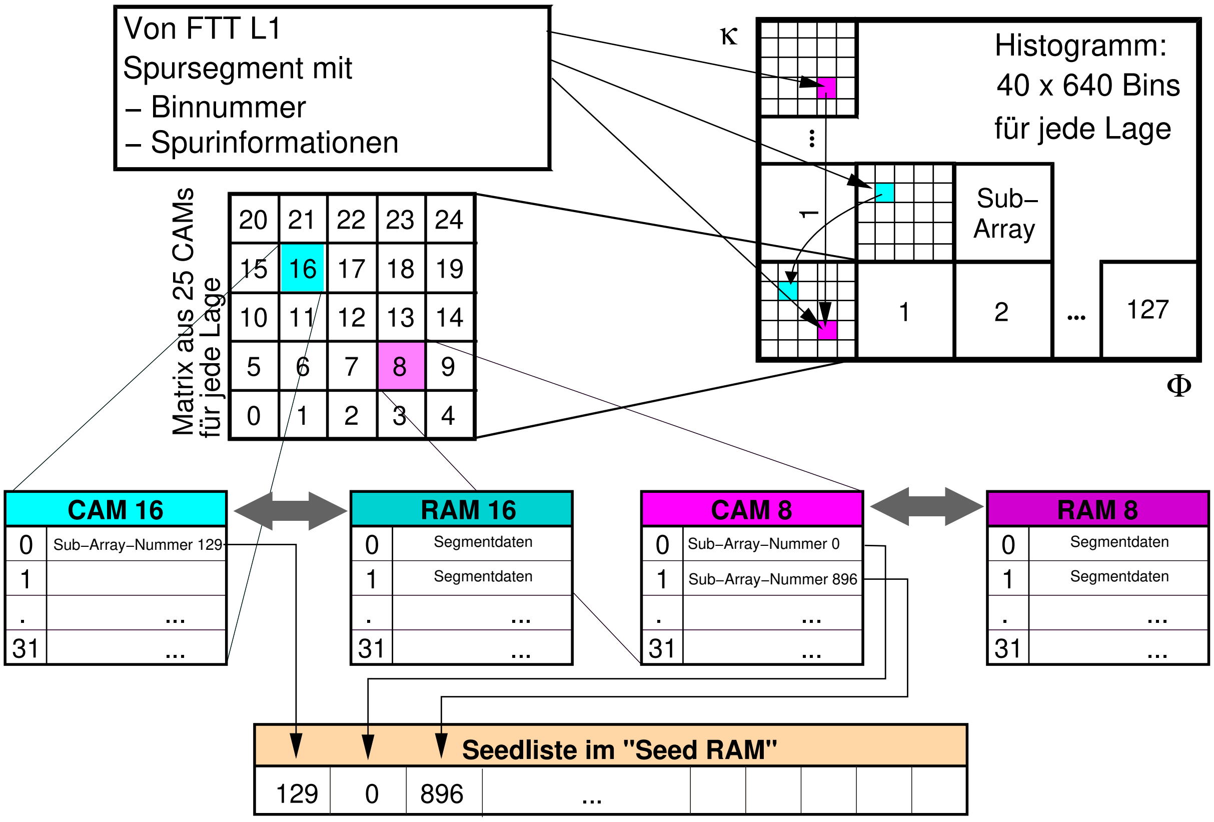


Abbildung 4.9: Speicherung der Spurdaten in einem κ-Φ-Histogramm für den Linkalgorithmus.

so daß insgesamt 100 CAMs vorhanden sind. Die Funktionalität von CAMs wird in Kapitel 18 etwas genauer beschrieben. Im CAM selbst wird nur die Sub-Array-Nummer des Segments gespeichert, wobei die genaue Position im Histogramm durch die Kombination von Sub-Array-Nummer und die CAM-Nummer bestimmt ist.

Die zu einem Spursegment zugehörenden Parameter werden in einem parallel zum CAM organisierten RAM-Speicher abgelegt. Gleichzeitig wird in einer *Seed-Liste* vermerkt, in welchen Sub-Arrays sich Spursegmente befinden. Im Beispiel in Abbildung 4.9 werden drei Segmente einer Triggerlage ins Histogramm eingefüllt. Zwei werden im CAM 8 und eins im CAM 16 gespeichert.

Aus der Seed-Liste werden die Sub-Array-Nummern gelesen und in allen CAMs gesucht, ob dieselbe Sub-Array-Nummer noch in weiteren Triggerlagen gefunden wird. Durch die CAM-Technologie kann diese Suche sehr schnell und in hohe Maße parallel durchgeführt werden. Abbildung 4.10 zeigt ein Beispiel. In allen CAMs wird nach der Sub-Array-Nummer 0 gesucht. In fünf CAMs wird diese Nummer gefunden (einmal in Lage 1 im CAM 8, im ersten Teil des Beispiels eingefüllt, und weitere viermal in den drei restlichen Lagen). Damit man aus dieser Konfiguration ein Cluster finden kann, wird über das 5×5-Sub-Array eine 3×3-Gewichtungsmatrix gelegt, die in einem Sub-Array an 9 verschiedenen Positionen liegen kann. Für jede der Positionen wird eine Summe entsprechend der Gewichte gebildet. Das Maximum dieser Werte definiert die Stelle im κ-Φ-Histogramm, an der ein Link gefunden wur-

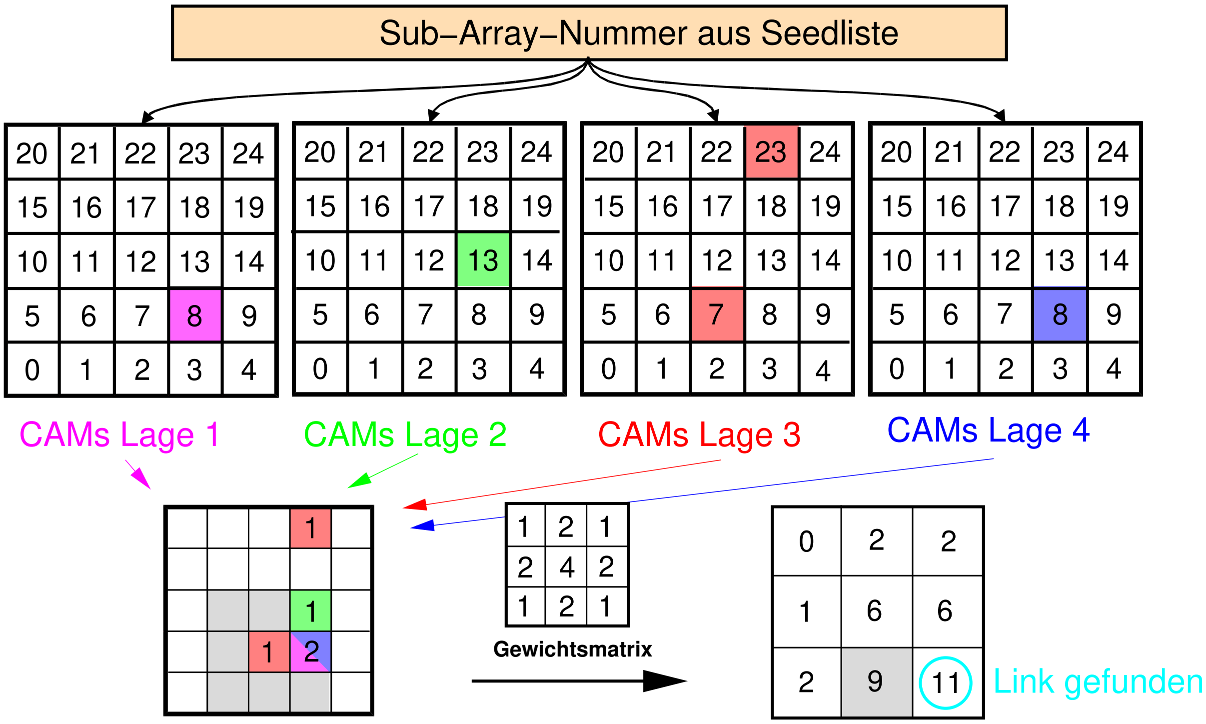


Abbildung 4.10: Beispiel für das Auffinden eines Links. Erläuterung siehe Text.

de. Der Wert des gefundenen Maximums muß mindestens 5 betragen, wodurch sichergestellt wird, daß mindestens zwei Segmente aus zwei unterschiedlichen Triggerlagen zusammengefügt werden.

Obiges Beispiel zeigt eine einfache Konfiguration. In der vollständigen Implementierung des Algorithmus werden auch Randeffekte richtig berücksichtigt, wenn etwa Einträge in benachbarten Sub-Arrays betrachtet werden müssen. Dann werden entsprechend modifizierte Sub-Array-Nummern berechnet und in den CAMs gesucht [94, 95].

4.3.4 Fitalgorithmen

Eine in der Meßdatenauswertung häufig auftretende Aufgabe ist die Anpassung von freien Parametern eines funktionalen Zusammenhangs an Meßwerte. Als *beste Anpassung* wird der Parametersatz bezeichnet, bei dem die Summe der quadratischen Abstände der Meßpunkte zur Funktion minimal wird. Das Verfahren ist auch als *Methode der kleinsten Fehlerquadrate* bekannt.

Bei komplizierten Funktionen kann der Aufwand zur Lösung des Problems erheblich sein. Daher soll hier nur der für die Praxis besonders wichtige Fall der Anpassung der k Parameter $a_1, \ldots a_k$ einer Funktion

$$y = F(a_1, \ldots a_k, x) \tag{4.3}$$

an einen Satz von $n \geq k$ Meßpunkten (x_i, y_i) näher beschrieben werden. In manchen Situationen kann man zu besseren Ergebnissen gelangen, wenn die Meßpunkte unterschiedlich

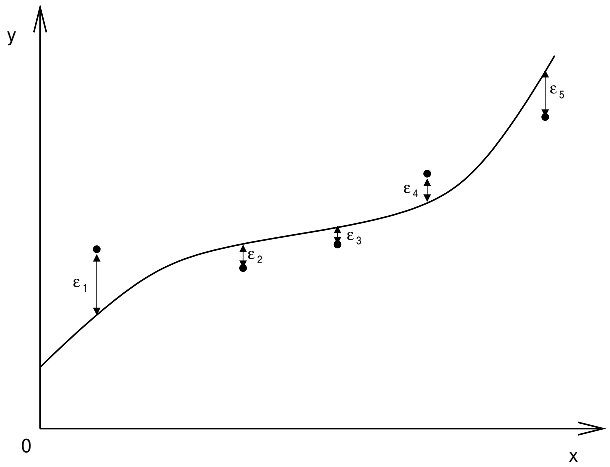


Abbildung 4.11: Beispiel für eine Anpassung einer Funktion $y = F(a_1 \dots a_k, x)$ an fünf Meßwerte. Die Abstände der Funktion von den Meßpunkten sind mit ϵ_i bezeichnet.

gewichtet werden. Zur Vereinfachung werden hier alle Meßpunkte gleich behandelt. Abbildung 4.11 zeigt ein schematisches Beispiel.

Die Abstände ϵ_i der einzelnen Punkte (x_i, y_i) von der Funktion F werden durch ein Gleichungssystem beschrieben:

$$\begin{aligned} F(a_1, \dots a_k, x_1) - y_1 &= \epsilon_1 \\ &\vdots \\ F(a_1, \dots a_k, x_n) - y_n &= \epsilon_n \end{aligned}$$

Die Minimierungsbedingung für die kleinsten quadratischen Abstände lautet:

$$\chi^2 = \sum_i \epsilon_i^2 = \min\,. \tag{4.4}$$

Die Schwierigkeit der Lösung von 4.4 hängt von den Eigenschaften der Funktion F ab. Es sollen im folgenden zwei Spezialfälle diskutiert werden, die für die Anpassung von Spurparametern wichtig sind.

Anpassung einer Geraden

Ein für die Praxis wichtiger Spezialfall ist die Anpassung von Meßwerten an einen linearen Zusammenhang. Gleichung 4.3 lautet dann:

$$y = F(a, b, x) = ax + b\,. \tag{4.5}$$

Einsetzen in Gleichung 4.4 ergibt:

$$\chi^2 = \sum_i \epsilon_i^2 = \sum_i [y_i - F(a, b, x_i)]^2 = \sum_i (y_i - ax_i - b)^2 = \min\,. \tag{4.6}$$

Die Parameter a und b findet man durch Lösen der Gleichungen:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \sum_i (-2ax_i(y_i - ax_i - b)) = 0 \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = \sum_i (-2(y_i - ax_i - b)) = 0 \tag{4.8}$$

Aus 4.8 folgt

$$\frac{1}{n}\sum_i y_i = a\frac{1}{n}\sum_i x_i + b \quad \text{oder} \quad \langle y\rangle = a\langle x\rangle + b\,, \tag{4.9}$$

wobei $\langle x\rangle$ und $\langle y\rangle$ die Mittelwerte der x_i bzw. y_i sind. Durch Einsetzen in 4.7 kann man a errechnen:

$$a = \frac{\sum_i (x_i - \langle x\rangle)y_i}{\sum_i (x_i - \langle x\rangle)^2}\ . \tag{4.10}$$

Die Lösung für b folgt unmittelbar mit Hilfe von Gleichung 4.9.

Kreisfitalgorithmus

Der Abstand eines Punktes i von einem Kreis mit dem Mittelpunkt (a,b) und dem Radius R ist gegeben durch:

$$\epsilon_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R\ . \tag{4.11}$$

Zur Lösung von Gleichung 4.4 für dieses spezielle Problem ist es zweckmäßig, zu Polarkoordinaten über zu gehen. Man erhält:

$$\epsilon_i = \tfrac{1}{2}\kappa r_i^2 - (1 + \kappa d_{ca})r_i \sin(\Phi - \phi_i) + \tfrac{1}{2}\kappa d_{ca}^2 + d_{ca}\ . \tag{4.12}$$

r_i und ϕ_i sind die Polarkoordinaten des Punktes i. Die Parameter des Kreises sind die Krümmung κ, der Winkel Φ und der Abstand vom Koordinatenursprung d_{ca} (siehe auch Abbildung 4.6).

Im folgenden soll eine nicht-iterative Lösung zu obigem Problem beschrieben werden. Die Darstellung folgt [96], wo das Problem noch etwas allgemeiner unter Berücksichtigung von Gewichten für die einzelnen Punkte behandelt wird. Dazu wird Gleichung 4.12 zunächst etwas umgeschrieben:

$$\epsilon_i = (1 + \kappa d_{ca})\eta_i\,, \tag{4.13}$$

mit

$$\eta_i = \beta r_i^2 - r_i \sin(\Phi - \phi_i) + \delta\,,$$

wobei gilt

$$\beta = \tfrac{1}{2}\frac{\kappa}{1 + \kappa d_{ca}}; \quad \delta = \frac{1 + \frac{1}{2}\kappa d_{ca}}{1 + \kappa d_{ca}} d_{ca}\,. \tag{4.14}$$

In dieser Schreibweise ist die χ^2-Funktion

$$\chi^2 = (1 + \kappa d_{ca})^2 \hat{\chi}^2\,,$$

wobei

$$\hat{\chi}^2 = \sum_i \eta_i^2. \tag{4.15}$$

Die Parameter κ, Φ und d_{ca}, die $\hat{\chi}^2$ minimieren, sind in sehr guter Näherung auch die Werte, die χ^2 minimieren. In [96] wurde dies für den Parameterraum, der für Spurfits typisch ist, genauer untersucht und verifiziert.

Im allgemeinen kann $\hat{\chi}^2$ nur durch ein iteratives Verfahren minimiert werden. In [96] ist es jedoch gelungen, Gleichung 4.15 bezüglich der Parameter β, Φ und δ analytisch zu minimieren. Mit Hilfe von Gleichung 4.14 können dann κ und d_{ca} berechnet werden.

Zur Minimierung von $\hat{\chi}^2$ sind folgende Gleichungen zu lösen:

$$\begin{aligned}
\tfrac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\beta}\hat{\chi}^2 &= \beta\langle r^4\rangle - \sin\Phi\,\langle xr^2\rangle + \cos\Phi\,\langle yr^2\rangle + \delta\langle r^2\rangle = 0\\
\tfrac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\Phi}\hat{\chi}^2 &= -\beta\cos\Phi\,\langle xr^2\rangle - \beta\sin\Phi\,\langle xr^2\rangle\\
&\quad +\tfrac{1}{2}\sin 2\Phi\,\langle x^2-y^2\rangle - \cos 2\Phi\,\langle xy\rangle\\
&\quad -\delta\cos\Phi\,\langle x\rangle - \delta\sin\Phi\,\langle y\rangle = 0,\\
\tfrac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\delta}\hat{\chi}^2 &= \beta\langle r^2\rangle - \sin\Phi\,\langle x\rangle + \cos\Phi\,\langle y\rangle + \delta = 0.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Mit $\langle\rangle$ wird der Mittelwert einer Variablen bezeichnet.
Die Gleichungen 4.16 können wie folgt explizit gelöst werden:

$$\begin{aligned}
\Phi &= \tfrac{1}{2}\arctan(2q_1/q_2),\\
\beta &= (\sin\Phi\, C_{xr^2} - \cos\Phi\, C_{yr^2})/C_{r^2r^2},\\
\delta &= -\beta\langle r^2\rangle + \sin\Phi\,\langle x\rangle - \cos\Phi\,\langle y\rangle,
\end{aligned} \tag{4.17}$$

mit $q_1 = C_{r^2r^2}C_{xy} - C_{xr^2}C_{yr^2}$ und $q_2 = C_{r^2r^2}(C_{xx} - C_{yy}) - C_{xr^2}^2 + C_{yr^2}^2$. Die Koeffizienten C_{nm} sind die statistischen Kovarianzen der Meßpunkte x_i, y_i und $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$:

$$\begin{aligned}
C_{xx} &= \langle x^2\rangle - \langle x\rangle^2,\\
C_{xy} &= \langle xy\rangle - \langle x\rangle\langle y\rangle,\\
C_{yy} &= \langle y^2\rangle - \langle y\rangle^2,\\
C_{xr^2} &= \langle xr^2\rangle - \langle x\rangle\langle r^2\rangle,\\
C_{yr^2} &= \langle yr^2\rangle - \langle y\rangle\langle r^2\rangle,\\
C_{r^2r^2} &= \langle r^4\rangle - \langle r^2\rangle\langle r^2\rangle.
\end{aligned}$$

Durch Auflösen von Gleichung 4.14 können κ und d_{ca} berechnet werden:

$$\kappa = \frac{2\beta}{\sqrt{1-4\beta\delta}}; \quad d_{ca} = \frac{2\delta}{1+\sqrt{1-4\beta\delta}}. \tag{4.18}$$

Die Größe χ^2 kann aus obigen Termen berechnet werden:

$$\chi^2 = (1+\kappa d_{ca})^2(\sin^2\Phi\, C_{xx} - 2\sin\Phi\,\cos\Phi\, C_{xy} + \cos^2\Phi\, C_{yy} - \beta^2 C_{r^2r^2}). \tag{4.19}$$

Kapitel 5

Simulation des FTT

Vor dem eigentlich Design der FTT-Hardware wurde das Konzept des FTT, wie es in Kapitel 4 beschrieben ist, anhand von Simulationsstudien entworfen. Dazu wurde das Programmpaket FTTEMU entwickelt. In frühen Versionen dieses Pakets wurde ganz grundsätzlich die Tauglichkeit des Konzeptes geprüft. Die Laufzeit von Algorithmen wurde erst zu einem späteren Zeitpunkt detailierter untersucht. Auch eine Eingliederung der FTT-Simulation in bestehende H1-Softwarepakete wurde erst in späteren Versionen vorangetrieben. In diesem Kapitel sollen die Versionen 3 und insbesondere 4 von FTTEMU ausführlicher vorgestellt werden.

5.1 Datenmodelle des H1-Experiments

Bevor auf die Simulation des FTT eingegangen wird, soll an dieser Stelle eine kurze Übersicht über die Art und Weise der Datenspeicherung im H1-Experiment gegeben werden.

Nahezu alle Daten, die das H1-Experiment liefert, werden in sogenannten BOS-Banken gespeichert. Das BOS-System [97] gestattet eine strukturierte Organisation der Daten, die in einem vom H1-Detektor aufgezeichneten Ereignis anfallen. Ein Ereignis besteht aus mehreren Banken, wobei die Informationen einzelner Detektorkomponenten in unterschiedliche Banken gefüllt werden. Eine Bank wird durch einen Namen, der vier Buchstaben lang ist, identifiziert. Es kann mehrere Banken mit demselben Namen geben. Dann wird eine Unterscheidung anhand einer Versionsnummer durchgeführt. Außerdem gehört zu jeder Bank ein definiertes Format. Bei Banken, die direkt vom Datennahmesystem des H1-Experiments geschrieben werden, ist das Format üblicherweise sehr einfach und besteht aus 16- oder 32-Bitworten.

Daten, die aus der Detektorsimulation stammen, werden im selben Format gespeichert. Sie unterscheiden sich im Format nicht von den Daten aus dem realen Experiment und werden völlig analog behandelt.

Die vom Experiment oder der Simulation stammenden Rohdaten werden der Rekonstruktion zugeführt, die ihre Ergebnisse ebenfalls in Form von BOS-Banken ausgibt. Für die Analyse werden dann üblicherweise sogenannte Data-Summary-Tapes (DST) erzeugt, auf denen ebenfalls alle Daten in BOS-Banken gespeichert sind. Die DSTs enthalten nur noch die für die Analyse wichtigsten Detektorinformationen und Variablen, die durch die Rekonstruktion berechnet wurden. Die DSTs sind für Analysen bequem zugänglich, da sie in der Regel auf schnellen Festplattenspeichern zur Verfügung stehen.

Daten, die sich nicht für jedes Ereignis ändern, wie zum Beispiel Kalibrationskonstanten oder Informationen über die Detektorgeometrie, werden in einer Datenbank [98] gespeichert. Das Format, mit dem in die Datenbank geschrieben wird, sind wieder BOS-Banken. Dadurch ist der Zugriff auf Informationen aus der Datenbank sehr ähnlich dem Zugriff auf die Daten eines Ereignisses, das mit dem Detektor aufgezeichnet worden ist.

5.2 FTTEMU Version 3

Die Version 3 von FTTEMU ist die erste Version der Simulation des FTT, die nahezu die gesamten Betriebseigenschaften des FTT beschreibt. Bei der Implementierung stand im Vordergrund, die vom FTT berechneten Spuren so gut wie möglich zu beschreiben. Um das Potential des Triggers vorhersagen zu können, sollte es möglich sein, der FTT-Simulation existierende H1-Daten oder berechnete Monte-Carlo-Daten zuzuführen.

Die Programmierung erfolgte in der Programmiersprache FORTRAN. Dadurch konnten viele existierende Routinen der H1-Software sehr leicht in FTTEMU benutzt werden. Andererseits ist es nicht möglich, die implementierten Algorithmen direkt auf die FTT-Hardware zu übertragen, da dort andere Programmiersprachen zum Einsatz kommen müssen.

5.2.1 Programmablauf

Abbildung 5.1 zeigt schematisch den Programmablauf. Die wesentlichen Schritte können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Erzeugung der Muster in den Schieberegistern
  Mögliche Quellen für Treffer auf den FTT-Drahtlagen:
  - Gemessene Hits aus den Jetkammern
  - Hits, die aus Spurparametern berechnet wurden
- Auffinden von Spursegmenten in den einzelnen Triggergruppen durch Validieren von gültigen Mustern in den Schieberegistern
- Bestimmung von Spurparametern durch Zusammenfügen von Segmenten und anschließendem Spurfit.

Die einzelnen Schritte sollen in den folgenden Absätzen näher beschrieben werden.

Als Eingangsgrößen können entweder gemessene Hits aus der zentralen Spurkammer (CRJE-Bank) oder rekonstruierte Spuren (DTNV- oder DTRA-Bank) verwendet werden. Bei der letztgenannten Option werden zunächst die erwarteten Hits in der Spurkammer aus den gemessenen Spurparametern berechnet. Dazu werden Kalibrationskonstanten, wie die Driftgeschwindigkeit und Angaben zur Kammergeometrie aus der Datenbank benutzt. Eine Studie, wie gut diese Rückrechnung gelingt, ist in Abschnitt 5.3.1 zu finden.

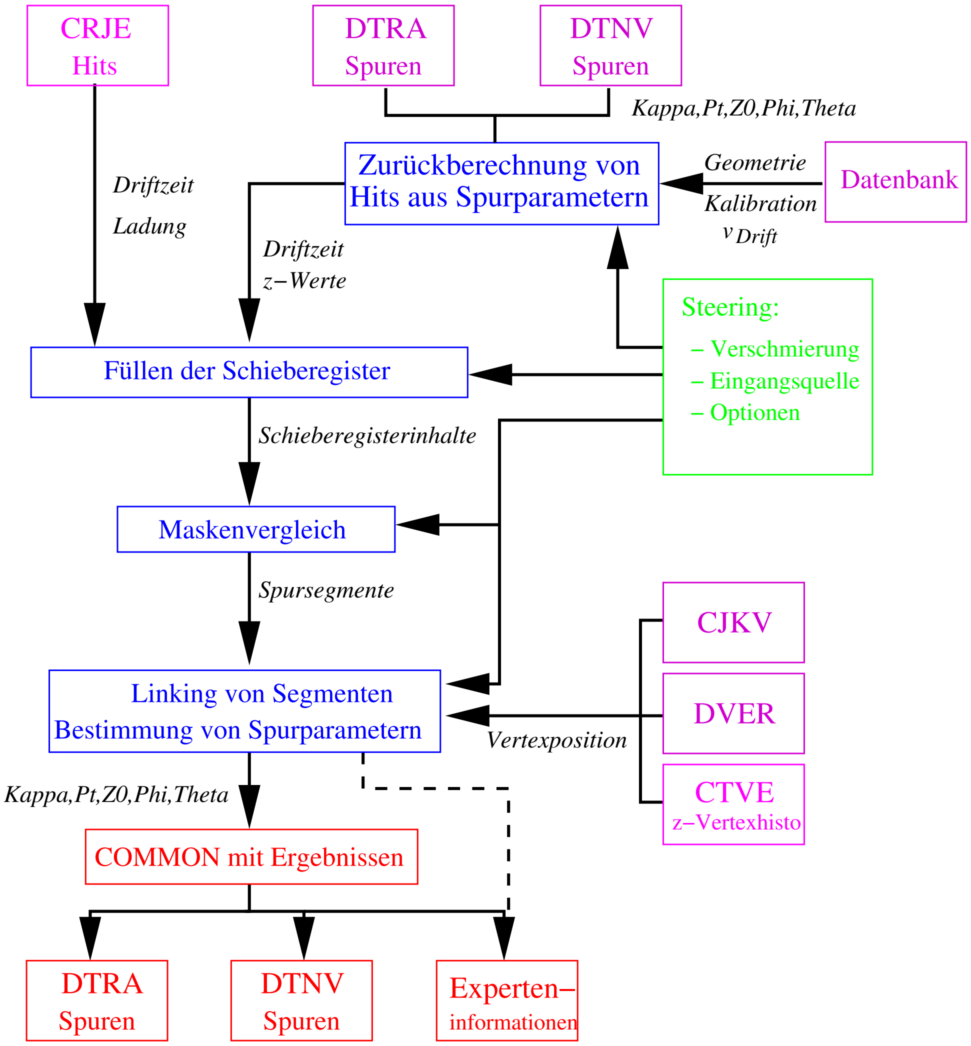


Abbildung 5.1: Schematischer Programmablauf von FTTEMU Version 3. BOS-Banken werden mit vier Großbuchstaben bezeichnet. Weitere Beschreibung siehe Text.

Die gefundenen Hits werden in die Schieberegister eingefüllt. Sind die Hits aus Spurparametern berechnet worden, wird noch das Rauschen in der Kammer simuliert, indem zufällig weitere Hits generiert werden. In welchem Maße Rauschen auftritt, kann durch einen Parameter gesteuert werden. Ein weiterer Parameter gibt an, wie viele Hits aufgrund der nicht hundertprozentigen Einzelhiteffizienz verworfen werden.

In den Triggergruppen, in denen drei Drähte von einer Teilchenspur getroffen wurden, wird nach Spursegmenten gesucht. Das χ^2 eines Kreisfits in der $r\Phi$-Ebene durch die drei Treffer in der Triggergruppe und den nominellen Ereignisvertex (siehe Abbildung 5.2) entscheidet, ob das Spursegment akzeptiert wird. In der realen Hardwareimplementierung des FTT wird das Auffinden von Spursegmenten durch den Vergleich mit **vorher** berechneten Masken realisiert.

Spursegmente, die von derselben primären Teilchenspur ausgelöst worden sind, sollten etwa die gleichen Spurparameter κ und Φ haben. In einem zweidimensionalen κ-Φ-Histogramm bilden Segmente einer realen Spur ein Cluster, während Segmente, die zufällig gefunden wurden, meist isoliert auftreten. Ein Beispiel ist Abbildung 4.5 zu finden.

Eine Spur gilt als gefunden, wenn mindestens zwei von vier Spursegment aus unterschiedlichen Triggerlagen zusammengefügt werden konnten. Weitere Details zur Implementierung dieses Linkalgorithmus sind in Kapitel 4.3.3 zu finden.

Damit optimale Spurparameter berechnet werden können, wird ein Kreisfit für die zuvor zusammengefügten Spursegmenten und dem nominellen Ereignisvertex aus der Datenbank durchgeführt. Detailierte Studien zum Kreisfitalgorithmus und seiner Implementierung in der Hardware des FTT werden in Kapitel 6 diskutiert.

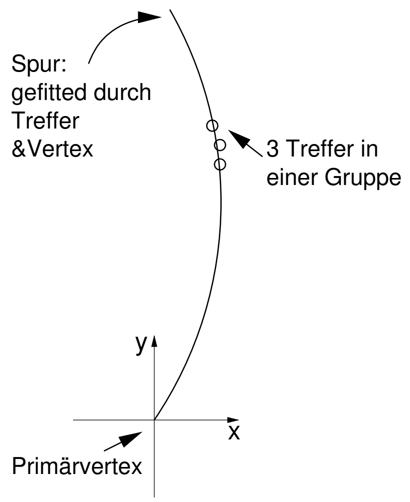


Abbildung 5.2:
Gültiges Spursegment: Erfolgreicher Fit durch drei Treffer und den Primärvertex.

Der Winkel, den die Spur mit der z-Achse einschließt wird in einem anschließenden rz-Fit bestimmt. Hier hat es sich als günstig erwiesen, die z-Werte jedes einzelnen Drahtes, also drei pro Spursegment, in die Rechnung einzubeziehen. Wegen der limitierten Auflösung in z-Richtung kommt es bei einzelnen Messungen immer wieder zu "Ausreißern". Diese können effektiver erkannt und verworfen werden, wenn die drei einzelnen z-Meßpunkte in jeder Triggergruppe berücksichtigt werden [99].

Die gefundenen Spuren werden mit ihren Parametern zurück in Banken geschrieben, die dasselbe Format haben wie die Banken, die üblicherweise für die Analyse von rekonstruierten Spuren benutzt werden. Dadurch ist es leicht möglich, die Spuren der vollständigen Rekonstruktion mit den Spuren, die der FTT gefunden hat, zu vergleichen.

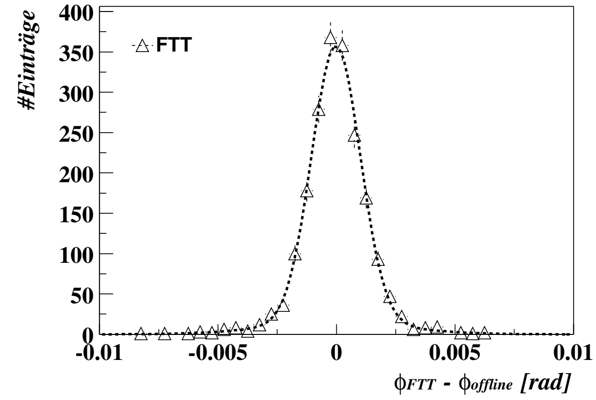
5.2.2 Qualität der Spurrekonstruktion

Die vom FTT erwartete Qualität der Spurrekonstruktion wurde in mehreren Analysen untersucht. Beispielhaft sollen hier einige Ergebnisse einer umfangreichen Studie [100] gezeigt werden, die mit der FTT-Simulation FTTEMU Version 3 gewonnen wurden. Im vorliegenden Fall wurde das Verhalten des FTT für die elastische J/Ψ-Mesonproduktion simuliert, wobei ausschließlich der Zerfall $J/\Psi \to \mu^+\mu^-$ betrachtet wurde.

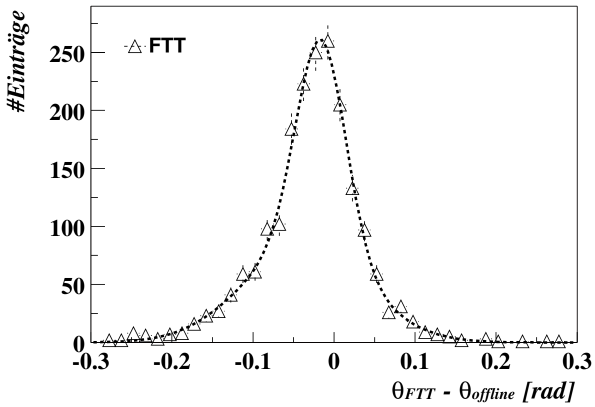
Abbildung 5.3 zeigt einen Vergleich zwischen Spurparametern der vollständigen Rekonstruktion und Ergebnissen der FTT-Rekonstruktion. Zur Bestimmung der Auflösung wurde jeweils eine Summe von zwei Gausskurven mit unterschiedlichen Amplituden $A_{1,2}$, Mittelwerten $\mu_{1,2}$ und Breiten $\sigma_{1,2}$ angepaßt:

$$g(\Delta x) \quad = \quad A_1 \cdot e^{-\frac{(\Delta x - \mu_1)^2}{\sigma_1^2}} + A_2 \cdot e^{-\frac{(\Delta x - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}} , \tag{5.1}$$

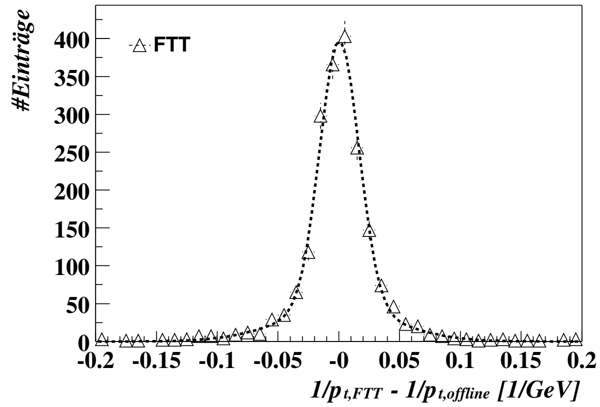
wobei Δx jeweils die Differenz beider Rekonstruktionsmethoden ist.



a)



b)



c)

Abbildung 5.3:
Auflösung der vom Fast-Track-Trigger bestimmten Spurparameter Φ_{FTT} (a), Θ_{FTT} (b) und $p_{t,\mathrm{FTT}}$ (c) relativ zu den vollständig rekonstruierten Spurparametern Φ_{offline}, $\Theta_{\mathrm{offline}}$ und $p_{t,\mathrm{offline}}$ für ein Datensatz mit J/Ψ-Ereignissen [100].

Das effektive Auflösungsvermögen wurde durch das amplitudengewichtete Mittel beider Kurven ermittelt:

$$\sigma_{\mathrm{eff},x}^{\mathrm{AW}} = \frac{A_1\sigma_1 + A_2\sigma_2}{A_1 + A_2}. \tag{5.2}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Alternativ kann statt der amplitudengewichteten Breite $\sigma_{\mathrm{eff},x}^{\mathrm{AW}}$ eine Breite bestimmt werden, die gemäß der Flächen unter beiden Gausskurven gewichtet ist:

$$\sigma_{\mathrm{eff},x}^{\mathrm{FW}} = \frac{A_1\sigma_1^2 + A_2\sigma_2^2}{A_1\sigma_1 + A_2\sigma_2}. \tag{5.3}$$

Gleichung 5.3 liefert etwas größere Breiten insbesondere, wenn die Gaussfunktion, die die Ausläufer der Verteilung beschreiben, einen vergleichsweise großen Beitrag hat. Die Breiten der Gausskurven wurden auch mit Gleichung 5.3 bestimmt [101] und ebenfalls in Tabelle 5.1 aufgenommen.

Weitere Studien [102, 103], die ebenfalls das Verhalten des FTT mit FTTEMU Version 3 untersucht haben, sind zu sehr ähnlichen Ergebnissen gekommen. Dabei wurde die FTT-Simulation auf sehr unterschiedliche Arten von Monte-Carlo-Datensätzen und Datensätzen aus dem HERA-I-Zeitraum angewandt.

Variable	Φ	Θ	$1/p_t$
Auflösung $\sigma_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{AW}}$	1,1 mrad	44 mrad	0,019 GeV^{-1}
Auflösung $\sigma_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{FW}}$	1,2 mrad	54 mrad	0,024 GeV^{-1}

Tabelle 5.1: Auflösung der Spurparameter gemessen mit dem FTT im Vergleich zur vollständigen Rekonstruktion. Die Breite der Kurven wurde mir zwei unterschiedlichen Methoden bestimmt [100, 101].

5.2.3 Selektivität des FTT

Ausgehend von einer guten Spurrekonstruktion kann der FTT zur gezielten Ereignisselektion genutzt werden. Ziel ist eine Reduktion der Eingangsrate in die vierte Triggerstufe, die eine Frequenz von 50 Hz nicht überschreiten sollte. Gleichzeitig muß eine hohe Selektionseffizienz erreicht werden.

Zur Bestimmung der Selektionseffizienz werden die von der vollständigen Rekonstruktion erfaßten Ereignisse zu Grunde gelegt. Dabei wurde ein Satz von Selektionsschnitten, $Cuts_{\mathrm{offline}}$, angewandt. Um später einen Reduktionsfaktor für die Eingangsrate in die vierte Triggerstufe bestimmen zu können, werden nur Ereignisse betrachtet, die von einem ausgesuchten Subtrigger ST selektiert wurden. Auf FTT-Niveau werden Schnitte, $Cuts_{\mathrm{FTT}}$, zur Selektion benutzt. Zur Bestimmung der Selektionseffizienz werden Ereignisse herangezogen, die sowohl die FTT-Schnitte $Cute_{\mathrm{FTT}}$ und Offline-Schnitte $Cuts_{\mathrm{offline}}$ erfüllen. Damit ergibt sich für die Selektionseffizienz des FTT:

$$\epsilon_{\mathrm{S}} = \frac{N(ST \wedge Cuts_{\mathrm{offline}} \wedge Cuts_{\mathrm{FTT}})}{N(ST \wedge Cuts_{\mathrm{offline}})} \,. \tag{5.4}$$

Die Reduktion der Triggerrate wird mit sogenannten *Transparent Runs* bestimmt. In diesen Runs beeinflußt ausschließlich die erste Triggerstufe L1 die Triggerentscheidung. Werden auf diese Daten die Triggeralgorithmen des FTT angewandt, kann man den Reduktionsfaktor bestimmen, um den die Rate $R_{\mathrm{ST,L1}}$ eines Subtriggers auf der ersten Stufe reduziert wird, bevor die Ereignisse mit der Rate $R_{\mathrm{ST,L4in}}^{\mathrm{FTT}}$ in die vierte Triggerstufe gelangen:

$$R_{\mathrm{ST,L4in}}^{\mathrm{FTT}} = R_{\mathrm{ST,L1}} \cdot \frac{N(ST \wedge Cuts_{\mathrm{FTT}})}{N(ST)} \,. \tag{5.5}$$

Durch den zusätzlichen Einsatz des topologischen Triggers L2TT oder des neuronalen Triggers L2NN kann die Rate $R_{\mathrm{ST,L1}}$ weiter reduziert werden.

Es sollen im folgenden die wichtigsten Resultate zweier Studien aufgeführt werden, die unter Verwendung von FTTEMU3 gewonnen wurden.

Selektion von J/Ψ-Ereignissen in Photoproduktion

Der Zerfall der J/Ψ-Mesonen in zwei entgegengesetzt geladene Leptonen ist für die Selektion der Ereignisse auf Triggerniveau besonders geeignet, wenn das J/Ψ in elastischer *ep*-Streuung bei $Q^2 \approx 0$ (Photoproduktion) produziert wird. Dabei bleibt das Proton intakt, und der Endzustand besteht ausschließlich aus den Zerfallsteilchen des J/Ψ. Das Elektron verläßt den Hauptdetektor durch das Strahlrohr.

Zur Rekonstruktion werden Spuren mit entgegengesetzter Ladung selektiert und ihre invariante Masse M_{ll} berechnet:

$$M_{ll} \approx \sqrt{2|\vec{p}_{l^+}||\vec{p}_{l^-}| - 2\vec{p}_{l^+} \cdot \vec{p}_{l^-}}\ ,\ l = \mu, e\ ,$$

wobei die Masse der Zerfallsleptonen vernachlässigt wurde.

Als J/Ψ-Ereignisse werden solche angesehen, für die eine invariante Masse M_{ll} rekonstruiert werden kann, die weniger als ΔM von der nominellen Masse $M_{J/\Psi} = 3{,}097\,\text{GeV}$ [1] abweicht. Damit auch der Untergrundanteil an die Verteilung angepaßt werden kann, wird typischerweise ein recht großzügiger Schnitt von $\Delta M = 1{,}1\,\text{GeV}$ gewählt [104].

Abbildung 5.4 zeigt die vom FTT rekonstruierte Masse und die von der vollständigen Rekonstruktion errechnete Masse für die J/Ψ-Kandidaten. Die Verteilungen wurden mit einem Monte-Carlo-Datensatz für elastische J/Ψ-Erzeugung in Photoproduktion erzeugt. Die Selektionseffizienz des FTTs wurde (unter anderem) für die Subtriggerelemente S15 und S52 durchgeführt. Tabelle 5.2 zeigt die genaue Triggerdefinition sowie eine typische L1-Triggerrate $R_{\text{ST,L1}}$ für die Jahre 1999 und 2000.

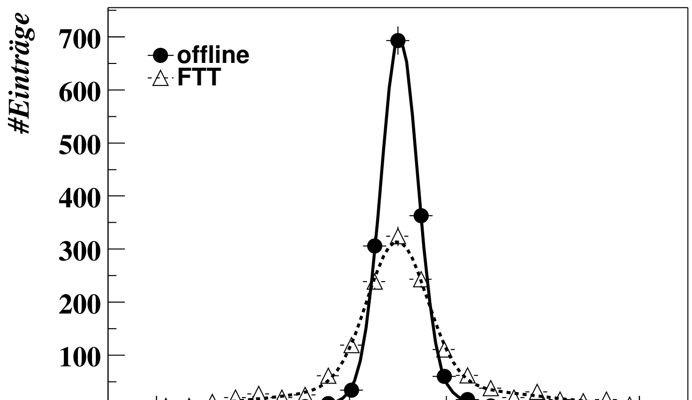


Abbildung 5.4: Invariante Masse aus zwei Myonspuren, rekonstruiert mit der vollständigen Rekonstruktion und dem FTT [100].

S15 dient zum Triggern des Zerfalls $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$, wobei das J/Ψ elastisch in Photoproduktion erzeugt worden ist. Dazu wird ein Signal in zentralen Myonsystem ((`Mu_Bar` | `Mu_ECQ`)), mindestens eine Spur in der zentralen Driftkammer mit einem Transversalimpuls von mehr als

Sub-trigger	Definition	$R_{\mathrm{ST,L1}}$ [Hz]
S15	(Mu_Bar | Mu_ECQ) & DCRPh_THig & zVtx_sig & **L2**[**5**]	2 Hz
S52	zVtx_Cls & DCRPh_TNeg & LAr_BR & Topo_Mult $<$ 3 & **L2**[**2**]	2,5 Hz

Tabelle 5.2: Zusammensetzung der Subtrigger S15 und S52 aus einzelnen Triggerelementen. Die Logischen Verknüpfungen UND und ODER sind durch & und | symbolisiert. Die Definition der Triggerelemente ist im Anhang beschrieben.

800 MeV (DCRPh_THig) sowie ein vom z-Vertextrigger rekonstruierter Vertex (zVtx_sig) verlangt. Ein neuronales Netz validiert die Triggerentscheidung auf der zweiten Triggerstufe L2 (L2[5]). Eine genauere Beschreibung der Triggerelemente befindet sich im Anhang.

S52 wird zum Triggern von elastischen J/Ψ-Photoproduktionsereignissen mit einem Zerfall in ein Elektron-Positron-Paar benutzt. Zur Selektion des Leptonpaars wird nach Energiedepositionen im Flüssig-Argon-Kalorimeter (LAr_BR) gesucht. Die zusätzlichen Spurbedingungen fordern im wesentlichen eine niedrige Multiplizität und mindestens eine negativ geladene Spur (DCRPh_TNeg). Dieses Subtriggerelement wird ebenfalls auf L2 von einem neuronalen Netz validiert (L2[2]).

Auf FTT-Niveau erreicht man eine Selektionseffizienz (siehe Formel 5.4) von etwa 95% [100]. Dabei sind die FTT-basierten Schnitte, $Cuts_{\mathrm{FTT}}$ etwas weniger restriktiv als die in der Offline-Analyse.

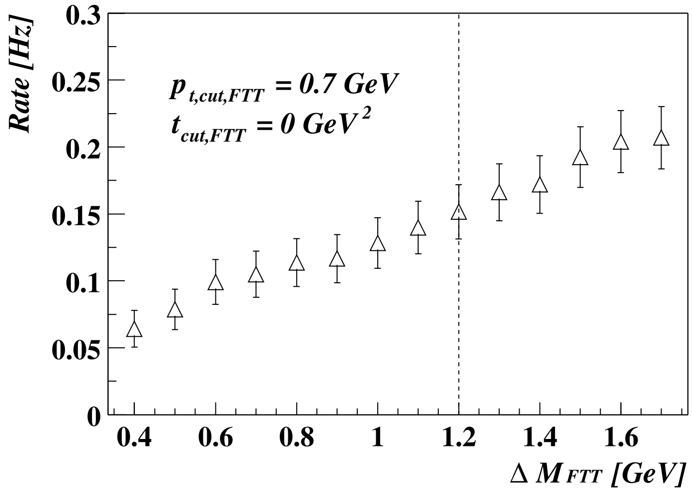


Abbildung 5.5: Eingangsrate des Subtriggerelements S15 in die vierte Triggerstufe in Abhängigkeit von der Breite des Massenintervalls ΔM_{ll}, in dem Ereigniskandidaten akzeptiert werden. Der Transversalimpuls beider Spuren muß mindestens $p_t > 0{,}7$ GeV betragen [100].

In Abbildung 5.5 ist die Eingangsrate von S15 in die vierte Triggerstufe $R_{\mathrm{S15,L4in}}$, berechnet nach Gleichung 5.5, als Funktion des FTT-Schnittparameters ΔM_{ll} dargestellt. Zur Bestimmung der Raten diente ein für das Jahr 2000 (HERA-I) typischer Run. Ein geeigneter Schnitt liegt bei $\Delta M_{ll} = 1{,}2\,\mathrm{GeV}$. Dieser Wert ist etwas weniger streng als ein typischer Schnitt in der Offline-

Analyse von $\Delta M_{ll}^{\text{offline}} = 1{,}1\,\text{GeV}$ [104]. Die Level-1-Rate von etwa 2 Hz (siehe Tabelle 5.2) wird um mehr als einen Faktor 10 reduziert. Dadurch bleibt $R_{\text{S15,L4in}}$ auch nach dem HERA-Upgrade unter 1 Hz, wenn man davon ausgeht, daß die Triggerraten sich im wesentlichen verhalten wie die erwartete Steigerung der Luminosität. Zum Vergleich sei noch erwähnt, daß zur Validierung von S15 im Jahr 2000 ein neuronales Netz zum Einsatz kam, das die Subtriggerrate etwa um einen Faktor 2 reduzieren konnte.

Auch zum Triggern von J/Ψ-Mesonen, die elastisch in Elektroproduktion ($Q^2 > 1\,\text{GeV}^2$) erzeugt werden, kann der FTT eingesetzt werden. Dadurch, daß auf der dritten Stufe des FTT auch die Daten des gestreuten Elektrons, wie es vom inklusiven Elektrontrigger des SpaCals gemessen wird, vorliegen, kann die Kinematik der Ereignisse komplett rekonstruiert werden. Die Rate des entsprechenden L1-Subtriggers kann bei sehr hoher Effizienz um den Faktor 100 reduziert werden. Ausführliche Informationen sind in [100] zu finden.

Bei der inelastischen J/Ψ-Produktion bleibt das Proton nicht intakt, so daß der hadronische Endzustand der Reaktion mehr als nur die Spuren der Zerfallsprodukte aus dem J/Ψ-Zerfall enthält. Mit steigender Spurmultiplizität steigt auch die Wahrscheinlichkeit, daß zwei Spuren zufällig eine invariante Masse besitzen, die im Massenfenster um die nominelle J/Ψ-Masse liegt. Wenn man für den Zerfall des J/Ψ-Mesons nur den Zerfall in Myonen betrachtet, kann die Information des Myontriggers benutzt werden, um die Zahl der Spuren zu reduzieren, die einen J/Ψ-Kandidaten formen können. Es konnte mit Hilfe von FTTEMU3 gezeigt werden, daß die Rate der Subtrigger, die zum Triggern von inelastisch produzierten J/Ψ-Mesonen benutzt werden, erheblich reduziert werden kann [105].

Selektion von D^*-Mesonen

Der in Kapitel 1.2.2 bereits diskutierte Zerfall $D^{*+} \to D^0 \pi^+_{\text{slow}} \to K^- \pi^+ \pi^+_{\text{slow}}$ (oder ladungskunjugiert) ist zur Beobachtung von offener Charm-Produktion besonders geeignet, da bei dieser Art der Selektion wenig Untergrund in das Datensample gelangt.

Für die D^*-Produktion in tiefinelastischer Streuung wurden die Subtriggerelemente S2 und S61 benutzt. Die genaue Zusammensetzung der Subtrigger ist in Tabelle 5.3 zu finden. Beide Subtrigger verlangen einen Elektronkandidaten im SpaCal ((`SPCLe_IET` | `SPCLe_IET_Cen`)), mindestens eine Spur in der zentralen Driftkammer mit $p_t > 800\,\text{MeV}$ (`DCRPh_THig`) und einen z-Vertex vom z-Vertextrigger (`zVtx_sig`). Die Subtrigger unterscheiden sich durch die Energieschwelle für das Elektron.

Zum Triggern von D^*-Produktion in Photoproduktion wurden die Subtrigger S83, S84 und S108 benutzt. Diese Subtrigger verlangen in der zentralen Driftkammer mindestens drei Spuren (`DCRPh_Tc`) und einen z-Vertex (`zVtx_sig`). Zusätzlich wird ein Signal in einem der Elektrontagger verlangt (`eTAG`), wobei die drei Subtrigger drei unterschiedlichen Taggern[1] zugeordnet sind. Die genaue Subtriggerdefinition ist in Tabelle 5.3 zu finden.

Zur D^*-Selektion in einer Analyse wird zunächst ein Spurpaar entgegengesetzter Ladung gesucht, dessen invariante Masse verträglich mit der nominellen D^0-Masse ist, indem man einen Schnitt in der Variablen $|m_{D^0} - m_{K,\pi}|$ macht. Davon ausgehend wird versucht, ein lang-

[1] Die Elektrontagger befanden sich im bei HERA-I bei 33 m, 44 m und 108 m.

Sub-trigger	Definition	$R_{\mathrm{ST,L1}}$ [Hz]
S2	(`SPCLe_IET` >1 | `SPCLe_IET_Cen_2`) & `DCRPh_THig` & `zVtx_sig`	8
S61	(`SPCLe_IET` >2 | `SPCLe_IET_Cen_3`) & `DCRPh_THig` & `zVtx_sig`	3,5
S83	`eTAG` & `zVtx_sig_1` & `DCRPh_Tc`	3,5
S84	`eTAG44` & `zVtx_sig_1` & `DCRPh_Tc`	10
S108	`eTAG8` & `zVtx_sig_1` & `DCRPh_Tc`	1

Tabelle 5.3: Definition der Subtrigger S2 und S61 zur Selektion von D^*-Produktion in DIS und Definition der Subtrigger S83, S84 und S108 zur Selektion von D^*-Produktion in Photoproduktion. Die Definition der Triggerelemente ist im Anhang beschrieben.

sames Pion π_{slow} zu finden, so daß die Kombination aus drei Spuren eine invariante Masse hat, die der nominellen D^*-Masse entspricht. Üblicherweise wird hierzu eine Differenz $\Delta M = m(K\pi\pi) - m(K\pi)$ betrachtet.

Die in [102] beschriebene Triggerstudie benutzt ebenfalls FTTEMU3 zur Simulation des FTT. Es wurden die Selektionsschnitte, die üblicherweise in einer Offline-Analyse durchgeführt werden, in etwas gelockerter Form auf die Spuren des FTT angewandt. Dazu wurden unterschiedliche Schnittszenerien (FTT1, FTT2, FTT3, FTT4) sowohl basierend auf den vollrekonstruierten Spuren als auch den FTT-Spuren durchgeführt. Die Schnitte, die auf die FTT-Spuren gemacht wurden, sind in Tabelle 5.4 aufgelistet.

Szenario	$p_t(D^*)$	$p_t(K,\pi)$	$\lvert m_{D^0} - m_{K,\pi}\rvert$	ΔM
FTT1	>1,2 GeV	>0,25 GeV	< 0,25 GeV	<0,18 GeV
FTT2	>1,8 GeV	>0,3 GeV	< 0,2 GeV	<0,18 GeV
FTT3	>2,2 GeV	>0,4 GeV	< 0,2 GeV	<0,17 GeV
FTT4	>4,5 GeV	>0,5 GeV	< 0,2 GeV	<0,17 GeV

Tabelle 5.4: Verschiedene Schnittszenarien, die auf FTT-Niveau zur Selektion von D^*-Ereignissen angewendet wurden [102].

Für alle untersuchten Subtrigger erreicht der FTT eine gute Selektionseffizienz von über 80%. Abbildung 5.6 zeigt die ermittelten Effizienzen sowohl für Datensätze in DIS (ST61) und Photoproduktion (ST83, ST84, ST108) als auch für vier entsprechende Monte-Carlo-Sample.

Ein Beispiel für die ΔM-Verteilung zeigt Abbildung 5.7. In Teil a) wurde nur der entsprechende Subtrigger verlangt. Teil b) zeigt die Verteilung, wenn man zuvor eine positive Triggerentscheidung des FTT verlangt hat. In beiden Fällen wurde ΔM mit den Spuren der Offline-Rekonstruktion berechnet.

Eine Übersicht über das Verhalten des Reduktionsfaktors gibt Tabelle 5.5. Mit dem FTT können die Eingangsraten in die vierte Triggerstufe leicht um einen Faktor 10 gesenkt werden. Bei schärferen FTT-Selektionsschnitten sind sogar Reduktionsfaktoren bis zu 100 möglich, wobei jedoch die Selektionseffizienz auf Werte im Bereich von 50% sinkt. Dazu ist jedoch zu beachten, daß die Alternative das Einführen von Prescale-Faktoren ist, und ein vergleichsweise niedriger Prescale-Faktor von 4 bereits ein Absinken der Effizienz auf 25% bedeutet.

Es sei noch hinzugefügt, daß auch untersucht wurde, ob es möglich ist, mit dem FTT einen "un-

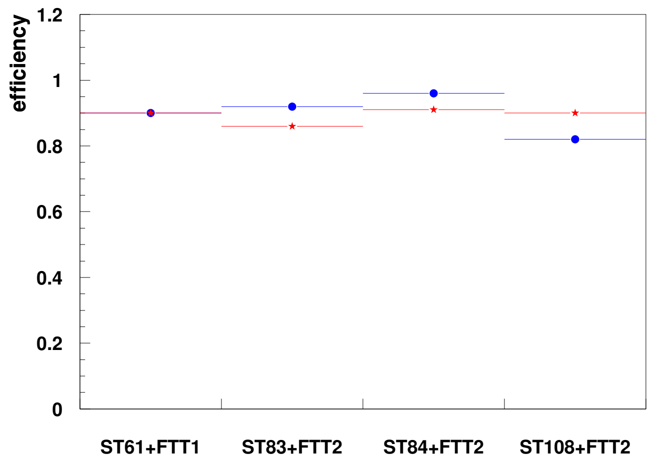


Abbildung 5.6: Selektionseffizienz des FTT für verschiedene Subtriggerelemente. Die Effizienz ist sowohl für Daten als auch für Monte-Carlo-Ereignisse über 80%. ST61 wird zum Triggern von D^*-Produktion in DIS benutzt. ST83, ST84 und ST108 triggern D^*-Produktion in Photoproduktion [102].

Subtrigger	$R_{\text{ST,L1}}$	$R^{\text{FTT1}}_{\text{ST,L4in}}$	$R^{\text{FTT2}}_{\text{ST,L4in}}$	$R^{\text{FTT3}}_{\text{ST,L4in}}$
S61	6 Hz	0,22 Hz	0,12 Hz	0,05 Hz
S83	12 Hz	0,65 Hz	0,2 Hz	0,07 Hz
S84	25 Hz	0,8 Hz	0,23 Hz	0,08 Hz
S108	12 Hz	0,83 Hz	0,33 Hz	0,17 Hz

Tabelle 5.5: Triggerraten für D^*-Produktion. S61 wird zum Triggern von D^*-Ereignissen in DIS benutzt, S83, S84 und S108 für D^*-Produktion in Photoproduktion.Die Level1 Rate stammt aus dem Jahr 2000. Es sind verschiedene FTT-Schnittszenarien untersucht worden [102].

tagged Photoproduktions-Trigger" für D^*-Mesonen zu konzipieren [102], das heißt, daß zur Triggerentscheidung nur die Spurtrigger im Zentraldetektor benutzt werden und kein Signal in einem der Tagger verlangt wird. Die L1-Rate ist jedoch mit 1 kHz sehr hoch. Mit dem FTT gelingt es, die Rate deutlich zu reduzieren. Bei einem moderaten Schnitt auf den Transversalimpuls der D^*-Mesonen $p_t(D^*) > 1{,}5\,\text{GeV}$ wird die Rate um etwa einen Faktor 30 reduziert, die dann jedoch noch immer deutlich zu hoch liegt. Erst bei ein scharfen Schnitt von $p_t(D^*) > 4{,}5\,\text{GeV}$ kann die Zahl der Ereigniskandidaten und damit die L4-Eingangsrate auf ein akzeptablen Wert von etwa 2 Hz gesenkt werden. Da das p_t-Spektrum der D^*-Mesonen jedoch schnell abfällt, wird durch den harten Schnitt etwa 90% des Signals entfernt.

Auch über den Bereich der Produktion von schweren Quarks hinaus kann der FTT die Triggermöglichkeiten verbessern. In weiteren Studien, die alle ebenfalls das in Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm FTTEMU3 verwendet haben, konnten gezeigt werden, daß es Potential gibt, den FTT beim Triggern von Ereignissen des geladenen Stroms [103] und Ereignissen mit Jets [106, 107] zur Ratenreduktion einzusetzen.

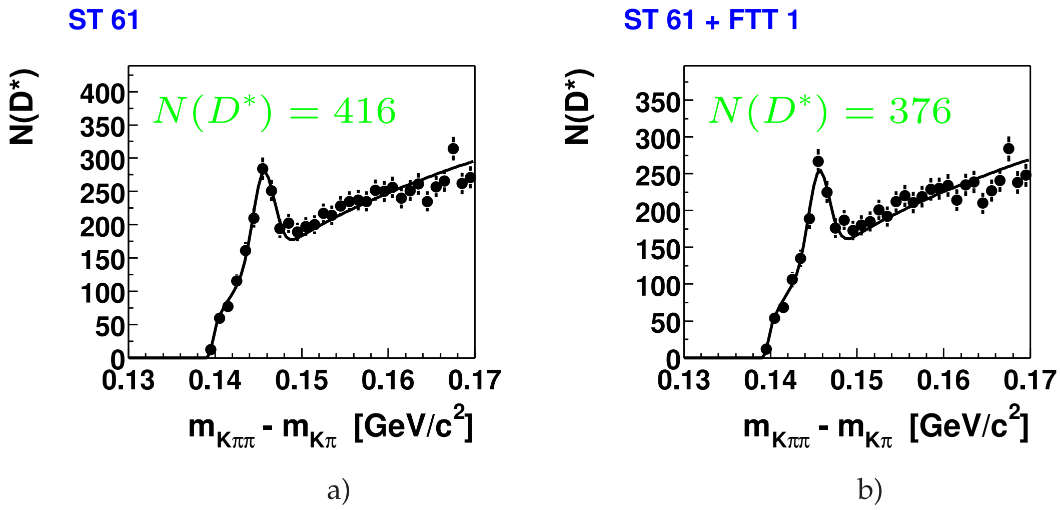


Abbildung 5.7: Massendifferenz $m(K\pi\pi) - m(K\pi)$ berechnet mit voll rekonstruierten Spuren. a) für Ereignisse, in den denen S61 gesetzt war und b) für Ereignisse, die zusätzlich die Selektion FTT1 erfüllen [102].

5.3 FTTEMU Version 4

Die Version 4 von FTTEMU stellt eine komplette Neuimplementierung der FTT-Simulation dar. Bei dieser Version wurde Wert darauf gelegt, die Simulation möglichst nah an der Hardwarerealisation zu orientieren. Wenn möglich, soll in der Simulation derselbe Programmcode laufen wie in der Hardware des FTT. Diese Zielsetzung kann für die höheren Triggerlevel relativ gut erfüllt werden, da die PowerPC-Karten und die DSPs[2] auf den Multi-Purpose-Boards auf der dritten beziehungsweise zweiten Stufe in der Programmiersprache C programmiert werden können. Für die zahlreichen FPGAs[3] der FTT-Elektronik wurde versucht, die FPGA-Algorithmen so gut wie möglich in C nachzubilden. Daher wurde entschieden, FTTEMU4 komplett in C zu implementieren. In der aktuellen Version umfaßt das Paket etwa 14 000 Zeilen Code.

Eine weitere Anforderung an FTTEMU4 war eine Modularisierung, die sich am Aufbau der Hardware orientiert. Dadurch ist es möglich, jeden Schritt in der langen Kette der Algorithmen einzeln zu verifizieren. Zu diesem Zweck gibt es für den FTT ein umfassendes Schema von BOS-Banken, die einerseits von der FTT-Simulation erzeugt oder aus der realen Hardware ausgelesen werden können. In den Abbildungen 5.8 und 5.12 ist dieses komplexe Schema dargestellt. Der Datentransfer zwischen den einzelnen Modulen von FTTEMU4 erfolgt ausschließlich über BOS-Banken. Außerdem dürfen Banken einzelner Module nur Informationen enthalten, die von der entsprechenden Hardwarekomponente ausgelesen werden können.

Im Konzept von FTTEMU ist weiterhin vorgesehen, daß das Programm in einem "Verifikations-Modus" läuft. Dieser kann genutzt werden, um reale Daten des FTT zu prüfen. Dazu wird selektiv ein Programmodul von FTTEMU mit Daten aus dem Detektor ausgeführt

[2] **D**igitaler **S**ignal **P**rozessor, siehe auch Kapitel 6.1.2
[3] **F**ield **P**rogramable **G**ate **A**rray, siehe auch Kapitel 6.1.1

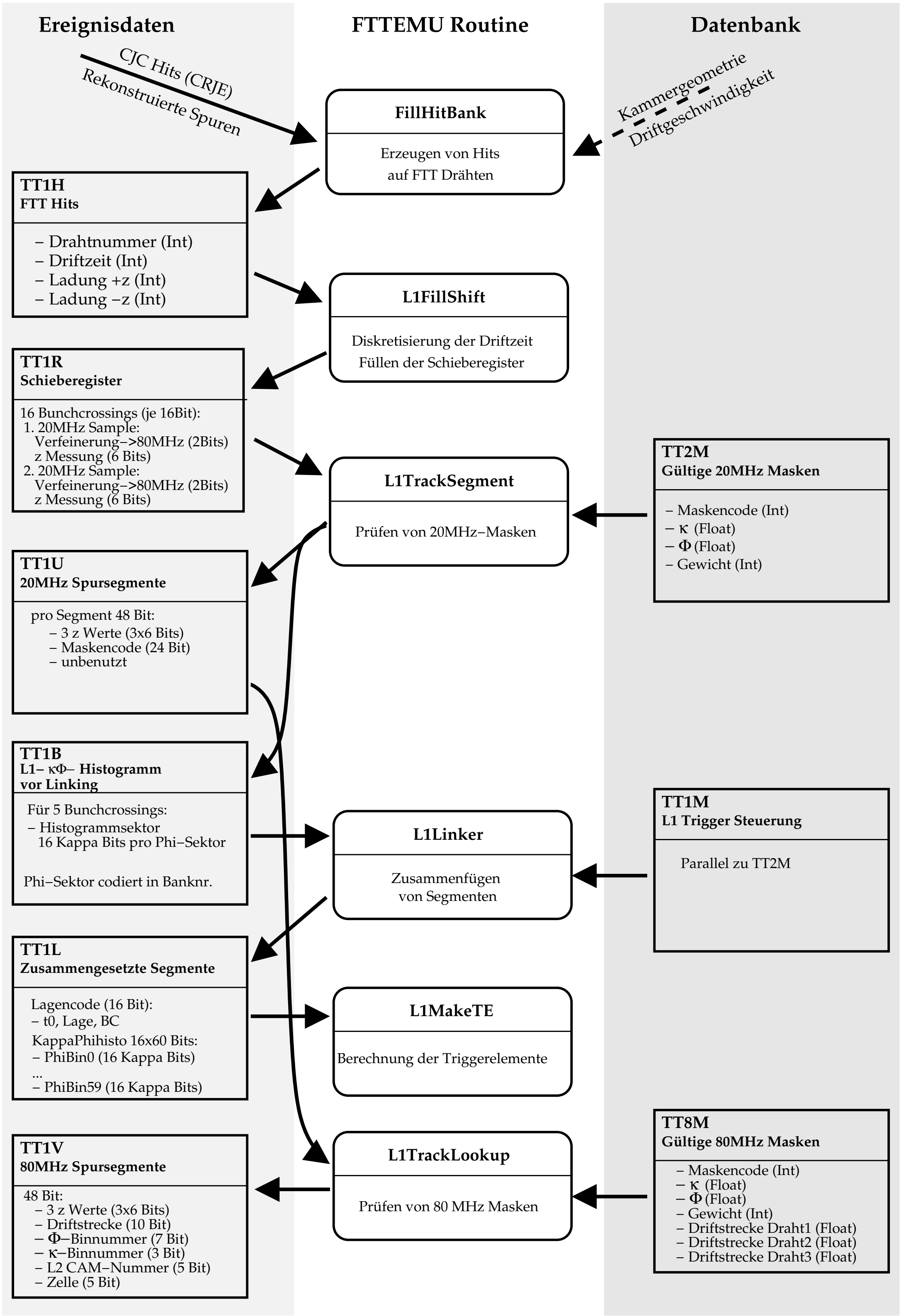


Abbildung 5.8: Programmablauf vom L1-Teil von FTTEMU. Beschreibung siehe Text.

und das Ergebnis der Simulation in eine BOS-Bank geschrieben. Dabei bleibt die Bank, die aus dem Experiment ausgelesen wurde, erhalten, was einen bequemen Vergleich zwischen Simulation und real im FTT berechneten Ergebnissen ermöglicht.

5.3.1 Erzeugung von Hits

Die Simulation startet ausgehend von Treffern (Hits) auf ausgewählten Drahtlagen der zentralen Spurkammer. Diese FTT-Hits können in der Simulation auf zweierlei Möglichkeiten erzeugt werden.

Die erste Methode geht davon aus, daß die Hits aus dem Standard-Readout der zentralen Spurkammer vorliegen. Hits, die auf vom FTT benutzten Drähten liegen, werden kopiert und als Eingangsinformationen für FTTEMU gespeichert (TT1H-Bank). Diese Methode hat zwei Nachteile: Die üblicherweise zur Analyse benutzten sogenannten DSTs enthalten die einzelnen Hits nicht mehr. Die vollständigen Daten, die auch die einzelnen Hits enthalten, sind meist nur über einen Bandroboter verfügbar, und der Zugriff ist langsam und unbequem. Ein weiterer Nachteil, einfach die Hits zu kopieren, liegt in der relativ hohen Ausleseschwelle, mit der die Hits der Spurkammer ausgelesen werden. Da die Spurtriggersysteme, sowohl der existierende DC$R\Phi$-Trigger sowie der FTT, eigene Hardware besitzen, um das analoge Signal zu digitalisieren, kann die Ausleseschwelle niedriger sein. In der Vergangenheit lag die Einzelhiteffizienz für das Standard-Readout bei 85% bis 90%, während man für den DC$R\Phi$-Trigger durch Wahl einer niedrigeren Schwelle eine Einzelhiteffizienz von etwa 95% erreicht [108]. Es ist daher zu erwarten, daß der FTT mit einer vergleichbaren Einzelhiteffizienz betrieben werden kann.

Beide genannten Schwächen können mit der zweiten in FTTEMU4 implementierten Methode umgangen werden. Bei dieser Methode werden aus den Spurparametern der rekonstruierten Spuren, die bequem von den DSTs gelesen werden können, die erwarteten Treffer berechnet. Von den erwarteten Treffern kann wegen der limitierten Einzelhiteffizenz ein einstellbarer Teil wieder verworfen werden. Zusätzlich werden die so berechneten Treffer noch künstlich verschmiert, da die Einzelhitauflösung der Spurkammer in der $r\Phi$-Ebene auf etwa 170 µm beschränkt ist. Die hohe Qualität dieser Methode zeigt Abbildung 5.9. Hier wurden Hits, die für den FTT aus den Spurparametern “zurück bestimmt” wurden, mit Hits verglichen, die im Standard-Readout bestimmt wurden. An die Punkte wurde eine Gaussverteilung angepaßt. Die Breite von 210 µm entspricht etwa der Erwartung, wenn man bedenkt, daß die echten Hits mit einer Genauigkeit von etwa 170 µm gemessen werden können und die zurück berechneten Hits von FTTEMU um 150 µm verschmiert werden.

Bei der “Zurückberechnung” der erwarteten z-Koordinate eines Hits wird wegen der erheblich schlechteren Auflösung in dieser Koordinate um mehrere Zentimeter gaussisch verschmiert. Der genaue Wert kann in Form eines Parameters in FTTEMU eingestellt werden. Durch Invertieren von Gleichung 4.2 wird für jedes Drahtende eine Ladungsmenge berechnet, die in der TT1H-Bank abgelegt wird. In Abbildung 5.10a ist der Abstand eines zurückberechneten Hits mit verschmierter z-Position von seiner erwarteten exakten Position gezeigt. Die Breite der angepaßten Gausskurve von 7,2 cm reproduziert den eingestellten Auflösungsparameter von 7,0 cm.

Die Verteilung des Abstandes mit dem Standard-Readout gemessener Hits von der rekonstru-

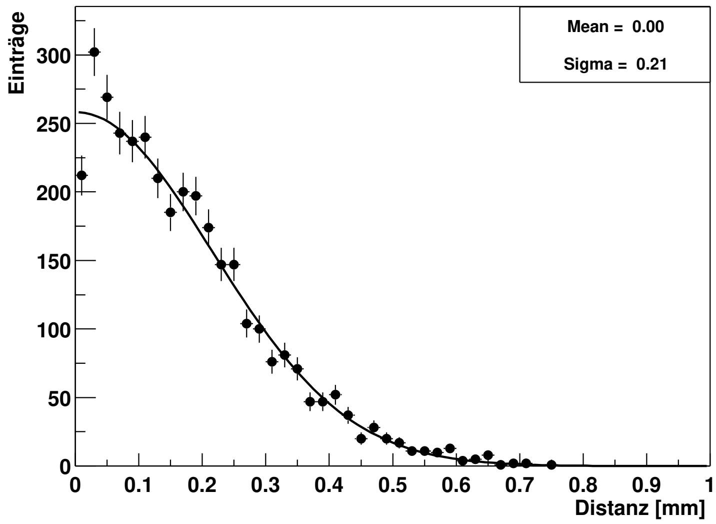


Abbildung 5.9: Abstand zwischen zurück berechneten Hits und echten Hits aus dem Standard-Readout in der $r\Phi$-Ebene.

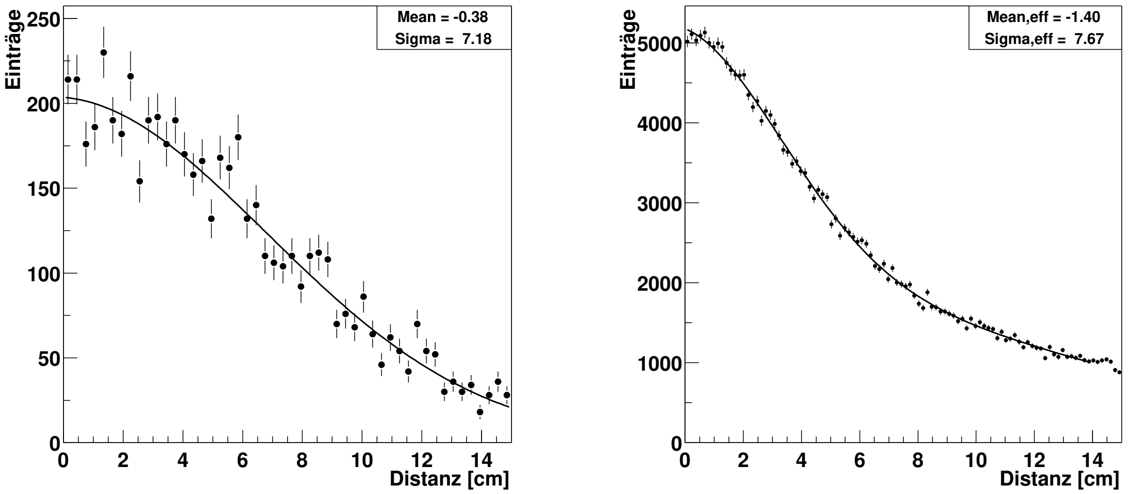
ierten Spur ist in Abbildung 5.10b dargestellt. Wegen mehrerer sich überlagernder Effekte ist die Verteilung nicht gaussisch. Ein Effekt ist etwa die zum Teil stark variierende Ladung, die auf dem Draht deponiert wird. Nur wenn an beiden Drahtenden die Pulshöhe im optimalen Bereich der ADCs liegt, kann die z-Koordinate gut, das heißt mit einer Auflösung von etwa 3,5 cm [109], gemessen werden.

An die gezeigte Verteilung läßt sich jedoch die Summe zweier Gaussfunktionen, siehe Formel 5.1, anpassen. Die amplitudengewichtete Breite (Gleichung 5.2) liegt bei 7,7 cm. Berechnet man die effektive Breite nach Formel 5.3 erhält man einen Wert von 10,3 cm. Da es in FTTEMU für die z-Auflösung nur einen Parameter gibt, der unabhängig von der Ladung ist, werden konservative Werte zwischen 6 und 9 cm benutzt. In diesem Bereich ist der Einfluß auf die Messung des Winkels Θ klein.

Seit einiger Zeit existiert für die zentralen Driftkammern eine vollständige Analogsimulation [110], bei der die auf dem Draht deponierte Ladung direkt aus Ionisation der Teilchen unter Berücksichtigung vieler Effekte bestimmt wird. Dieses verbesserte Verfahren, das bereits in die Detektorsimulation `H1SIM` aufgenommen worden ist, soll auch für den FTT genutzt werden. Dafür sind die Parameter der FTT-Elektronik, die die Digitalisierung vornimmt, zu bestimmen und in die Simulation zu integrieren.

5.3.2 Spursegmentbildung aus Schieberegistereinträgen

Die Hits werden diskretisiert und in die Schieberegister eingefüllt. Diese Prozedur wird mit zwei Granularitäten durchgeführt. Für die spätere zweite Triggerstufe werden die Hits mit einer Frequenz von 80 MHz diskretisiert, was einer Intervallgröße von 12,5 ns entspricht. Für die erste Stufe beträgt die Intervallänge 50 ns entsprechend einer Frequenz von 20 MHz. Die



a) b)

Abbildung 5.10: Abstand der Hits von ihrer erwarteten Position auf der z-Achse. Im Fall a) für Hits, die aus den Spurparametern generiert wurden und künstlich verschmiert wurden. Für b) wurde der Abstand gemessener Hits von der rekonstruierten Spur aufgetragen.

maximale Dirftzeit beträgt etwas mehr als 1,1 µs. Daher können bis zu 12 Bunchcrossings vergehen bevor ein Signal am Draht gemessen werden kann. Abbildung 5.11 zeigt wie die Schieberegister aus verschiedenen Bunchcrossings bzw. aus 100 ns-Zeitintervallen aufgebaut werden. Pro Bunchcrossing werden zwei 20 MHz-Diskretisierungszyklen und acht 80 MHz-Diskretisierungen durchgeführt. Da der *Qt*-Algorithmus so programmiert ist, daß nach einem gefunden Treffer mindestens 50 ns bis zum nächsten möglichen Treffer vergehen, kann es pro 20 MHz-Zyklus höchstens einen 80 MHz-Treffer geben. Dadurch kann der Zusammenhang zwischen 20- und 80 MHz-Registereinträgen mit 2 Bits codiert werden.

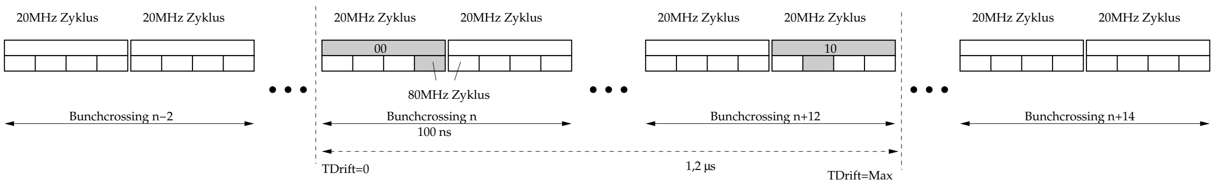


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Schieberegister des FTT. Pro Bunchcrossing werden zwei 20 MHz-Samples erzeugt. Zusätzlich wird jeweils ein verfeinerter 80 MHz-Hit gespeichert. Insgesamt werden 16 Bunchcrossings gespeichert. Zur Vereinfachung ist die Dauer eines Bunchcrossings mit 100 ns eingezeichnet.

Weil bei der Inbetriebnahme des Triggers damit zu rechnen ist, daß das Timing vieler Komponenten noch nicht optimiert ist, werden mehr als 12 Bunchcrossings zur Bildung der Schieberegister ausgewertet. Die Schieberegister werden in der TT1R-Bank abgespeichert. Neben den Schieberegistereinträgen für die Driftzeit, werden auch 6 Bits für die z-Messung in dieser Bank abgelegt.

Die Muster in den Schieberegistern werden mit gültigen 20 MHz-Mustern, die zuvor berechnet wurden und in der TT2M-Bank gespeichert sind, verglichen. Diese zuvor berechneten Muster werden auch als Masken bezeichnet. Zum Vergleich zwischen Schieberegisterinhalt und Maske werden die Einträge in den Schieberegistern in Maskencodes umgerechnet. Die Vorschriften für die Umrechnung sind in Abschnitt 5.4 zu finden. Da die 20 MHz-Masken in der totzeitfreien Phase vor dem `L1Keep`-Signal gesucht werden, ist das Bunchcrossing mit dem Ereigniszeitnullpunkt nicht bekannt. In der Simulation werden deshalb die Muster in den 20 MHz-Schieberegistern für jede t_0-Hypothese um zwei Bins[4] weiter geschoben und der Vergleich mit den Masken erneut durchgeführt. Gültige Maskencodes werden zusammen mit den z-Werten in der TT1U-Bank abgelegt und dem L1-Linkalgorithmus zur Verfügung gestellt. Die Segmente werden dort in einem 16×60 großen κ-Φ-Histogramm gespeichert. Die Granularität dieses Histogramms ist wegen der geringen Auflösung der 20 MHz-Segmente gröber als das Histogramm für den L2-Linker (siehe 4.3.3). Mit einem Linkalgorithmus, der dem zweiten Stufe sehr ähnlich ist, werden Spursegmente aus verschiedenen Triggerlagen zusammengefügt. Das Histogramm wird über fünf Bunchcrossings (-2,-1,0,1,2) in der TT1B-Bank gespeichert. Da das Bunchcrossing, in dem die Wechselwirkung stattgefunden hat, nach wie vor nicht bekannt ist, muß das Histogramm für mehrere Hypothesen ausgewertet werden. Für die Hypothese mit dem korrekten Bunchcrossing werden vom Linkalgorithmus die meisten Spuren gefunden, wodurch vom FTT eine positive Triggerentscheidung generiert werden kann. Das κ-Φ-Histogramm mit den zusammengefügten Segmenten wird in der TT1L-Bank für fünf Bunchcrossings (-2,-1,0,1,2) abgelegt. Eine detailierte Beschreibung des L1-Triggeralgorithmus ist in [111] zu finden.

Durch eine Analyse des κ-Φ-Histogramms können mehrere Triggerelemente berechnet werden. Mögliche FTT-L1-Triggerelemente sind in Tabelle 4.2, in Kapitel 4.1 aufgelistet.

Aus den 20 MHz-Schieberegistern werden für die zweite Stufe die Schieberegister mit der vollen 80 MHz-Auflösung hergestellt. Durch Vergleich mit allen gültigen Masken, die in der TT8M-Bank gespeichert sind, werden die Spursegmentparameter κ-Bin, Φ-Bin, CAM-Nummer und Driftstrecke ermittelt. Die Codierung in dieser Form ist durch die Struktur der Algorithmen der zweiten Stufe motiviert. Diese Spursegmente werden in der TT1V-Bank gespeichert.

5.3.3 Zusammenfügen von Spursegmenten

Der Ablauf der Simulation der zweiten Stufe des ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Zunächst werden die auf L1 gefundenen Spursegmente gelesen und in eine Bank für ungelinkte L2-Spursegmente geschrieben (TT2U-Bank). Hierbei wird berücksichtigt, daß nur bis zu 128 Spursegmente pro Triggerlage zwischen der ersten und der zweiten Stufe übertragen werden können. Die Parameter eines Segments sind eng an den Linkalgorithmus (siehe Kapitel 4.3.3) angelehnt. Die eigentlichen Werte für κ und Φ werden über eine Binnummer für κ $(0 \dots 7)$, Φ $(0 \dots 127)$ und CAM $(0 \dots 24)$ kodiert (vergleiche auch Abbildung 4.9). Φ und κ werden fol-

[4]Pro Bunchcrossing werden zwei Digitalisierungen mit 20 MHz durchgeführt.

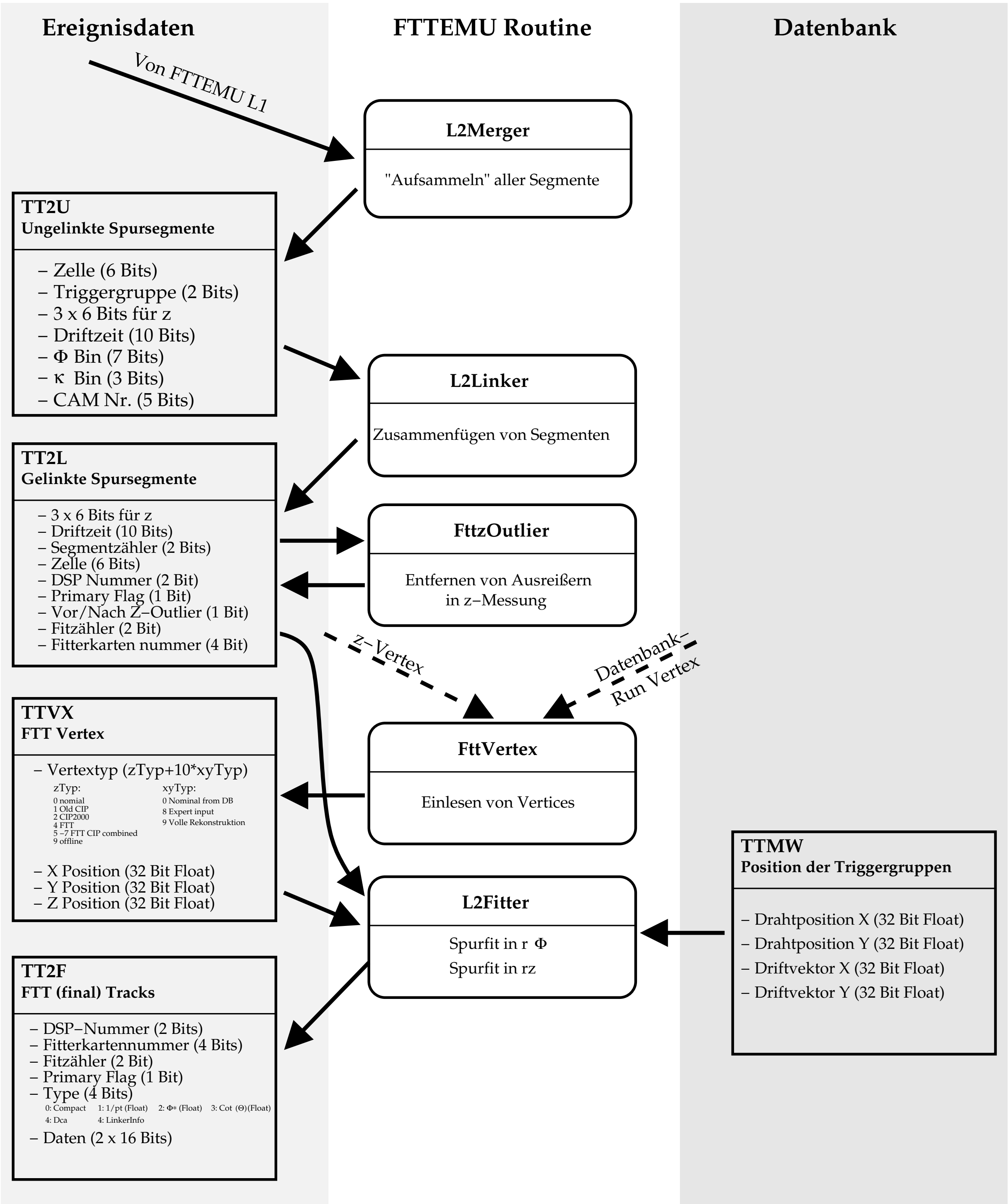


Abbildung 5.12: Programmablauf des L2-Teils von FTTEMU4. Beschreibung siehe Text.

gendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned}
\Phi &= BinSize_{\Phi} \cdot \left(\Phi_i + \frac{0{,}5 + CAM_k \bmod SubArraySize}{SubArraySize} \right) \\
\kappa &= \kappa_{Min} + BinSize_{\kappa} \cdot \left(\kappa_j + \frac{0{,}5 + \frac{CAM_k}{SubArraySize}}{SubArraySize} \right) ,
\end{aligned} \tag{5.6}$$

mit

$$\begin{aligned}
BinSize_{\Phi} &= \frac{2\pi}{128} \approx 0{,}049 \\
BinSize_{\kappa} &= \frac{\kappa_{\text{Max}} - \kappa_{\text{Min}}}{8} = 0{,}00865\,\text{cm}^{-1} \\
SubArraySize &= 5 \\
-\kappa_{\text{Max}} = \kappa_{Min} &= 0{,}0345\,\text{cm}^{-1} \;\; (\text{da } p_{t,\text{Min}} = 0{,}1\,\text{GeV}) \\
\Phi_i &: \Phi\text{-Bin } (0 \leq i \leq 127) \\
\kappa_j &: \kappa\text{-Bin } (0 \leq j \leq 7) \\
CAM_k &: \text{CAM-Nummer } (0 \leq k \leq 24)
\end{aligned}$$

Der Winkel Φ wird dabei bei $r = 16{,}5\,\text{cm}$ gemessen und nicht am Vertex. Damit sich ein Meßfehler in κ möglichst wenig auf Φ auswirkt, sollte Φ bei $\frac{1}{2} r_{\text{Tiggergruppe}}$ gemessen werden. Studien haben gezeigt, daß $r = 16{,}5\,\text{cm}$ ein guter Kompromiß für alle vier Gruppen ist.

Der in Kapitel 4.3.3 beschriebene Linkalgorithmus ist in FTTEMU detailliert implementiert. Viele Besonderheiten, die bei der Programmierung des Algorithmus auf einem FPGA beachtet werden müssen, sind in FTTEMU berücksichtigt worden. Deshalb wird neben dem Linken der Segmente in dieser Routine simuliert, an welchen DSP zusammengefügte Segmente geschickt werden. Diese Information wird in den Größen DSP-Nummer $(0 \ldots 4)$, Fitter-Karten-Nummer $(0 \ldots 6)$ und Fit-Zähler (2 Bits)[5] abgelegt. Als Option ist bereits vorgesehen, daß auch Spuren, die von einem sekundären Vertex kommen, gelinkt werden können. Die Spursegmente werden in der TT2L-Bank abgespeichert.

Die Spurparameter zusammengefügter Spursegmente liegen schon dicht an den Werten, die die volle Rekonstruktion errechnet. Abbildung 5.13 zeigt die Auflösung der einzelnen Spursegmente im Vergleich zur vollen Rekonstruktion. Die Auflösung in Φ beträgt etwa 16 mrad und für den (inversen) Transversalimpuls erhält man etwa $\sigma_{1/p_t} \approx 0{,}4\,\text{GeV}^{-1}$. Die Verteilung von Φ_{Segment} entspricht nicht ganz der Erwartung eines klaren Maximums bei 0. Erste systematische Studien der FTT-Kalibration haben ergeben, daß die Auflösung in Φ am empfindlichsten auf Änderungen in der Kalibration reagiert [113]. Insbesondere Veränderungen der Vertexposition machen sich hier als erstes bemerkbar. Offenbar ist die Kalibration der Masken noch nicht optimal.

[5] Diese Größen sind durch Hardwarerealisierung (siehe Kapitel 6) motiviert.

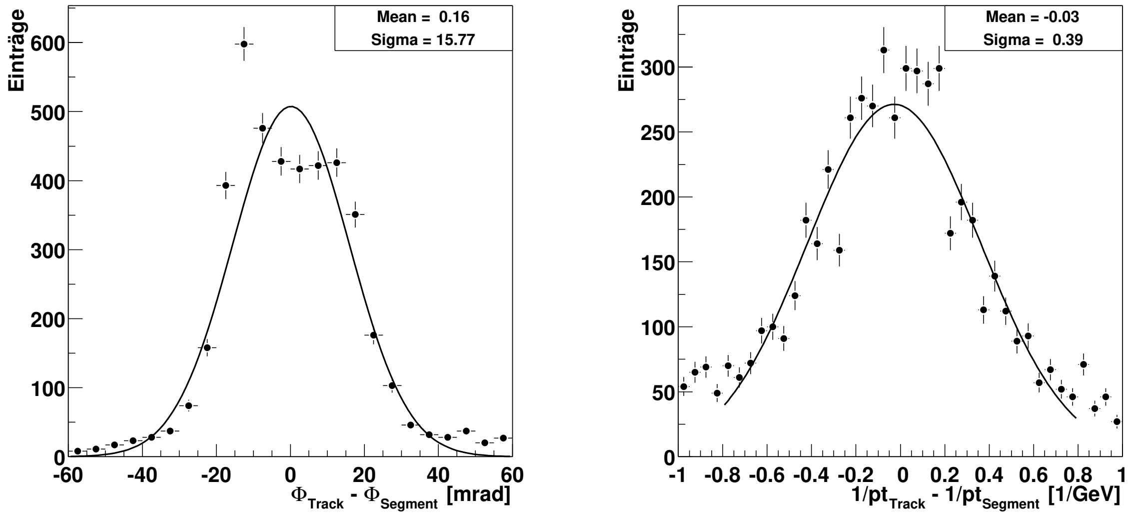


Abbildung 5.13: Auflösung von Spursegmenten, die zu einer Spur zusammengefügt worden sind, im Vergleich zur vollen Rekonstruktion. Die Auflösung in Φ beträgt etwa 16 mrad und die in $1/p_t$ etwa 0,4 GeV^{-1}.

5.3.4 z-Outlier-Rejection

Vor den Fitalgorithmen werden noch Ausreißer in z entfernt (Outlier-Rejection). Wegen der vergleichsweise schlechten Auflösung in z können einzelne Meßpunkte erheblich vom wahren Verlauf der Spur abweichen. Gelingt es solche Ausreißer zu entfernen, ist das Ergebnis des Fits wesentlich besser. Üblicherweise wird hierzu zunächst der rz-Fit mit allen Meßpunkten durchgeführt. Datenpunkte, die weit von der errechneten Spur entfernt liegen, werden vom Fit ausgeschlossen und der Fit wiederholt, wobei sich die Präzision meist deutlich verbessert.

Auf Triggerniveau kann ein so aufwendiger Algorithmus für die Outlier-Rejection nicht durchgeführt werden. Daher wird eine besonders einfacher Algorithmus verwendet. Bei der Methode des “First View” werden nur die drei z-Werte einer Triggergruppe betrachtet. Weicht einer der Meßpunkte weiter vom Mittelwert ab als ein Schnittparameter, so wird dieser Meßpunkt verworfen. Mit der “First View”-Methode, die leicht auch in einem programmierbaren elektronischem Bauteil realisiert werden kann, ist bereits eine deutliche Verbesserung der z-Messung möglich [99].

5.3.5 Spurfit

Obwohl die Spurparameter der einzelnen Spursegmente schon eine recht gute Auflösung haben, kann diese noch erheblich gesteigert werden, indem Spurfitalgorithmen auf die Raumpunkte angewendet werden, die durch die Spursegmente und den Vertex gegeben sind. In einer zwei Schritte umfassenden Prozedur wird zunächst in der xy-Ebene ein Kreis angepaßt. Anschließend wird die Steigung einer Ausgleichsgeraden im rs-Diagramm ermittelt, wobei s die Spurlänge bis zum Meßpunkt ist. Die Algorithmen sind in Kapitel 4.3.4 beschrieben.

Der Kreisfitalgorithmus erwartet als Eingabeparameter Wertepaare x_i, y_i. Im Falle des FTT sind das die Koordinaten von zwei bis vier zusammengehörigen Spursegmenten und die Koordinaten des Ereignisvertex. Letztere variieren nur geringfügig und werden deshalb aus einer Datenbank entnommen und nicht für jedes Ereignis neu berechnet. Zu Testzwecken können in der Simulation auch andere Quellen für die Vertexposition in der xy-Ebene gewählt werden.

Die Ortskoordinaten der Spursegmente werden aus der Zellnummer, der Triggergruppe und der Driftstrecke (s_{Drift}) berechnet, die aus der TT2L-Bank gelesen werden. Zusätzlich müssen die Ortskoordinaten aller 150 Triggergruppen und die zugehörigen Driftvektoren bekannt sein. Diese Kalibrationsdaten (TTMW-Bank) werden einer Datenbank entnommen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß diese Kalibrationsdaten und die Masken, die die Segmente validieren, konsistent sind. Daher wird die TTMW-Bank parallel erzeugt, wenn ein Satz von gültigen Masken generiert wird. Die Ortskoordinaten eines Spursegments werden dann wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} x &= x_{\mathrm{Triggergruppe}} + (s_{\mathrm{Drift}} - 512) \cdot V_{x,\mathrm{Drift}} \cdot 120\,\mu\mathrm{m} \\ y &= y_{\mathrm{Triggergruppe}} + (s_{\mathrm{Drift}} - 512) \cdot V_{y,\mathrm{Drift}} \cdot 120\,\mu\mathrm{m} \end{aligned} \tag{5.7}$$

Die Koordinaten $x_{\mathrm{Triggergruppe}}$, $x_{\mathrm{Triggergruppe}}$ sind durch den mittleren Draht einer Triggergruppe geben. Die Einheit der Driftvektorkomponenten $V_{x,y}$ wurde so gewählt, daß mit den zur Verfügung stehenden 10 Bits ($2^{10} = 1024$) die maximale Driftstrecke abgedeckt wird.

Das Ergebnis des Kreisfits sind die Krümmung κ sowie Informationen über den Polarwinkel Φ. Statt der zur Berechnung der transversalen Impulskomponenten p_x und p_y benötigten Werte $\sin(\Phi)$ und $\cos(\Phi)$ wird für den FTT eine spezielle Variable $\Phi^\star$ berechnet. Dabei wird der Einheitskreis $\Phi \in [0, 2\pi]$ auf ein Oktagon mit der Kantenlänge 1 abgebildet $\Phi^\star \in [0, 8]$ (siehe auch Figure 5.14).

$$\Phi^\star = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sin(\Phi), & \Phi \in [0, \frac{1}{4}\pi] \\ 2 - \sqrt{2} \cdot \cos(\Phi), & \Phi \in]\frac{1}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi] \\ 4 - \sqrt{2} \cdot \sin(\Phi), & \Phi \in]\frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi] \\ 6 + \sqrt{2} \cdot \cos(\Phi), & \Phi \in]\frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi] \\ 8 + \sqrt{2} \cdot \sin(\Phi), & \Phi \in]\frac{7}{4}\pi, 2\pi[\end{cases} \tag{5.8}$$

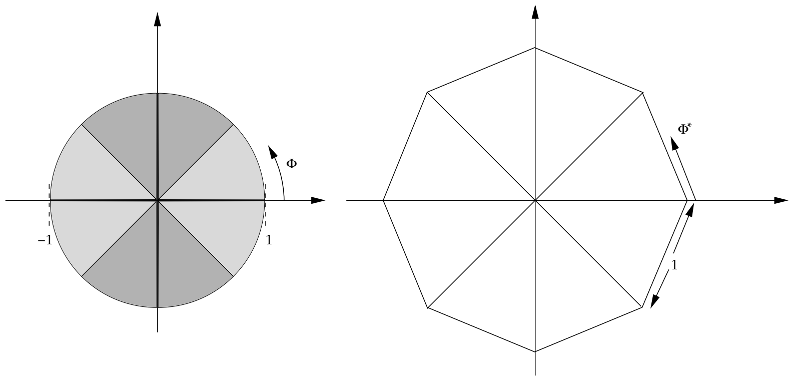


Abbildung 5.14: Transformation Φ nach $\Phi^\star$: Der Einheitskreis wird auf ein Oktagon mit der Kantenlänge 1 transformiert.

Zur Berechnung von Φ kann das Invertieren von Gleichung 5.8 vermieden werden, wenn eine Näherung ausreichend ist, denn es gilt: $\Phi \approx \frac{\pi}{4}\Phi^\star$. Figur 5.15 zeigt, daß die Größen Φ und $\frac{\pi}{4}\Phi^\star$ eindeutig korreliert sind und der Zusammenhang nahezu eine Gerade darstellt.

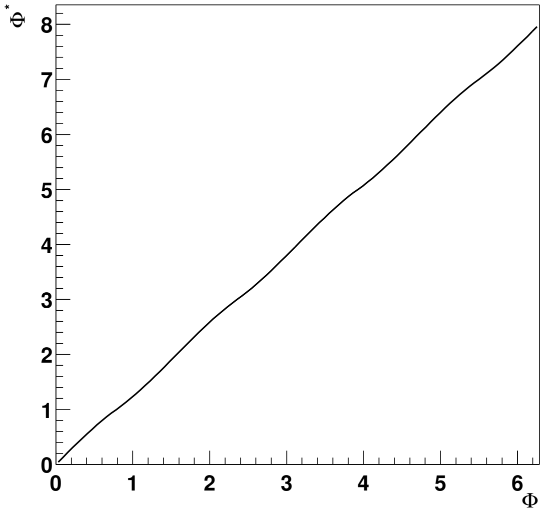


Abbildung 5.15: $\Phi^\star$ als Funktion von Φ. Der Zusammenhang ist näherungsweise linear.

Zur Berechnung des Polarwinkels Θ wird außer den z-Meßpunkten der einzelnen Drähte der Triggergruppen noch ein Wert für die z-Position des Ereignisvertex benötigt. Die Streuung der z-Position ist erheblich. Daher muß sie in jedem Ereignis bestimmt werden. In FTTEMU sind zahlreiche Quellen für diesen Wert vorgesehen. Die bisher gebräuchlichste Option benutzt den z-Wert des z-Vertextriggers, wie er bei HERA-I in Betrieb war. Vorgesehen ist auch die Möglichkeit, daß der FTT selbst einen Wert für z_{Vertex} berechnet. Die Algorithmen aus einer vielversprechenden Studie [112] sollen in eine der nächsten Versionen von FTTEMU integriert werden.

Zur Bestimmung des Polarwinkels Θ wird im sz-Raum eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. s ist dabei die Spurlänge vom Vertex bis zum Spursegment. Pro Segment werden bis zu drei Werte für z in den Fit einbezogen. Als Ergebnis wird $\cot(\Theta)$ berechnet, da dieser Wert zur Bestimmung der longitudinalen Impulskomponente p_z benutzt wird

Die erwähnten Ergebnisse des Spurfits werden in der TT2F-Bank gespeichert. Die Krümmung κ wird noch über die Beziehung[6] $\frac{1}{p_t[\text{GeV}]} = \frac{\kappa[\text{cm}^{-1}]}{0{,}00029979 \cdot B_z[\text{kG}]}$ in den inversen Transversalimpuls umgerechnet. Weiterhin werden Informationen über die Zahl der gelinkten Segmente und die Zahl der benutzten z-Meßpunkte in einem Wort kodiert.

Die drei Werte, p_t, $\Phi^\star$ und $\cot(\Theta)$ werden zusätzlich noch in einen "32-Bit-Compact-Word" zusammengefaßt. Dabei werden die Bits folgendermaßen verteilt:

Bits	0 ... 8	9 ... 18	19 ... 28	29 ... 31
Belegung	$\cot(\Theta)$	$1/p_t$	$\Phi^\star$	Oktand

[6]Vergleiche Formel 4.1, hier jedoch in den Einheiten, die im H1-Rekonstruktionsprogramm verwendet werden.

Diese Darstellung hat den Vorteil, daß deutlich weniger Daten übertragen werden müssen, ohne jedoch wesentliche Informationen zu verlieren. Nachteilig für den realen Betrieb des Triggers ist der Rechenaufwand, der entsteht, um die drei Variablen ins Compact-Word zu schreiben. In welcher Form die Daten letztlich versendet werden, muß durch Tests mit der realen Hardware entschieden werden.

Die Qualität der Spurrekonstruktion, wie sie mit FTTEMU4 simuliert wird, ist anhand von zwei Beispielen in Abbildung 5.16 gezeigt. An die Punkte wurde die Summe zweier Gaussfunktionen (siehe Formel 5.1) angepaßt. Die Abbildungen in der linken Spalte wurden mit Daten erstellt, die etwa 200 selektierte D^*-Zerfälle [114] enthalten, die in der Datennahmeperiode 1997 aufgezeichnet wurden. Für die Abbildung in der rechten Spalte wurde ein Monte-Carlo-Datensatz, der J/Ψ-Zerfälle in zwei Myonen enthält, verwendet. Die Ereignistopologie der D^*-Produktion ist komplexer. Es entstehen viele Spuren im Detektor. Neben den Zerfallsteilchen des D^* entstehen oft viele weitere niederenergetische Spuren, die die Rekonstruktion erschweren. Für den J/Ψ-Datensatz werden daher deutlich bessere Auflösungen ermittelt. Da im vorliegenden MC-Datensatz die J/Ψ-Mesonen elastisch produziert werden, besteht der im Detektor sichtbare Endzustand nur aus den beiden Zerfallsmyonen, was für die Spurrekonstruktion vorteilhaft ist.

Die Auflösungen für der Spurparameter sind in Tabelle 5.6 zusammengestellt, wobei die Breiten mit Formel 5.2 amplitudengewichtet berechnet worden sind. Generell kann man feststellen, daß diese Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Werten, die unter Verwendung von FTTEMU3 ermittelt worden sind (siehe Tabelle 5.1 und [58]) stehen. Daraus kann gefolgert werden, daß die Ergebnisse der Studien unter Verwendung von FTTEMU3 auch mit der verbesserten an der Hardware orientierten FTTEMU4 Simulation richtig bleiben.

Datensatz	$\sigma^{\mathrm{AW}}_{\mathrm{eff},\Phi}$	$\sigma^{\mathrm{AW}}_{\mathrm{eff},\Theta}$	$\sigma^{\mathrm{AW}}_{\mathrm{eff},1/p_t}$
D^*-Daten 1997	2,2 mrad	80 mrad	0,03 GeV^{-1}
J/Ψ-Monte-Carlo	1,1 mrad	50 mrad	0,02 GeV^{-1}

Tabelle 5.6: Auflösung der Spurparameter Φ, Θ und $1/p_t$ wie sie von FTTEMU4 für einen D^*-Datensatz und ein J/Ψ-Monte-Carlo ermittelt werden.

5.3.6 Beispielereignis

Zur Veranschaulichung soll Abbildung 5.17 dienen. Es ist ein J/Ψ-Ereignis in Photoproduktion gezeigt. In der zentralen Spurkammer erkennt man nur die Signatur der Zerfallsleptonen der Reaktion $e + p \rightarrow e + p + J/\Psi \rightarrow e + p + \mu^+\mu^-$. Das gestreute Elektron und das Proton entweichen ungesehen durch das Strahlrohr aus dem Hauptdetektor. Außer den Spuren selbst, die hier von FTTEMU4 rekonstruiert worden sind, sind noch die gefundenen Spursegmente sowie die Hits auf den vom FTT genutzten Drahtlagen zu sehen. Bei den Hits erkennt man neben den Hits auf oder nahe der rekonstruierten Spur noch die Spiegelhits. In der xy-Ansicht (Abbildung a) kann in diesem Maßstab kein Unterschied zwischen den FTT-rekonstruierten Spuren und den Spuren, wie sie von der vollen Rekonstruktion gemessen werden, ausgemacht werden. In der rz-Ansicht (Abbildung b) sind Unterschiede zwischen beiden Spurrekonstruktionen zu erkennen.

D^*-Ereignisse (Daten): J/Ψ-Ereignisse (MC):

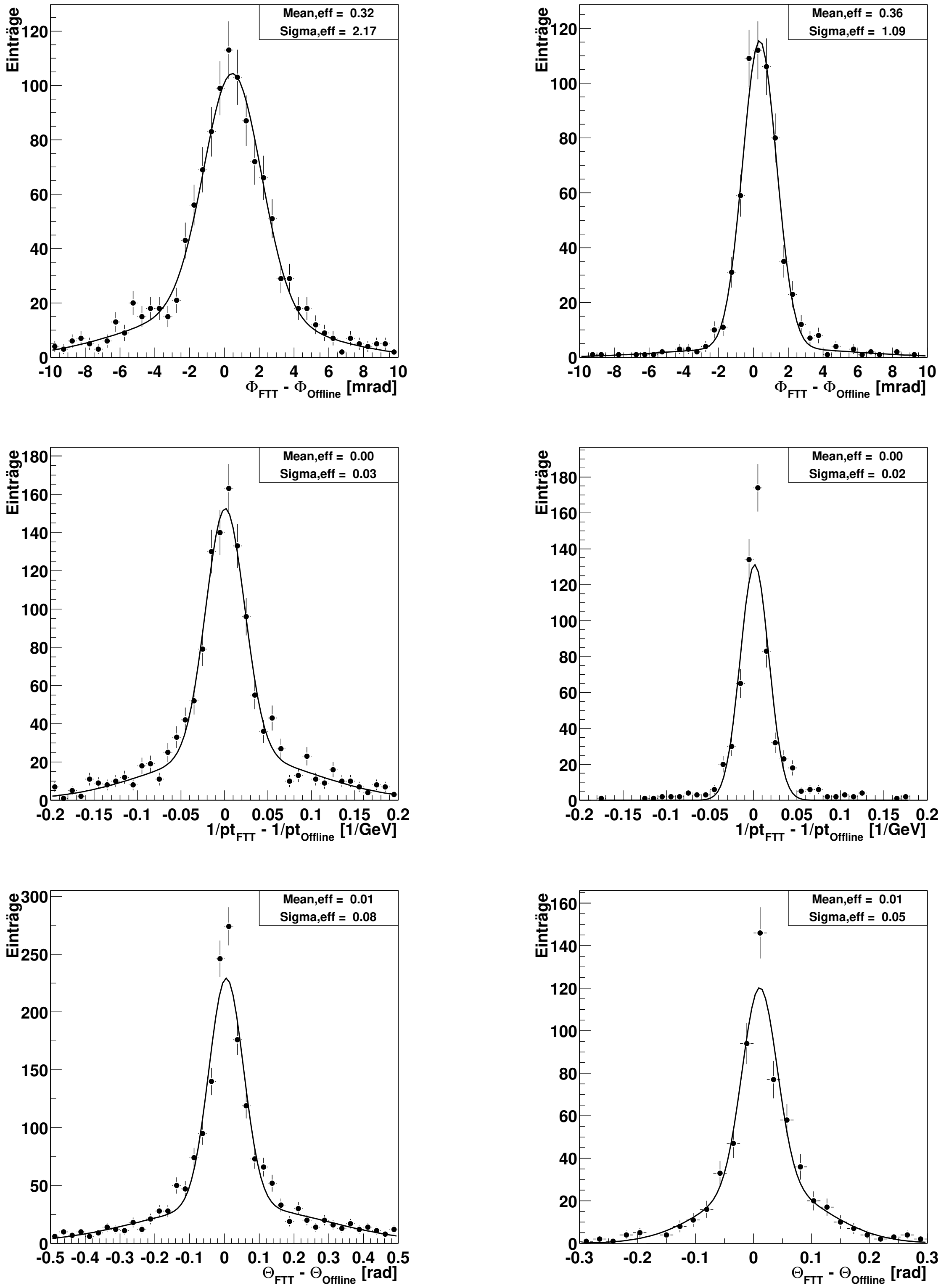
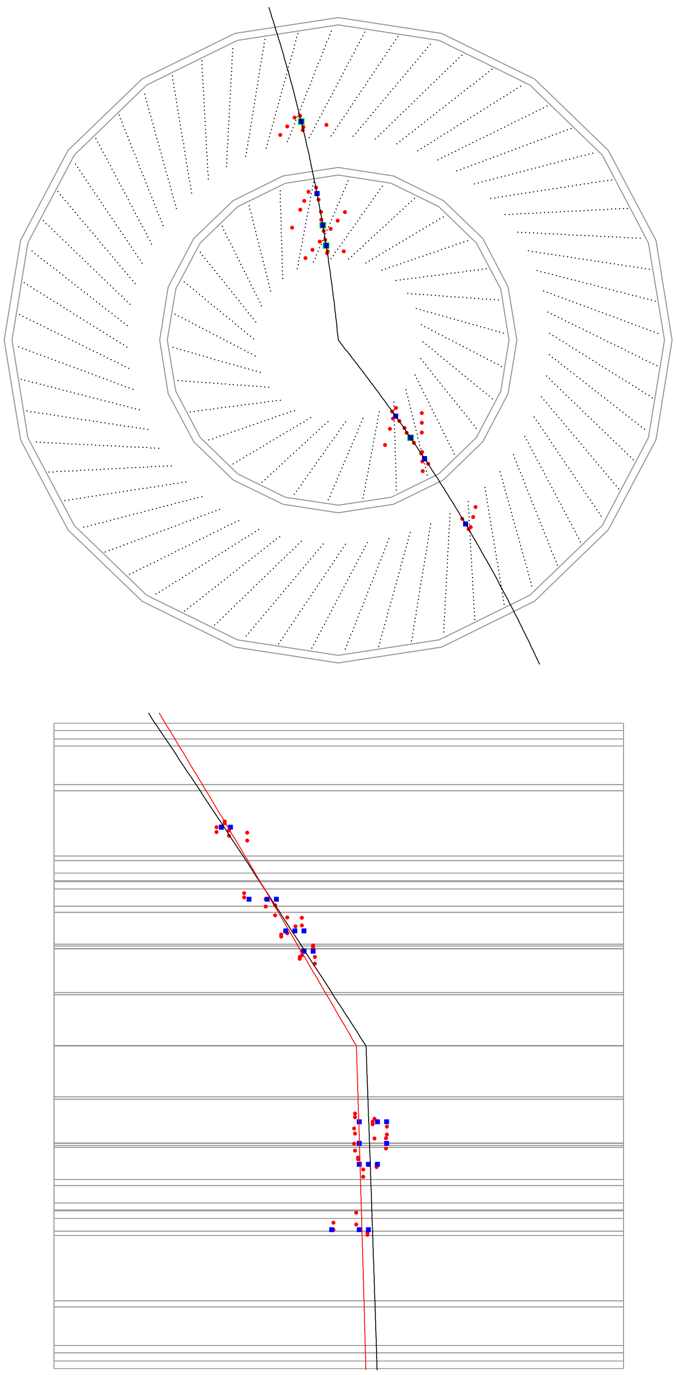


Abbildung 5.16: Vergleich von Spurparameter aus der vollen Offline-Rekonstruktion mit Werten, die die FTT-Simulation ermittelt hat. Die Abbildungen in der linken Spalte sind für D^*-Daten aus dem Jahr 1997. Grundlage für die rechte Spalte war ein J/Ψ-Monte-Carlo.



a)

b)

Abbildung 5.17: Beispielereignis eines J/Ψ-Zerfalls in zwei Myonen rekonstruiert mit dem FTT. Neben den Spuren sind noch die vom FTT gefundenen Segmente ■ und die Hits ● auf den vom FTT genutzten Drähten zu sehen. In der xy-Ansicht (a) ist kein Unterschied zwischen FTT und er vollen Rekonstruktion zu erkennen. In der rz-Ansicht (b) wird ein Unterschied beider Rekonstruktionsmethoden sichtbar.

5.4 Maskengeneration

Eng verbunden mit FTTEMU4 ist das Generieren von gültigen Masken. Hierzu werden alle Kombinationen von Einträgen in den Schieberegistern einer Triggergruppe gebildet. Jede Kombination repräsentiert drei Punkte in der $r\Phi$-Ebene. Durch diese drei Punkte wird zusammen mit dem Vertex eine Kreisanpassung durchgeführt. Die Güte des Fits entscheidet darüber, ob eine Maske als gültig eingestuft wird. Zu Berechnung konnten Routinen nutzbar gemacht werden, die auch für die volle Rekonstruktion benutzt werden [115]. Damit werden die aktuelle Kalibration und diverse Korrekturen zur linearen Driftzeit-Driftstrecken-Beziehung berücksichtigt. Einzelheiten sind in [116] nachzulesen.

Abbildung 5.18 zeigt einen Teil der drei Schieberegister einer Triggergruppe und eine Spur, die die Einträge ausgelöst hat. In dieser Abbildung sind die Register in 20 MHz-, 80 MHz- und einer virtuellen 320 MHz-Auflösung zu sehen. Die erhöhte Frequenz von 320 MHz wurde eingeführt, um ein Gewichtungsschema zu realisieren.

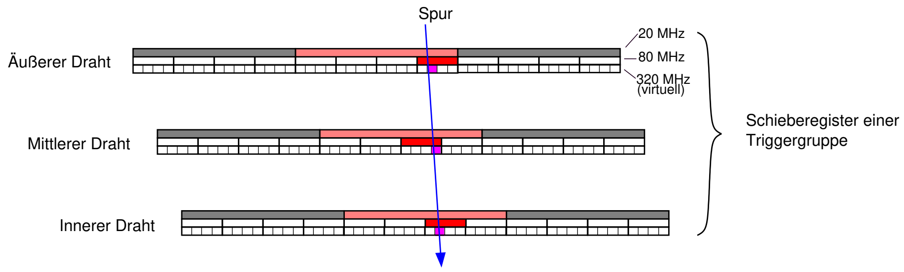


Abbildung 5.18: Zur Maskengenerierung werden alle möglichen Masken, d. h. Schieberegisterinhalte, getestet. Das Verfahren wird für eine Diskretisierung der Driftzeit mit einer Frequenz von 20 MHz, 80 MHz und 320 MHz durchgeführt.

Mit diesem Gewichtungsschema kann die "Wichtigkeit" einer Maske bestimmt werden. Dazu wird für die 80 MHz-Masken ein vierfaches Oversampling durchgeführt, indem die effektive Frequenz auf 320 MHz gesteigert wird, was gleichbedeutend ist mit einer Diskretisierung der der Driftzeit in 3,125 ns-Schritten. Das entspricht einer Driftstrecke von etwa 150 µm und liegt damit in der Nähe der Einzelhitauflösung der Spurkammer. Zu einer 80 MHz-Maske gehören $4^3 = 64$ 320 MHz-Masken, da für jeden der drei Drähte vier verschiedene Einträge mit der feineren Granularität möglich sind. Die Gültigkeit der 320 MHz-Masken wird ihrerseits anhand eines Fits geprüft. Die Zahl der validierten 320 MHz-Masken ist ein Maß für das Gewicht einer 80 MHz-Maske. Diese Information ist wichtig, falls man in eine Situation kommt, in der nicht alle gültigen Masken in der FTT-Hardware gespeichert werden können.

Eine Gewichtung von 20 MHz-Masken kann durchgeführt werden, indem die Gewichte der zugehörigen 80 MHz-Masken herangezogen werden. Wie beim Übergang von 80 MHz zu 320 MHz können zu einer 20 MHz-Maske $4^3 = 64$ 80 MHz-Masken beitragen. Da die 80 MHz-Masken schon Gewichte zwischen 1 und 64 haben, kann eine 20 MHz-Maske ein Gewicht zwischen 1 und 4096 bekommen.

Die Berechnung aller Masken muß für alle vier Triggerlagen und für jede Zelle durchgeführt werden. Letzteres ist notwendig, da durch unvermeidbare Positionierungsfehler die exakte

Symmetrie der Spurkammer verloren geht. Weil die Zahl aller möglichen 320 MHz-Masken im Bereich von 10^{10} so groß ist, daß nicht alle getestet werden können, werden zuerst gültige 20 MHz-Masken in einer Näherung berechnet und nur für gültige Masken wird dann die nächst feinere Granularität berechnet. Weitere Details sind in [116] beschrieben.

Tabelle 5.7 gibt eine Übersicht, wie viele gültige Masken in den einzelnen Triggerlagen auftreten. Die Kenntnis dieser Zahlen ist für die Hardwarerealisierung von großer Wichtigkeit, da Speicherplatz und Kapazität zur Implementierung schneller Maskenvergleiche in ausreichendem Maße vorhanden sein müssen.

	1. Lage	2. Lage	3. Lage	4. Lage
20 MHz	≈ 1200	≈ 2000	≈ 3300	≈ 2800
80 MHz	≈ 20000	≈ 38000	≈ 60000	≈ 55000

Tabelle 5.7: Anzahl gültiger Masken für die einzelnen Triggerlagen. Die genaue Zahl hängt von der aktuellen Kalibration ab.

Damit die Masken effizient gespeichert werden können, wurde ein Maskencode eingeführt, der eindeutig ist und aus dem zur Maske gehörenden Muster in den Schieberegistern abgeleitet werden kann. Abbildung 5.19 zeigt die Definition der 21 Bits für 20 MHz-Masken, und in Abbildung 5.20 ist die Nutzung der 27 Bits für den Code der 80 MHz-Masken zu sehen.

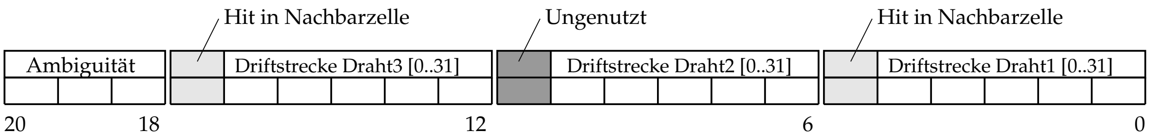


Abbildung 5.19: Belegung der 21 Bits für den Maskencode von 20 MHz-Masken.

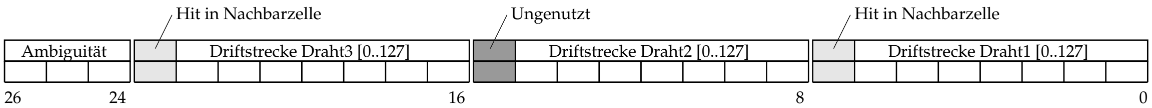


Abbildung 5.20: Belegung der 27 Bits für den Maskencode von 80 MHz-Masken.

Die Driftstecke, was gleichbedeutend mit der Position im Schieberegister ist, wird für jeden Draht gespeichert. Entsprechend der Auflösung werden für die 20 Mhz-Masken 5 Bits und für die 80 MHz-Masken 7 Bits benutzt. Für den inneren und den äußeren Draht wird in einem weiteren Bit angezeigt, ob sich der Treffer in der Nachbarzelle befindet, siehe Abbildung 4.3. Weitere 3 Bits werden benötigt, um alle möglichen $2^3 = 8$ Mehrdeutigkeiten hinsichtlich der Driftrichtung zu codieren. Für jeden der drei Drähte wird mit einem Bit signalisiert, auf welcher Seite der Treffer liegt.

Kapitel 6

Die Hardware des FTT

In diesem Kapitel sollen die Hardwarekomponenten, aus denen das Fast-Track-Trigger-System aufgebaut ist, genauer beschrieben werden. Dabei wird auf die Komponenten, die im Rahmen dieser Arbeit mit entwickelt wurden, besonders detailiert eingegangen.

Die Implementierung eines Triggersystems, wie es der FTT darstellt, wurde erst dadurch möglich, daß es eine Reihe von Weiter- und Neuentwicklung im Bereich der schnellen Mikroelektronik gegeben hat. Die wichtigsten im FTT-Projekt eingesetzten Technologien sollen eingangs kurz vorgestellt werden.

6.1 Technologien

6.1.1 Field Programable Gatearrays

Field **P**rogramable **G**atearrays (FPGAs) sind programmierbare Elektronikbausteine, die vom Nutzer seinen Bedürfnissen entsprechend angepaßt werden. Ein FPGA besteht vereinfacht aus einer festen Zahl von konfigurierbaren Logikblöcken, Eingabe-Ausgabeblöcken sowie Verbindungsmöglichkeiten zwischen diesen Blöcken. Über das genaue Zusammenspiel entscheidet der Anwender. Zu diesem Zweck wird die gewünschte Konfiguration des Chips in einer speziellen Beschreibungssprache, einer **H**ardware-**D**escription-**L**anguage (HDL)[1], abgebildet. Mit speziellen Werkzeugen, die vom Hersteller des FPGAs angeboten werden, wird der Chip dann entsprechend programmiert. Es gibt Chips, die nur einmal programmiert werden können, und solche die sich (fast) beliebig oft umkonfigurieren lassen.

Im Zuge des Fortschritts bei der Herstellung von immer kleineren hochintegrierten Halbleiterelementen sind inzwischen FPGAs erhältlich, die mehrere Millionen Gatter enthalten, welche vom Nutzer verwendet werden können. Betriebsfrequenzen von 100 MHz und mehr sind problemlos möglich. Mehrere 100 Eingangs- und Ausgangspins erlauben die Bearbeitung großer Datenmengen.

Mit den Entwicklungswerkzeugen der Hersteller lassen sich die Logikblöcke der FPGAs re-

[1] Bekannte Beispiele solcher Sprachen sind VHDL oder Verilog.

lativ leicht programmieren. Viele Standardkomponenten sind in den Entwicklungsbibliotheken bereits vorhanden. Dazu zählen etwa RAM-Speicher, Addierer, FIFOs[2] und so weiter. Eine Schlüsseltechnologie für die Realisierung des FTT sind sogenannte CAM-Speicher, die zu den Leistungsmerkmalen von FPGAs der neusten Generation gehören.

CAM - Content Addressable Memory

Content **A**ddressable **M**emory (CAM) stellt eine Art Speicher dar, der als "inverses" RAM arbeitet.

Bei einem herkömmlichen RAM-Speicher wird eine Adresse angegeben und der Speicherinhalt an dieser Stelle entweder geschrieben oder gelesen. Beim CAM wird ein Suchwort angegeben und das CAM liefert in einem Zugriffszyklus die Adresse des Suchwortes, sofern sich dieses im CAM befindet. Abbildung 6.1 zeigt ein Beispiel.

Mit dieser Technologie lassen sich Probleme der Mustererkennung effizient lösen, da das Auffinden von Inhalten im Speicher schnell möglich ist.

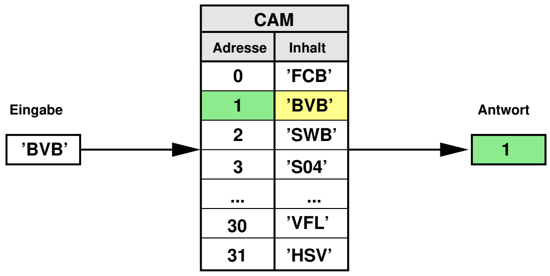


Abbildung 6.1:
Beispiel zur Funktionsweise eines CAM-Speichers.

6.1.2 Digitale Signal Prozessoren

Digitale **S**ignal **P**rozessoren (DSPs) sind Prozessoren, die speziell zur Verarbeitung von Eingangssignalen in Echtzeit entwickelt wurden. Moderne DSPs sind Dank der gewachsenen Ressourcen, die in die Chips integriert werden können, in der Lage, auch komplexere Algorithmen zu verarbeiten. Einige DSPs sind vom Hersteller mit einem winzigen Echtzeitbetriebssystem ausgestattet. Dadurch kann der Prozessor sehr vielseitig und flexibel aber trotzdem schnell auf unterschiedliche Eingangssignale reagieren.

Im Gegensatz zu den aus üblichen Personalcomputern bekannten Mikroprozessoren, die meist sogenannte Supportchipsätze zur Kommunikation nutzen, eigenen sich DSPs zum direkten Anschluß an ein Bussystem oder andere Komponenten. Standardanschlüsse wie ein Interface an RAM-Speicher sind bereits in den DSP integriert. Besonders mächtige Lösungen lassen sich erstellen, wenn man DSPs geeignet mit FPGAs kombiniert.

[2]**F**irst **I**n **F**irst **O**ut.

6.2 FTT Hardwareübersicht

Mit den in Kapitel 5 vorgestellten Simulationsprogrammen wurde ein Konzept für den FTT entwickelt. Es wurde gezeigt, daß die erzielte Auflösung zur Entwicklung effizienter und selektiver Triggeralgorithmen geeignet ist. Für die Hardwarerealisierung ist es wichtig, die Algorithmen so zu formulieren, daß sie in hohem Maße parallel abgearbeitet werden können, damit die Ergebnisse innerhalb der Latenzzeit der einzelnen Triggerstufen berechnet werden können.

Eine Übersicht über die Hardware des FTT ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Die Hardware ist nach Triggerleveln getrennt organisiert. Zwischen den Stufen werden die Daten mittels LVDS-Verbindungen (**L**ow **V**oltage **D**ifferential **S**ignal) ausgetauscht. Dieser Signalstandard ermöglicht eine schnelle und sichere Übertragung von Daten. Das genaue Protokoll, das zur Kommunikation benutzt wird, hängt vom eingesetzten Treiberbaustein ab. Im FTT-Projekt werden die Chips DS90C387/DS90CF388 [117] von National-Semiconductors verwendet.

Alle abgebildeten Karten werden in 6U-Crates[3] betrieben. Neben der Stromversorgung und Kühlung durch Ventilatoren besitzen diese Crates auf der Rückseite einen Backplane-Bus, der genutzt werden kann, um die Karten auszulesen oder Informationen zwischen den Karten zu transportieren. Beim L3 System kommen Standard-VME-Crates zum Einsatz. Bei den Crates der ersten und zweiten Stufe entspricht der obere Teil der Backplane dem VME-Standard, während der untere Teil nach speziellen Anforderungen im Rahmen des FTT-Projekts entworfen wurde.

6.3 Die Hardware der ersten Stufe

6.3.1 Buffer-Karte

Beim Design des FTT wurde es als besonders wichtig angesehen, daß der FTT parallel zum bestehenden DC$R\Phi$-Trigger betrieben werden kann. Will man keine großen Einschränkungen bei der Auswahl der Drahtlagen für den FTT hinnehmen, muß eine Möglichkeit gefunden werden, die Analogsignale der zentralen Driftkammern beiden Triggersystemen gleichzeitig zugänglich zu machen. Zu diesem Zweck wurde eine *Buffer-Karte* entwickelt. Diese Karte kann an den Analogausgang der bestehen FADC-Karten der zentralen Jetkammern angeschlossen werden. Die Buffer-Karte erlaubt den gleichzeitigen Anschluß der existieren Adapter für den DC$R\Phi$-Trigger und der Kabel, die zur ersten Triggerstufe des FTT geführt werden. Insgesamt werden 150 Karten dieses Typs benötigt.

6.3.2 Das Front-End-Modul

Das **F**ront-**E**nd-**M**odul (FEM) ist die Hauptkomponente der ersten Stufe des FTT. Diese Karte digitalisiert die Signale der Spurkammer und führt die Spursegmentsuche durch. Die wichtigsten Einheiten dieses Boards sind FADC-Bausteine, 6 große FPGAs sowie das VME-Interface.

[3] Die Höhe der von Einsteckkarten wird oft in U angegeben. Bei VME-Karten kommen meist 9U-, 6U- oder seltener auch 3U-Karten zum Einsatz.

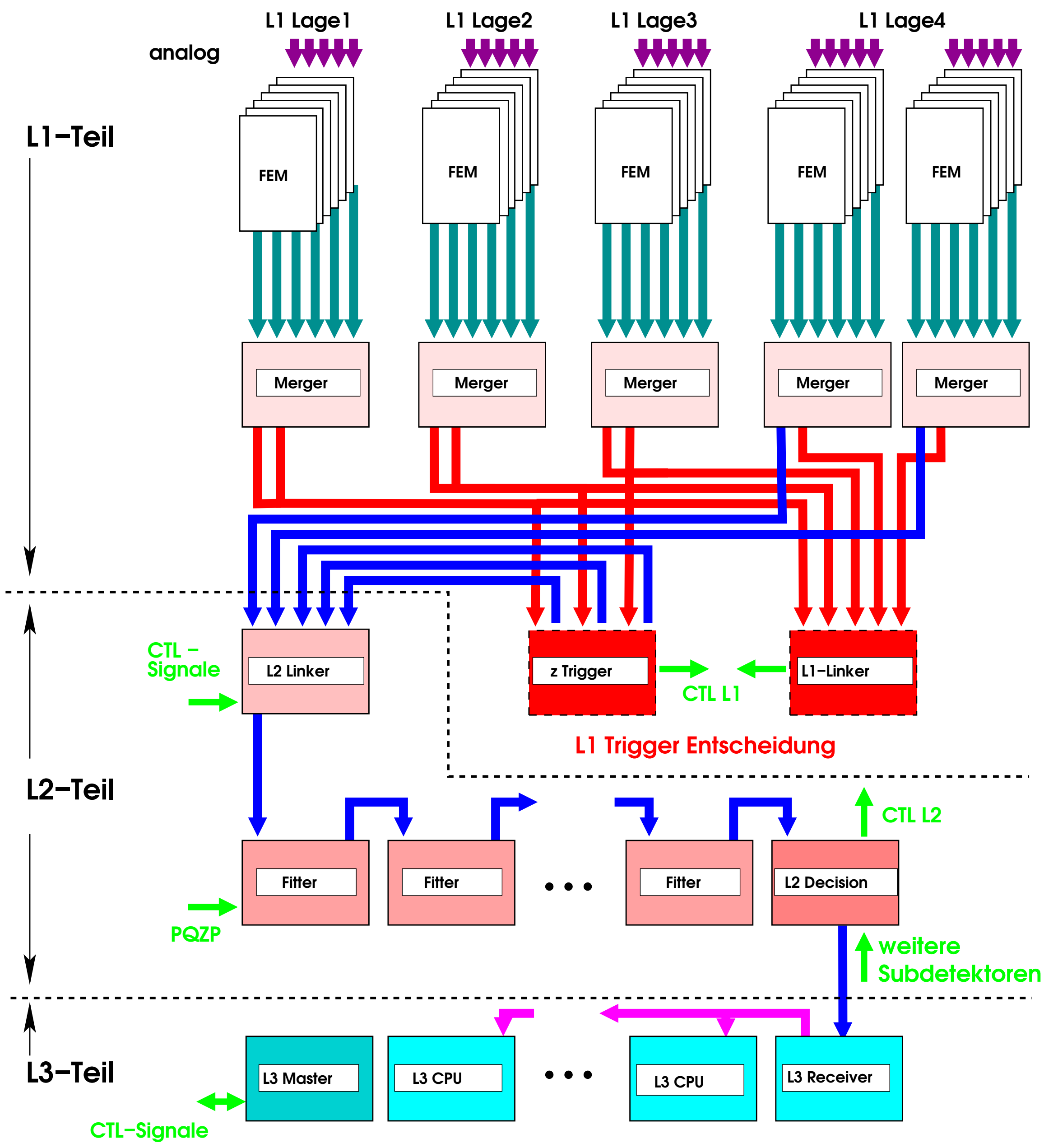


Abbildung 6.2: Hardwarerealisierung des FTT. Beschreibung siehe Text.

Eine schematische Übersich des FEMs ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Bei den FPGAs wird noch unterschieden zwischen fünf Front-FPGAs sowie einem Back-FPGA. Alle FPGAs stammen aus der APEX20K-Serie [118] des Herstellers Altera.

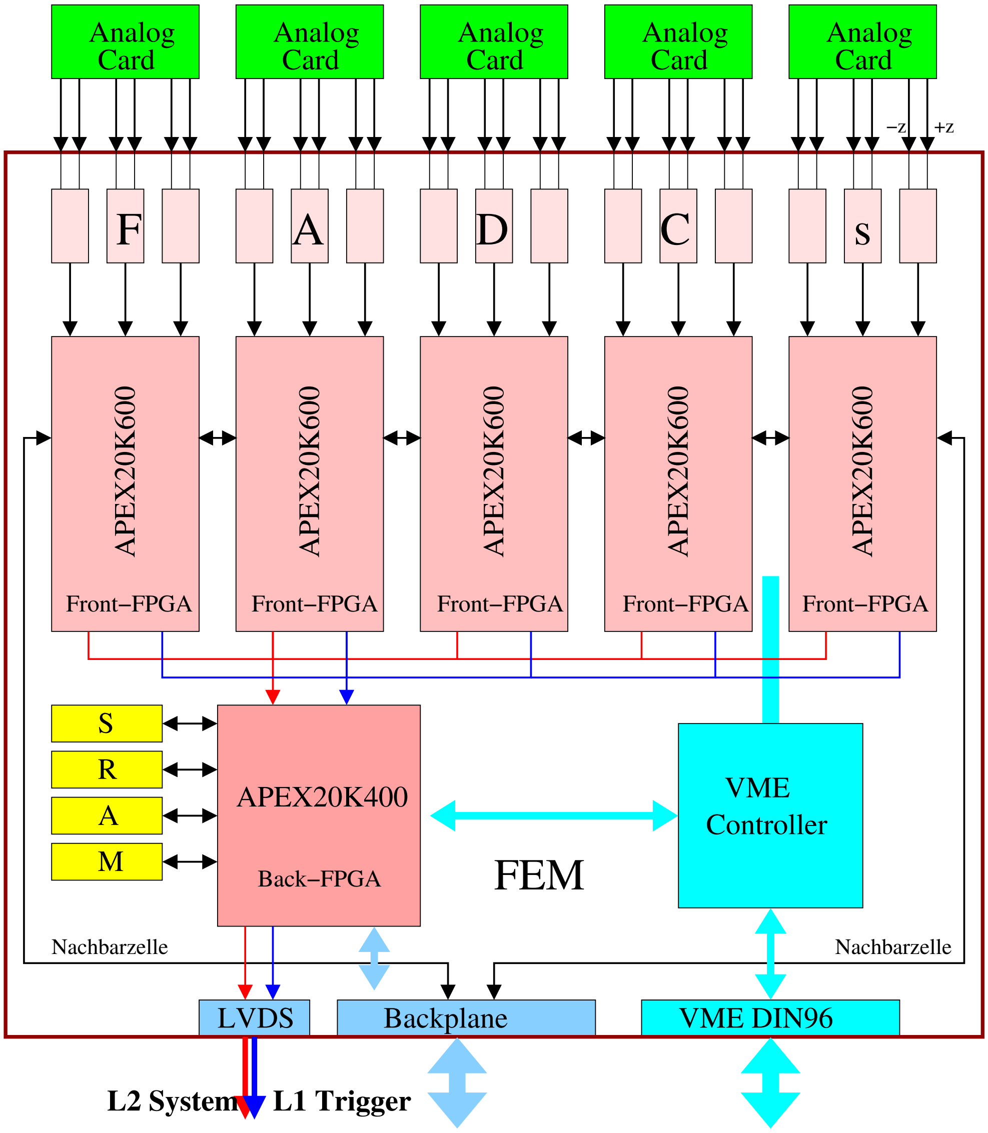


Abbildung 6.3: Schematischer Aufbau des Front-End-Moduls (FEM). Eine genauere Beschreibung befindet sich im Text.

Digitalisierung

Entsprechend der Triggergruppen werden die analogen Signale jeweils dreier Drähte FADC-Chips zugeführt. Zur Bestimmung der z-Koordinate ist es notwendig, das Signal beider Drahtenden zu digitalisieren. Auf einem FEM werden insgesamt fünf in Φ benachbarte Triggergruppen verarbeitet. Damit die Eingangssignale aller 150 Triggergruppen (dreimal 30 in CJC1 und 60 in CJC2) verarbeitet werden können, werden 30 FEM-Boards für den Aufbau des FTT benötigt. Der FADC-Chip vom Type AD9218-80 [119] vom Anbieter Analog Devices digitalisiert das Eingangsignale zweier Drahtenden mit einer Frequenz von 80 MHz und einer Präzision von 10 Bit.

Spursegmentsuche

Die digitalisierten Pulse werden dem *Qt*-Algorithmus (siehe Kapitel 4.3.1) übergeben. Mit modernen programmierbaren Chips kann man diesen Algorithmus in weniger als 100 ns ablaufen lassen.

Die gefundenen Hits werden in die bereits erwähnten Schieberegister eingefüllt, wobei eine Sorte mit 20 MHz und die andere mit 80 MHz getaktet wird. Die Tiefe ist durch die maximal mögliche Driftzeit gegeben und beträgt 24 Bits für 20 MHz-Register und 96 Bits für 80 MHz-Register.

Neben der Zeitmessung wird vom *Qt*-Algorithmus die deponierte Ladung bestimmt, die zur Messung der z-Koordinate mittels Ladungsteilung (Gleichung 4.2) genutzt wird. Das Ergebnis der z-Bestimmung wird im FTT für jeden Draht der Triggergruppe einzeln mit 6 Bits kodiert, was etwa einer Bingröße von 3,4 cm entspricht. Dieser Wert liegt im Bereich des intrinsischen Auflösungsvermögens der zentralen Spurkammer [109].

Die Spursegementsuche wird in zwei Stufen durchgeführt. In der totzeitfreien Phase vor einem `L1Keep`-Signal wird ausschließlich mit groben Spursegmenten (20 MHz-Masken) gearbeitet. Für die zweite Stufe wird nach einem `L1Keep`-Signal des zentralen Triggers die voll Auflösung (80 MHz-Masken) wieder hergestellt.

Die in den 20 MHz-Schieberegistern entstehenden Muster werden in Maskencodes umgerechnet, wie in Kapitel 5.4 beschrieben. Dazu werden die drei Drähte einer Triggergruppe innerhalb einer Zelle und zwei weitere Drähte aus den Nachbarzellen herangezogen (vergleiche Abbildung 4.3). Diese Codes werden mit Maskencodes verglichen, die zuvor berechnet wurden und in den CAMs gespeichert sind (siehe auch Abbildung 6.4). Diese Vergleiche müssen Bunchcrossing für Bunchcrossing durchgeführt werden, da man sich in der totzeitfreien Phase befindet und sich die Einträge in den Schieberegistern entsprechend ändern. Dank der CAM-Technologie können diese Suchvorgänge hinreichend schnell durchgeführt werden [120].

Für im CAM vorhandene Masken werden die zugehörigen Parameter κ und Φ des Spursegments herausgesucht. Damit eine Triggerentscheidung des FTT Level-1-Systems herbeigeführt werden kann, müssen alle Daten dieser Spursegmente an einer zentralen Stelle zusammengetragen werden. Die Vielzahl von FEM-Boards macht es unmöglich, alle 30 Ausgangskabel direkt an eine weitere Karte anzuschließen und verlangt den Einsatz von Merger-Karten (siehe Abbildung 6.2). Ihre Aufgabe ist es, die Datenströme zu bündeln und zur L1-Triggerkarte zu führen, wo die Spursegmente gesammelt werden und zur Berechnung einer Triggerentscheidung benutzt werden.

Wird vom zentralen Trigger ein `L1Keep`-Signal generiert, werden die Informationen über die gültigen Spursegmente von den Front-FPGAs zum Back-FPGA transferiert. Dazu wer-

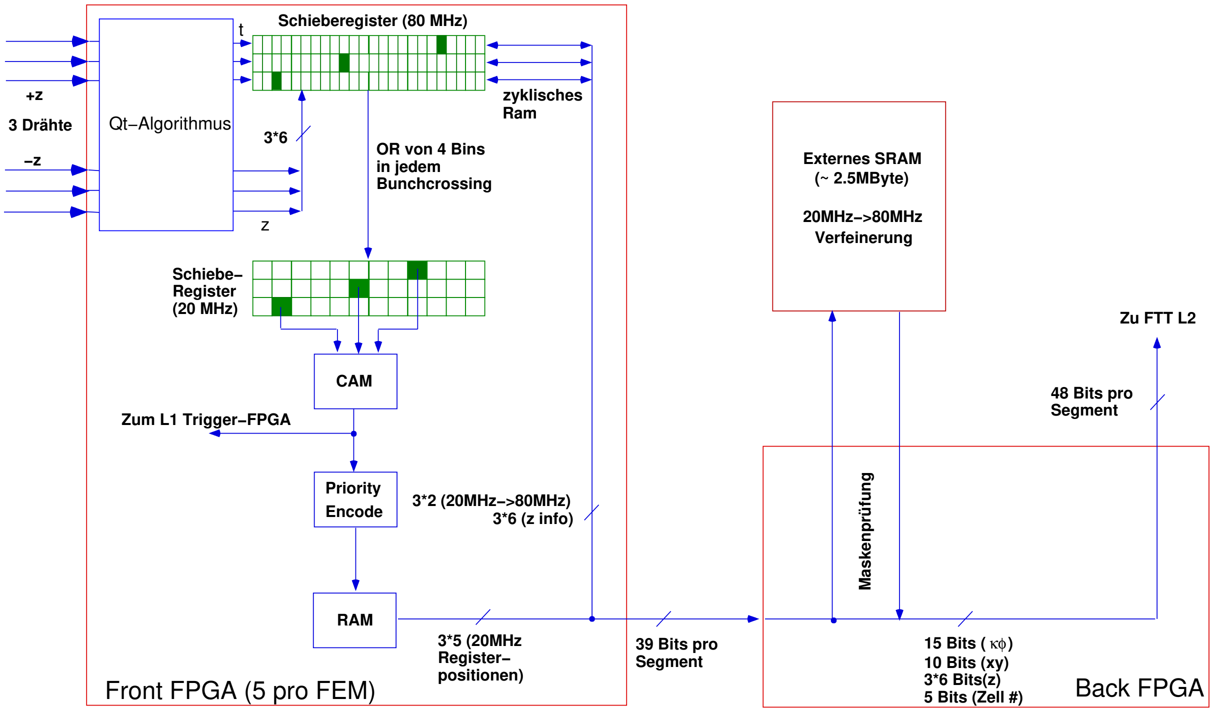


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Funktionsweise des FEM. Auf einem FEM gibt es fünf Front-FPGAs und einen Back-FPGA. Die Front-FPGAs führen den *Qt*-Algorithmus und die Suche nach groben Spursegmenten (20 MHz-Masken) aus. Der Back-FPGA ermittelt nach einem `L1Keep`-Signal Spursegmente mit hoher Auflösung (80 MHz-Masken).

den die Position im 20 MHz-Schieberegister, die Information zu den Einträgen im 80 MHz-Schieberegister und die drei z-Werte übertragen. Die 80 MHz-Maskencodes werden wieder mit gültigen Masken im CAM verglichen. Für gefundene Masken wird die Information aus dem CAM genutzt, um die Spurparameter, die zum hochaufgelösten Spursegment gehören, aus einem RAM-Speicher auszulesen und sie an die zweite Stufe des FTT zu schicken.

6.3.3 Level-1-Trigger-Karte

Auf der L1-Trigger-Karte werden alle Spursegmente gesammelt. Dann wird versucht, Segmente aus unterschiedlichen Triggerlagen, die von derselben Teilchenspur ausgelöst wurden, zusammenzufügen. Die zu jedem Segment gehörenden Parameter κ und Φ werden in einem zweidimensionalen Histogramm (16(κ) $\times$ 60(Φ) Bins) gepeichert. Für Segmente einer Teilchenspur erwartet man, daß diese Einträge im Histogramm unmittelbar beieinander liegen. Der Algorithmus, der zum Zusammenfügen von Segmenten (Linken) genutzt wird, ist dem Linkalgorithmus der zweiten Stufe des FTTs sehr ähnlich, der in Kapitel 4.3.3 genauer beschrieben ist. Die im Vergleich geringere Zahl an Histogrammbins reflektiert die niedrigere Auflösung der 20 MHz-Masken.

Besondere Aufmerksamkeit für die L1-Implementierung verlangt hier die erwähnte Schwierigkeit, daß das Bunchcrossing mit dem Zeitnullpunkt des Ereignisses nicht bekannt ist, bevor ein

`L1Keep`-Signal vorliegt. Daher muß das Histogramm unter verschiedenen t_0-Hypothesen analysiert werden. Für die Hypothese mit dem richtigen Zeitnullpunkt erwartet man ein Maximum an erfolgreich gelinkten Spuren. Dadurch kann ein Entscheidungskriterium abgeleitet werden, mit dem der FTT in der Lage ist, dem zentralen Trigger das Bunchcrossing anzuzeigen, in dem das Ereignis statt gefunden hat. Darüber hinaus kann die Zahl der gefunden Spuren abhängig von unterschiedlichen Transversalimpulsschwellen an den zentralen Trigger übermittelt werden. Triggerelemente, die alle auf Informationen der Parameter κ und Φ basieren, sind bereits in Kapitel 4.1 Tabelle 4.2 genannt worden. Eine umfangreichere Beschreibung der Methode und ihrer Implementierung findet man in [91].

6.4 Die Hardware der zweiten Stufe

Die Aufgaben der zweiten Stufe des FTT sind das präzise Zusammenfügen (Linken) von Spursegmenten, die Berechnung von dreidimensionalen Spurparametern und das Erzeugen einer auf diesen Spuren basierenden Triggerentscheidung. Zur Bearbeitung aller dieser Aufgaben wurde ein sehr flexibles Prozessorboard, genannt **M**ulti-**P**urpose-**B**oard (MPB), entwickelt [95, 121]. Für die unterschiedlichen Aufgaben wird das Board entsprechend konfiguriert und programmiert. Die verschiedenen Applikationen werden auf zwei FPGAs der Serie Altera APEX20K und auf vier DSPs aus der TMS320-C6000-Serie des Herstellers Texas-Instruments implementiert. Die beiden FPGAs werden entsprechend ihrer Funktion mit *Data-Controller* und *DSP-Controller* bezeichnet. Abbildung 6.5 zeigt eine beschriftete Photographie des Boards. Aufbau und Funktionsweise des MPB sind in Kapitel 6.6 genauer beschrieben.

6.4.1 L2-Linker

Bei einem `L1Keep`-Signal des zentralen Triggers werden die auf der ersten Stufe gefundenen 80 MHz-Spursegmente, nachdem sie durch die Struktur der Merger-Karten geleitet wurden, auf der L2-Linker-Karte empfangen. Der in Kapitel 4.3.3 beschriebene Linkalgorithmus läuft im Data-Controller-FPGA der Linker-Karte. Mit den Entwicklungswerkzeugen des Herstellers [122] wurde die Laufzeit des Algorithmus detailiert studiert. Es konnte gezeigt werden, daß der Algorithmus in 7,9 µs abläuft und daß der FPGA genügend Ressourcen hat, um die Implementierung vorzunehmen [95].

Die Ausgabe der zusammengefügten Spursegmenten kann erfolgen, sobald die CAMs gefüllt sind und das Abarbeiten der Seed-Liste begonnen hat (siehe Kapitel 4.3.3). Die ersten Segmente werden bereits nach etwa 3 µs an die Fitter-Karten weitergegeben. Dadurch kann bereits mit den ersten Spurfits begonnen werden, während der L2-Linker die noch verbliebenen Segmente zusammenfügt.

6.4.2 L2-Fitter-Kette

Von der Linker-Karte werden die zusammengefügten Spursegmente an eine Kette von sechs Fitter-Karten übergeben. Auf den insgesamt 24 DSPs werden bis zu 48 Spurfits durchgeführt.

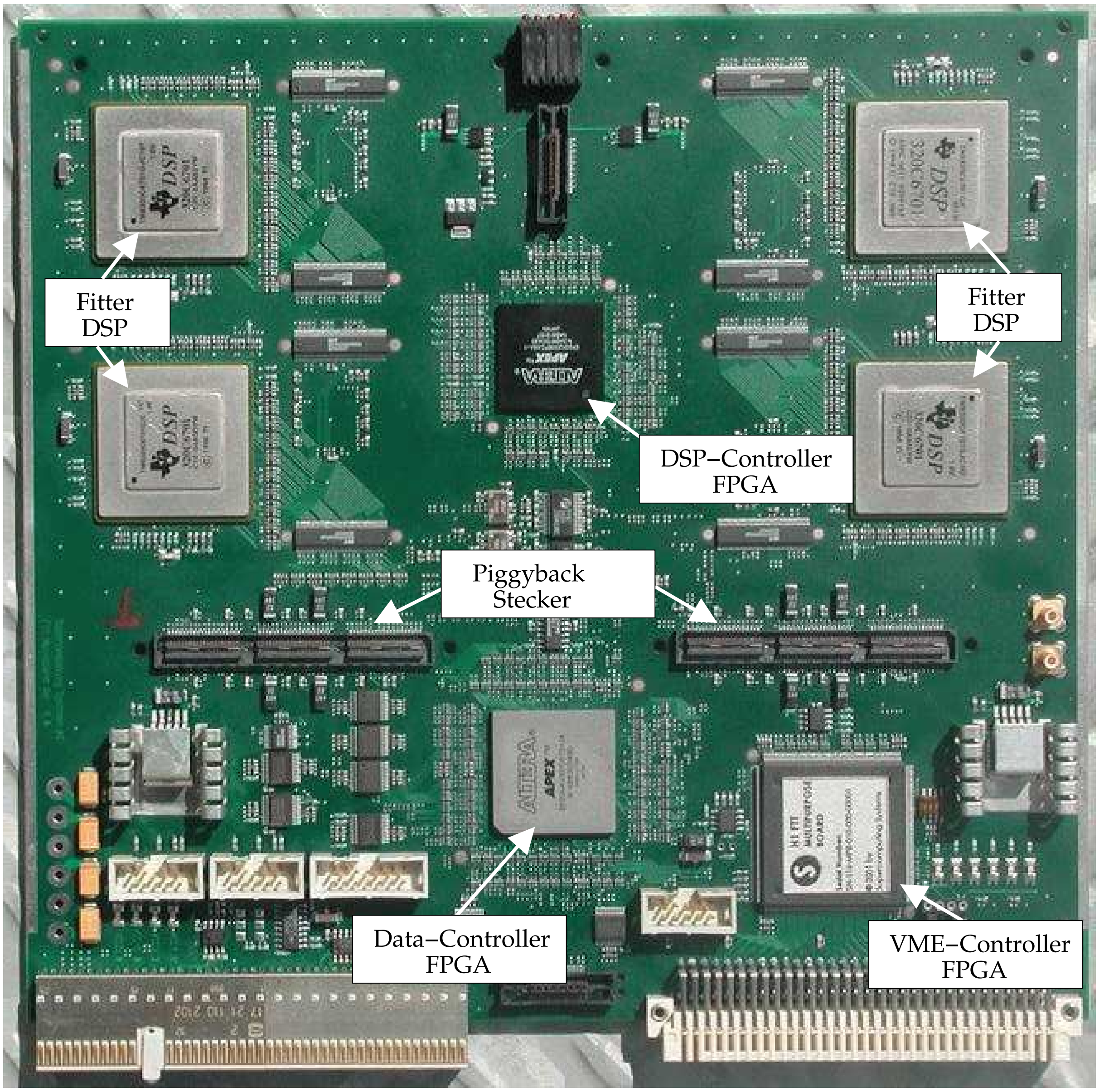


Abbildung 6.5: Photo eines MPB. Beschreibung siehe Text.

Die Spurfits finden in zwei Schritten statt. Zuerst werden mit Hilfe eines Kreisfits (siehe Kapitel 4.3.4) in der xy-Ebene die Krümmung κ und der Winkel Φ bestimmt. Der Winkel Θ in der rz-Ebene wird durch die Berechnung einer Geraden (siehe Kapitel 4.3.4) ermittelt. Eine detailierte Analyse des Leistungsverhaltens der Fitalgorithmen findet sich in Kapitel 6.8.

Damit die zahlreichen Verbindungen zwischen den einzelnen Karten realisiert werden können, ist es möglich, auf ein MPB bis zu vier Piggyback-Karten aufzustecken. Eine solche Karte ist die LVDS-Piggyback-Karte. Mit diesen Karten werden alle LVDS-Verbindungen in der L2-Kette realisiert. Eine weitere Piggyback-Karte dient als Empfänger von PQZP-Signalen der verschiedenen Triggersubsysteme. Für die Spurfits wird die z-Position des Vertex benutzt, die über die PQZP-Piggyback-Karte in die L2-Kette eingelesen wird. Die Verteilung der Daten über die MPBs der L2-Kette wird über ein Messagesystem (siehe Kapitel 6.7) organisiert.

Am Ende der L2-Kette steht ein weiteres MPB, auf dem alle Spurdaten gesammelt werden. Nach Ablauf der Link- und Fitalgorithmen bleiben auf dieser Decision-Karte etwa 2 µs Zeit, die Spuren zu analysieren und eine Triggerentscheidung zu generieren. Eine Zusammenstellung aller Laufzeiten der L2-Algorithmen befindet sich in Tabelle 6.4 am Ende des Kapitels.

Mögliche L2-Triggerelemente des FTT sind in Tabelle 4.3 in Kapitel 4.2 aufgelistet. Für die Berechnung können sowohl die DSPs als auch der Data-Controller-FPGA auf der Decision-Karte benutzt werden.

Sendet der zentrale Trigger ein `L2Keep`-Signal werden die Spurinformationen und die PQZP-Daten an die dritte Stufe L3 übermittelt.

6.5 Die Hardware der dritten Stufe

Die dritte Stufe des FTT besteht aus einer Farm von CPU-Karten. Auf jeder dieser Karten läuft ein Triggeralgorithmus, der seine Entscheidung basierend auf den FTT-Spuren der zweiten Stufe sowie den Daten, die über des PQZP-System zur Verfügung gestellt werden, fällt. Mit diesen Informationen soll nach bestimmten Teilchenzerfällen oder ausgewählten Topologien gesucht werden. Dazu werden die Daten von der L3-Receiver-Karte vom FTT-L2-System entgegengenommen und über eine sogenannte FPDP-Verbindung[4] auf die CPU-Karten verteilt. Eine Übersicht ist in Abbildung 6.6 zu sehen. In der ersten Ausbaustufe wird das System mit acht CPU-Karten betrieben. Ein Ausbau bis auf 16 Karten ist vorgesehen. Eine umfassende Beschreibung des FTT-L3-Systems befindet sich in [85].

6.5.1 PowerPC CPU-Karten

Bei den CPU-Karten handelt es sich um VME-Karten, auf denen nahezu ein kompletter Rechner integriert ist. Es kommen Karten des Typs MVME 2400 [123] vom Hersteller Motorola zum Einsatz. Die Karten sind in verschiedenen Konfigurationen erhältlich. Für das FTT-Projekt sind die Karten folgendermaßen ausgestattet:

[4]**F**ront **P**anel **D**ata **P**ort

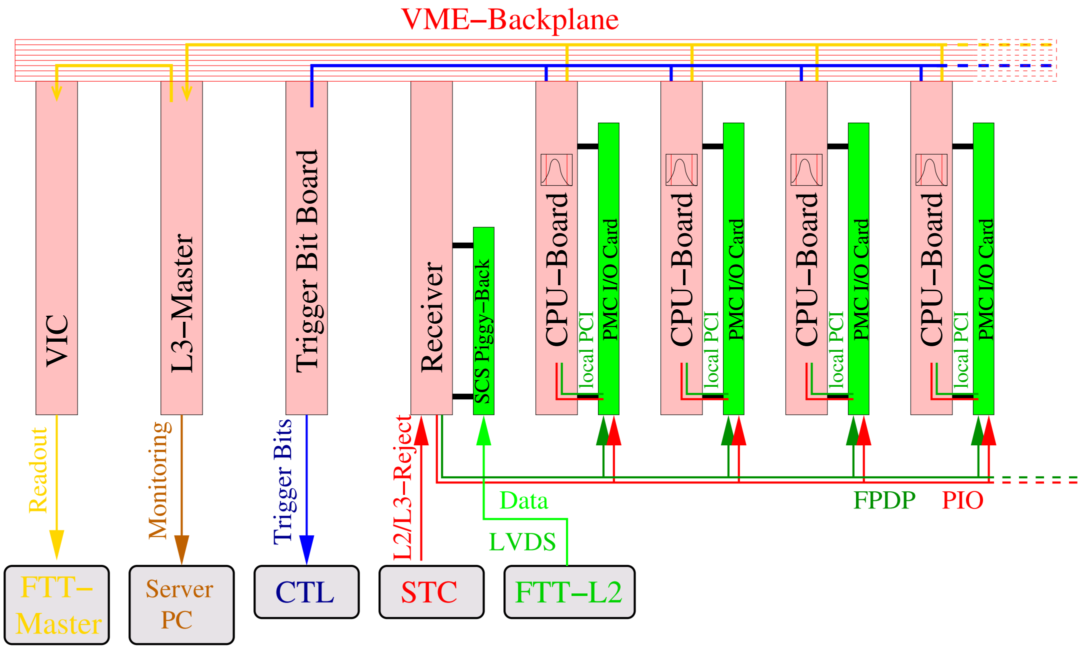


Abbildung 6.6: Schematischer Aufbau des FTT Level-3-Systems.

- Motorola-CPU PowerPC 750 (auch bekannt als G3) mit 450 MHz Taktfrequenz
- 1 MB L2-Cache-Speicher
- 32 MB RAM-Speicher
- 100 MBit Ethernetadapter
- VME-Bridge vom Type Tundra Universe
- Zwei PCI-Mezzanine-Steckplätze für PMC-Karten

Die CPU-Karten können mit unterschiedlichen Betriebssystemen genutzt werden. Für die Wahl des Systems VxWorks [124] für den Betrieb im Rahmen des FTT-Projekts waren zwei Punkte von besonderer Wichtigkeit:

- Da die CPU-Karten ins Triggersystem integriert werden, müssen sie schnell auf bestimmte Signale reagieren können. Dazu muß das Betriebssystem sicherstellen, daß Anfragen in einer garantierten Antwortzeit bearbeitet werden. Dieses Leistungsmerkmal wird von *Echtzeitbetriebssystemen* zur Verfügung gestellt. Die typische Antwortzeit solcher Systeme liegt bei etwa 10 µs. VxWorks ist ein solches Betriebssystem.
- Der zweite wichtige Punkt, weshalb VxWorks als Betriebssystem gewählt wurde, war die Tatsache, daß für die PMC-Karte, welche für die FPDP-Verbindung (siehe Kapitel 6.5.3) benutzt wird, eine Treibersoftware für dieses System vorliegt.

6.5.2 L3-Receiver-Karte

Spurdaten und Subdetektorinformationen, die über das PQZP-System auch L2TT und L2NN (siehe Kapitel 3.7.2 zur Verfügung stehen, werden von der L2-Decision-Karte über eine LVDS-Verbindung an die dritte Stufe des FTT übertragen. Der Datenstrom wird dort zunächst auf eine LVDS-Piggyback-Karte geleitet, wie sie auch in der L2-Kette benutzt wird. Da die Betriebsfrequenz der LVDS-Verbindung größer ist als die der L3-Receiver-Karte, werden die Daten auf der LVDS-Pickyback-Karte zunächst zwischengespeichert.

Auf der L3-Receiver-Karte werden alle wesentlichen Aufgaben von einem zentralen FPGA des Herstellers Altera übernommen. In einem ersten Schritt werden vom 48 Bit breiten Strom der Daten 16 Bit abgetrennt. Diese 16 Bit beinhalten im wesentlichen Informationen, die zur Identifizierung und Verteilung der Daten nötig waren. Weil alle Daten, wenn sie L3 erreichen hinreichend geordnet sind, werden diese Zusatzinformationen nicht mehr benötigt. Die 32-Bit-Datenworte werden dann anschließend über eine FPDP-Verbingung an alle CPU-Karten verteilt.

Figur 6.7 zeigt schematisch den Aufbau der Karte. Neben dem Standardmodus kann die Karte zu Testzwecken auch ohne LVDS-Verbindung benutzt werden. Dazu werden dann Testmuster über die VME-Schnittstelle an definierte Stellen in den zentralen FPGA geschrieben [125].

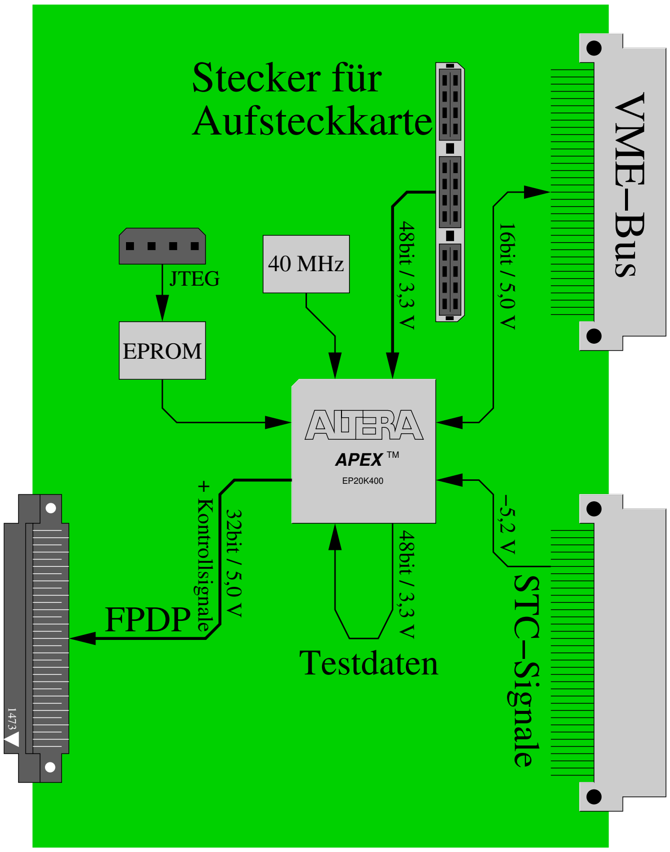


Abbildung 6.7: Schematischer Aufbau der L3-Receiver-Karte [85].

6.5.3 FPDP-Verbindung

Eine wichtige Aufgabe auf der dritten Stufe des FTT ist die schnelle Verteilung der Spur- und PQZP-Daten auf die CPU-Karten. Zu diesem Zweck werden beim FTT DPIO-Karten [126] des Herstellers VSystems eingesetzt.

Von der L3-Receiver-Karte ausgehend werden die Daten über Flachbandkabel an die DPIO-Karten verteilt, die in Form von PMC-Karten auf die CPU-Karten aufgesteckt sind. Eine Besonderheit dieser FPDP-Verbindung ist der Möglichkeit des *Broadcast*, das heißt der gleichzeitigen Versendung von Informationen an mehrere Empfänger. Nur so kann eine ausreichend schnelle Verteilung aller Daten an alle CPU-Karten erreicht werden.

Spur- und PQZP-Daten, die auf der PMC-Karte ankommen, werden zunächst in FIFOs zwischengespeichert. Zur schnellen Übertragung dieser Daten in den RAM-Speicher der CPUs wird eine DMA-Methode[5] benutzt. Hierbei werden keine CPU-Ressourcen benötigt, so daß die CPU für die Zeit der Datenübertragung für andere Aufgaben genutzt werden kann.

6.6 Das Multi-Purpose-Board

6.6.1 Anforderungen und Einsatz

Das Multi-Purpose-Board (MPB) wurde entwickelt, um die Aufgaben der zweiten Stufe des FTT zu erfüllen:

- Zusammenfügen von Spursegmenten (Linker)
- Verbesserung der Spurparameter durch Fits (Fitter)
- L2-Triggerentscheidung (L2-Decision-Karte)

Nach ersten Analysen der Algorithmen, die für obige Aufgaben zum Einsatz kommen sollten, war das grobe Aussehen des MPBs vorgezeichnet. Der Linkalgorithmus sollte in einem FPGA laufen, die Spurfits sollten mit DSPs durchgeführt werden, und für die Triggerentscheidung sollten DSPs und FPGA in Kombination benutzt werden können. Da absehbar war, daß zur Bewältigung der Spurfits mehr Prozessoren nötig sein würden als sinnvoll auf einem Board integrierbar sind, wurden flexible Möglichkeiten für den Datenein- und -ausgang vorgesehen.

Im Laufe der Entwicklung stellte sich heraus, daß dieses Board bei geeigneter Programmierung neben den genannten Aufgaben auch im Bereich der ersten Stufe genutzt werden kann:

- Merger-Karte
- L1-Trigger-Karte (L1-Linker)
- z-Trigger-Karte[6]

[5] **D**irect **M**emory **A**ccess
[6] Der Bau eines z-Vertextriggers innerhalb des FTT ist eine Option, die in [112] vorgeschlagen wird.

Dadurch konnten die Entwicklungskosten sowie Produktionskosten für die notwendige Hardware deutlich reduziert werden.

Das Multi-Purpose-Board wurde im Rahmen des Fast-Track-Trigger-Projekts von der ETH Zürich und der Universität Dortmund in enger Zusammenarbeit mit der Züricher Super-Computing-Systems AG[7] entwickelt, wobei das Design der Hardware von SCS stammt, während die Programmierarbeiten zu großen Teilen an den Hochschulen durchgeführt wurden.

6.6.2 Aufbau des MPB

Die wesentlichen Komponenten des MPBs sind zwei große FPGAs der Firma Altera, ein APEX20K-200 und ein APEX20K-400[8], sowie vier Floatingpoint-DSPs vom Type TMS320C6701 [127] der Firma TexasInstruments. Abbildung 6.8 zeigt den schematischen Aufbau des MPBs.

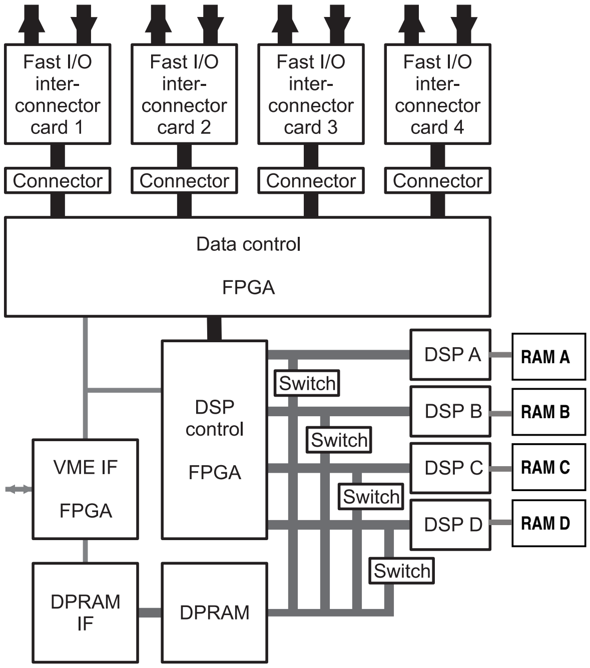


Abbildung 6.8: Schematischer Aufbau eines Multi-Purpose-Boards mit vier Piggyback-Karten (Fast I/O interconnector card). Einzelheiten siehe Text.

Der kleinere der FPGAs dient hauptsächlich zur Steuerung der DSPs und wird daher im folgenden als *DSP-Controller* bezeichnet. Der andere FPGA steuert und verteilt den Datenfluß auf dem gesamten Board und wird deshalb *Data-Controller* genannt. Weiterhin gibt es ein Dualported-RAM (DPRAM), auf das der DSP-Controller und die DSPs zugreifen können. Der Zugriff der DSPs wird durch Schalter (*Switches*) geregelt, die vom DSP-Controller gesteuert werden. Jeder der DSPs hat einen eigenen externen Speicher, der für Applikationen verwendet

[7]Super-Computing-Systems, SCS, http://www.scs.ch
[8]Einige der Karten sind mit der Variante APEX20K-600 bestückt.

werden kann, die nicht im DSP-internen Speicher untergebracht werden können. Das MPB besitzt vier Steckplätze für Aufsteckkarten (Piggyback-Karten). Dadurch sind flexible Eingangs- und Ausgangsmöglichkeiten realisierbar. Eine weitere Möglichkeit Daten mit dem MPB auszutauschen ist durch eine VME-Schnittstelle realisiert.

Weitere Anschlußmöglichen sind für Testzwecke vorgesehen. Mittels einer externen Stromversorgung kann das Board ohne die Infrastruktur eines Crates geprüft werden. Während der Testphase kann Code für die programmierbaren Bausteine von einem Entwicklungssystem aus über JTAG-Verbindungen aufgespielt werden.

6.6.3 TMSC6701 Floatingpoint-DSP

Auf dem MPB sind vier Floatingpoint-DSPs vom Typ TMS320C6701 des Herstellers Texas-Instruments untergebracht. Es kommt die schnellste Variante mit 167 MHz Taktfrequenz zum Einsatz. Das entspricht einer Taktzykluslänge von 6 ns. Noch schnellere Varianten des Prozessors sind nur als Fixedpoint-Variante erhältlich.

In Abbildung 6.9 ist ein Blockschaltbild des Prozessors zu finden. Der Kern wird von 8 Funktionseinheiten (*Functional Units*) gebildet, die die Inhalte der 32 Register bearbeiten. Im Idealfall können im Prozessor 8 Operationen in einem Taktzyklus durchgeführt werden. In der Praxis tritt dieser Fall selten ein, weil nicht jede Funktionseinheit jede Operation abarbeiten kann und nicht jedes Register direkt mit jeder Funktionseinheit verdrahtet ist. Bei der Implementierung zeitkritischer Routinen ist außerdem zu beachten, daß einige Befehle mehrere Taktzyklen benötigen bis das Ergebnis im Register vorliegt. In Tabelle 6.1 sind einige Beispiele aufgeführt. Für eine detailierte Übersicht sei auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen [128].

Operation	Befehl	CPU-Zyklen
Speicher-Register-Transfer		
Datenwort vom RAM laden	LDW	4
Datenwort ins RAM schreiben	STW	1
Ganzzahloperationen		
Addition	ADD	1
Subtraktion	SUB	1
Multiplikation	MPY	2
Vergleich	CMPEQ	1
32-Bit-Gleitkommazahloperationen		
Addition	ADDSP	4
Subtraktion	SUBSP	4
Multiplikation	MPYSP	4
Vergleich	CMPEQSP	1
Sprung zu Adresse	B	6

Tabelle 6.1: Auswahl einiger DSP-Operationen. Angegeben ist auch die Zahl der nötigen CPU-Zyklen. Die vollständige Beschreibung des Befehlsatzes ist in [128] zu finden.

Auf dem Chip sind zwei Arten von Speicher untergebracht. Der interne Datenspeicher (*Internal Data Memory*) mit einer Größe von 64 kB ist in zwei Blöcken mit je acht Speicherbanken orga-

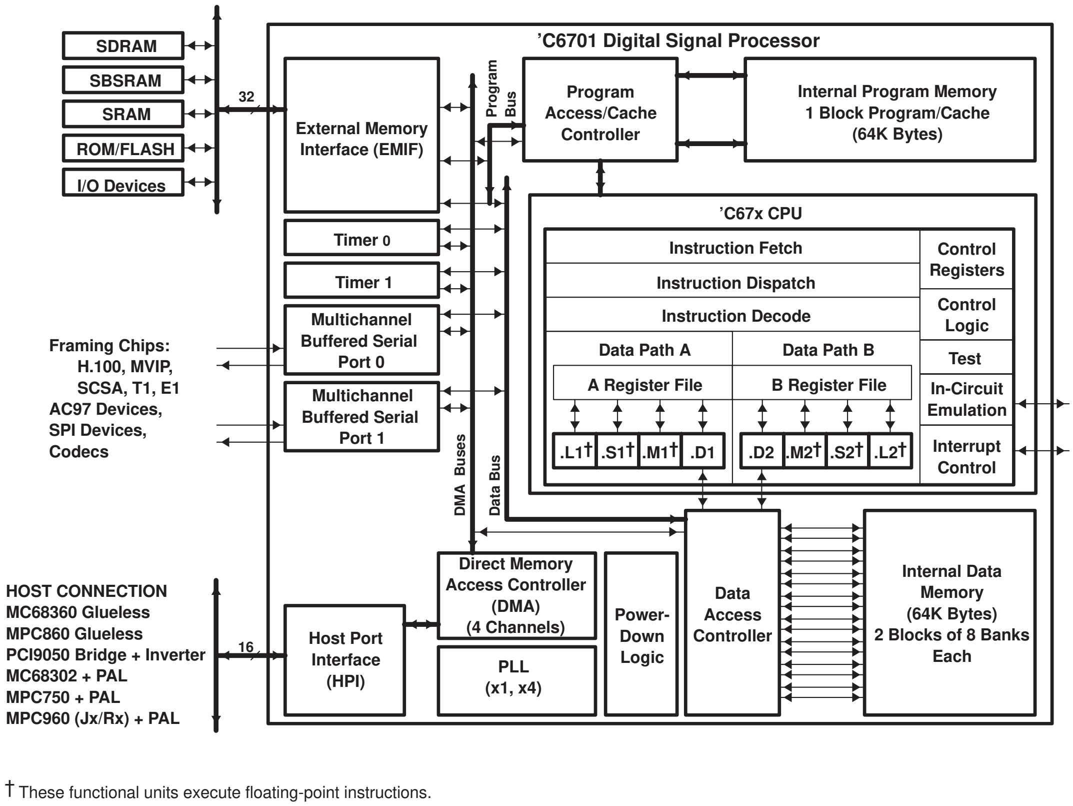


Abbildung 6.9: Blockschaltbild des TMS320C6701 Floatingpoint-DSPs von TexasInstruments. Die acht Funktionseinheiten für Rechenoperationen sind mit .L1, .S1, .M1, .D1, .D2, .M2, .S2 und .L2 bezeichnet. Quelle [127].

nisiert. Die Größe des Speicherbereichs für Programmcode (*Internal Program Memory*) beläuft sich auf ebenfalls 64 kB.

Für die Ein- und Ausgabe von Daten werden auf dem MPB der *DMA-Controller* sowie das *External Memory Interface (EMIF)* genutzt.

6.7 Das Messagesystem

Ein flexibler Versand von Information auch über viele MPBs hinweg wurde durch die Einführung eines Messagesystems [129] erreicht. Dieses System soll es ebenfalls ermöglichen, das MPB in allen seinen Funktionen zu testen. Daher werden Messages sowohl zum Transport von Daten als auch zur Steuerung der auf dem MPB implementierten Applikationen genutzt.

6.7.1 Kanalnummern

Ein wichtiges Konzept innerhalb des Messagesystems ist die Nutzung eines Schemas von Kanalnummern. Ausgesuchte Kanalnummern sind für spezielle Anwendungen vorgesehen. Dabei muß zwischen *statischen* und *dynamischen* Kanalnummern unterschieden werden. Die statischen Kanalnummern stehen beim Start des Systems fest und können während des Betriebs nicht geändert werden. Die dynamischen Kanäle werden erst im laufenden Betrieb konfiguriert, indem die bereits initialisierten statischen Kanalnummern zur Kommunikation genutzt werden. Insgesamt sind 512 Kanalnummern vorgesehen, was eine ausreichende Flexibilität sicher stellt. Der Kanal 0 ist ungültig. Der Kanalbereich 1–127 ist für statische Verbindungen vorgesehen, der restliche Kanalbereich kann dynamisch genutzt werden.

Auch zur Kommunikation zwischen Komponenten auf einem MPB selbst werden statische Kanäle benutzt. Die Komponenten, die Messages empfangen und versenden können, sind die vier DSPs, der DSP-Controller, der Data-Controller, das VME-Interface sowie die FPGAs auf den LVDS-Piggyback-Karten. Auf einem MPB kann zurückverfolgt werden, woher eine Message gekommen ist, da der Absender in der Kanalnummer kodiert ist. Dabei werden die niedrigsten drei Bit der Kanalnummer folgendermaßen benutzt:

0 : vom DSP-Controller
1 : vom Data-Controller
2 : von einem PiggyBack-FPGA
3 : von einem der DSPs
4 : vom Host (JTAG oder VME)
5 : unbenutzt
6 : unbenutzt
7 : vom VME-Interface (sehr ähnlich zu 4)

Wird also zum Beispiel von einem DSP eine Message auf Kanal 104 empfangen[9], war der Absender der DSP-Controller auf dem selben Board.

Die dynamischen Kanalnummern sind entsprechend der Aufgaben, für die sie vorgesehen sind, gruppiert:

128–223: Frei nutzbare Punkt-zu-Punkt-Verbindungen

224–255: An alle 24 Fitter-DSPs
(z.B. Senden eines Triggersignals)

256–383: 5×24 Kanäle zwischen Linker und 24 Fitter-DSPs
1: Segmente für Spuren vom Primärvertex
2: Segmente für Spuren von Sekundärvertices (Option)
3–5: noch nicht benutzt

384–511: 5×24 Kanäle von den Fitter-DSPs zur L2-Decision-Karte
1: Spuren vom Primärvertex
2: Spuren von Sekundärvertices (Option)
3–5: noch nicht benutzt

[9] Binärdarstellung: $104_{10} = 1101000_2$

6.7.2 Message-Routing

Jede der Komponenten auf einem MPB (FPGAs, DSPs und VME-Interface) hat eine sogenannte *Routingtabelle*, die die nötigen Informationen enthält, um Messages, die für andere Komponenten bestimmt sind, zum richtigen Ziel weiter zu leiten. Sollen etwa von einem DSP Daten, die in Form von Messages vorliegen, an einen anderen DSP geschickt werden, muß dies über den DSP-Controller erfolgen, weil es keine direkte Verbindung zwischen den DSPs auf dem Board gibt.

Die Routingtabellen für statische Kanäle müssen für alle Komponenten im Quellcode für die Chipprogrammierung initialisiert werden. Die Routingvorschriften für dynamische Kanäle können während des Betriebs manipuliert werden, indem entsprechende Messagesequenzen benutzt werden.

Für die Zusammenstellung konsistenter Routingtabellen für alle Komponenten wurde eine Software entwickelt, die den Quellcode der statischen Routingtabellen für die Chipprogrammierung erzeugt und die Messagesequenzen generiert, die für die Konfiguration des dynamischen Teils zuständig sind [130]. Über eine graphische Benutzeroberfläche können die gewünschten Konfigurationen leicht zusammen gestellt werden.

6.7.3 Format der Messages

Die Länge von 48 Bits für eine Message ist durch die Breite der LVDS-Verbindung vorgegeben. Dabei werden die Bits folgendermaßen genutzt:

Bits	47	46 ... 38	37 ... 32	31 ... 0
Belegung	Parität	Kanal	"Special-Bits"	Daten

Das höchste Bit dient zur Paritätsprüfung, die in jedem FPGA, der die Message weiter schickt, durchgeführt wird. Dazu wird ein Paritätsbit durch eine XOR-Operation über die neun Bits der Kanalnummer gebildet. Sollte eine Inkonsistenz aufgedeckt werden, muß von einem Übertragungsfehler ausgegangen werden, und die entsprechenende Message wird an eine spezielle Fehlerstelle geschickt.

Neun Bits werden zur Kodierung der Kanalnummern 0–511 benötigt. Die sechs Special-Bits charakterisieren die Art der Message. Damit können bis zu 64 verschiedene Messagearten für jede Komponente definiert werden, was eine ausreichende Flexibilität garantiert. Der eigentliche Inhalt der Message ist in 32 Bits kodiert.

Für die Übertragung von Spursegmentdaten bzw. Spurdaten wurde das obige Schema leicht abgeändert, damit alle Daten eines Segments oder einer Spur in einer Message verpackt werden können. Die Identifizierung erfolgt ausschließlich über die Kanalnummer, da auch die "Special-Bits" mit Informationen über die Spurdaten belegt werden. Abbildung 6.10 zeigt die genaue Zuordnung der Bits innerhalb einer solchen Message. Für Segmente, die zwischen dem Linker und den Fitter-DSPs verschickt werden, wird der Kanalbereich 256–383 benutzt. Die Fitter-DSPs versenden die rekonstruierten Spuren über die Kanäle 384–511 zur Decision-Karte.

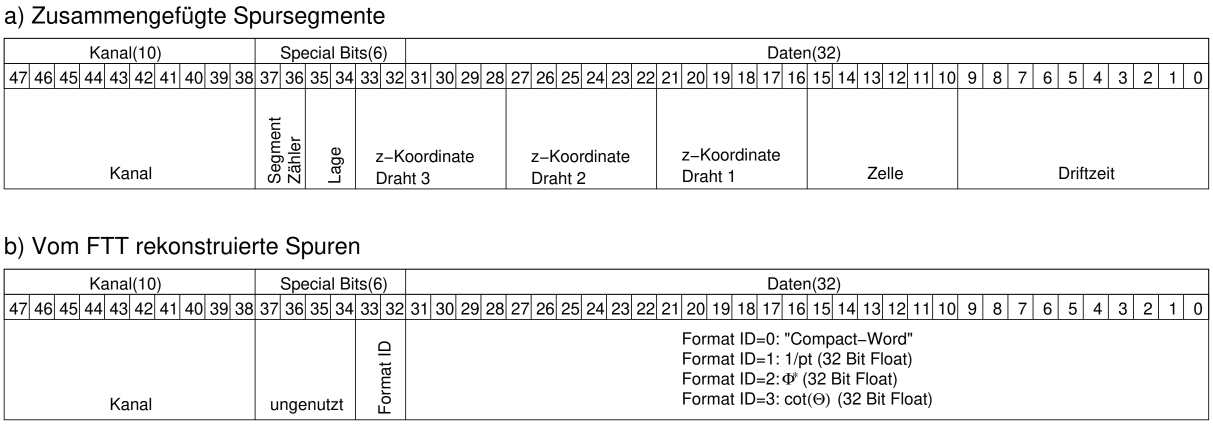


Abbildung 6.10: Belegung der Bits in einer Message, die a) Daten eines Spursegments oder b) Daten einer vom FTT rekonstruierten Spur enthält.

6.7.4 Schneller Datentransfer zwischen FPGA und DSP

Entscheidend für eine hohe Leistung der zweiten Stufe des FTT ist der schnelle Transfer der Daten. Hier soll der Datenaustausch zwischen dem DSP-Controller und den DSPs näher beschrieben werden, der für eine zügige Abarbeitung der Spurfits wichtig ist.

Alle Messages haben eine Größe von 48 Bit. Der Datenbus des DSPs ist jedoch nur 32 Bit breit, so daß es nötig ist, die Messages in zwei Teile zu zerlegen, wenn ein DSP Daten aus dem DSP-Controller lesen soll. Umgekehrt werden Messages, die vom DSP in den DSP-Controller geschrieben werden, hier wieder zusammen gesetzt. Die Anbindung der vier DSPs an den DSP-Controller ist schematisch in Abbildung 6.11 gezeigt. Die *Message-Unit* im DSP-Controller kommuniziert über vier *Message-IO-Units* mit den vier DSPs. Eine genaue technische Beschreibung befindet sich in [131].

Message-Transfer vom DSP-Controller zum DSP

Erhält der DSP-Controller eine Message, die für einen der an ihn angeschlossenen DSPs bestimmt ist, wird die Message an die betreffende Message-IO-Unit übergeben. Anhand der Kanalnummer wird entschieden, ob es sich um Messages mit Kontrollcharakter oder um Daten, wie etwa Spursegmente, handelt. Messages mit Kanalnummern größer als 255 gelten als Daten und werden in das *TrackSegment-FIFO* geschrieben. Durch diese Aufteilung wird sicher gestellt, daß eine Sequenz aus Messages mit Dateninhalt nicht durch eine Kontroll-Message unterbrochen wird.

Nach einem definierten Schema wird eine 48 Bit breite Message in zwei 32-Bit-Teilstücke zerlegt (*Split-Unit*). Abbildung 6.12 zeigt die Vorschrift, wie die ursprüngliche Message aufgeteilt wird. Ein Bit in jeder Teil-Message signalisiert, ob es sich um dem ersten Teil (Word A) oder den zweiten Teil (Word B) handelt. Weiterhin wird ein Bit verwendet, um eine Teil-Message als gültig (valid) zu definieren. Dadurch wird dem DSP signalisiert, daß alle Bits einer Teil-Message auf dem Datenbus richtig gesetzt sind und nun vom DSP eingelesen werden können. Sind bei-

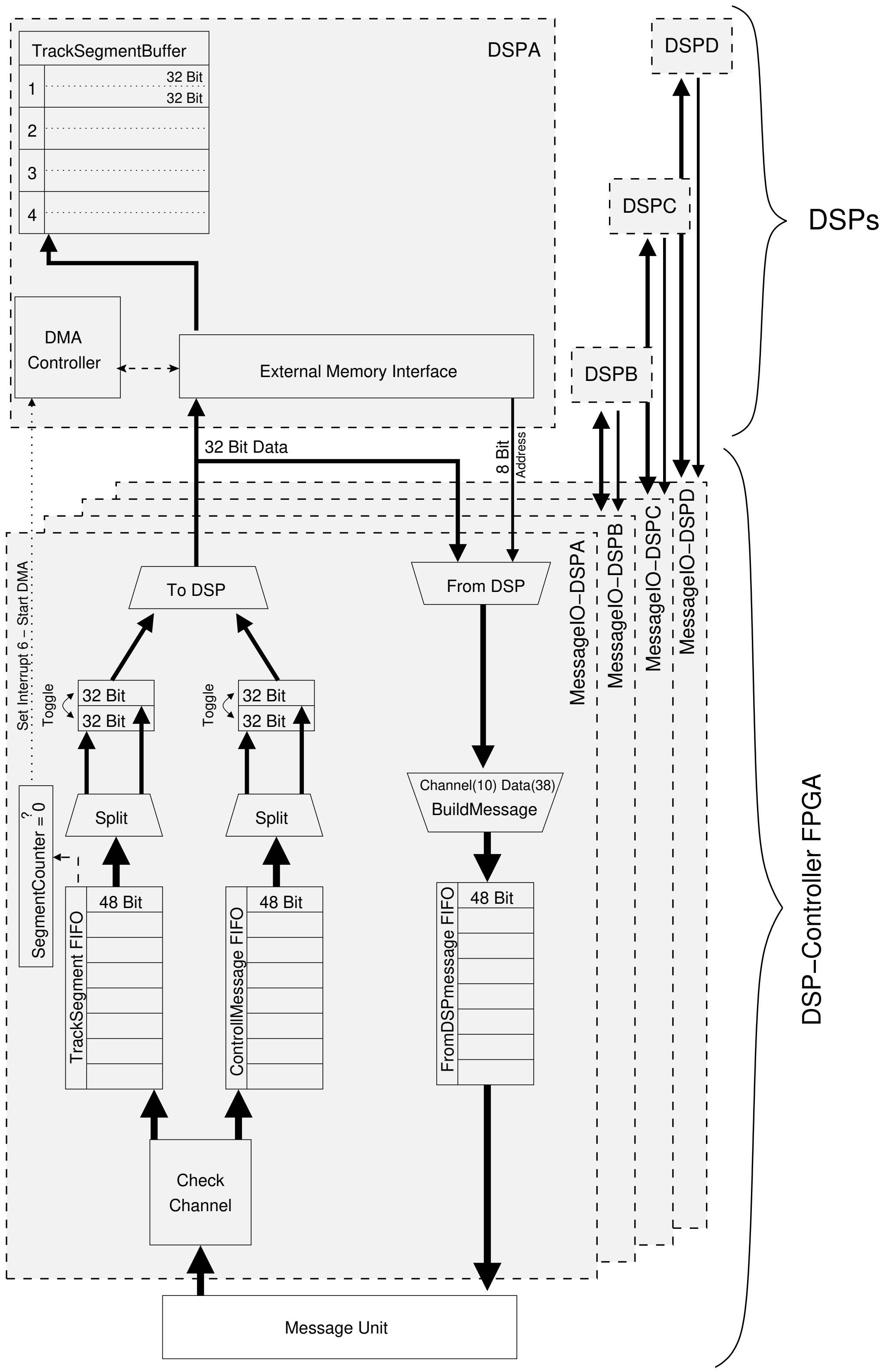


Abbildung 6.11: Schematische Darstellung der Anbindung der vier DSPs an den DSP-Contoller-FPGA. Für den DSP A ist die Verbindung detailierter gezeigt. Weitere Erläuterungen siehe Text.

de Teile eingelesen, wird das Message-FIFO weiter geschaltet, und die nächste Message wird zerteilt und so fort. Mit diesem Mechanismus können n Messages in $2 \cdot n$ Zyklen an den DSP übertragen werden.

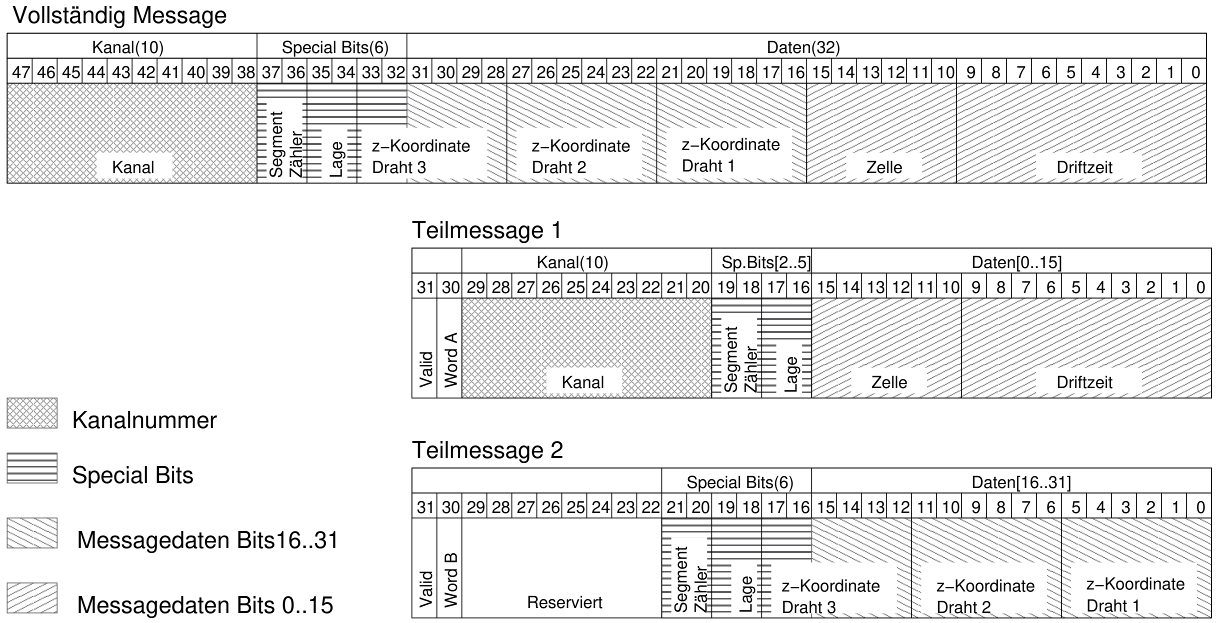


Abbildung 6.12: Aufteilung einer 48-Bit breiten Message in zwei Teil-Messages zum Transfer vom DSP-Controller-FPGA zum DSP.

Das Aufteilungsschema einer Message auf zwei Teil-Messages ist durch ein möglichst schnelles und unkompliziertes "Auspacken" der Spursegmentdaten motiviert. Dadurch können Informationen der ersten Teil-Message bereits bearbeitet werden, noch bevor die zweite Teil-Message vom DSP gelesen worden ist. Dabei konnte nicht vermieden werden, daß die 6 Bits für die z-Komponente des dritten Drahtes auf die Special-Bits und die Daten-Bits verteilt wurden (siehe Abbildung 6.12).

Der schnellen Übertragung der Spursegmentdaten wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Eine besonders schnelle Übertragung wird durch einen "direkten Speicherzugriff", im folgenden mit dem Fachbegriff DMA (Direct Memory Access) bezeichnet, möglich. Die DMA-Datenübertragung erfolgt ohne Intervention der DSP-CPU. Der DSP-Controller analysiert bei allen Messages im Segment-FIFO die beiden Bits das *Segmentzählers* (siehe Abbildung 6.10a). Falls eine Message, bei der der Segmentzähler Null ist, im FIFO gelesen wird, sind alle Segmente eingetroffen. Über eine spezielle Interruptleitung wird dann die DMA-Übertragung ausgelöst.

Auf Seiten des DSPs gibt es ein vorbereitetes Array (*TrackSegmentBuffer*), das speziell für die Aufnahme der Segmentdaten aus der DMA-Übertragung vorgesehen ist. Da maximal vier Spursegmente zu einer Spur zusammengefügt werden, können im TrackSegmentBuffer maximal acht Teil-Messages aufgenommen werden.

Damit die Daten aus dem TrackSegmentBuffer möglichst schnell weiter verarbeitet werden können, wird kurz bevor die Spursegmentdaten erwartet werden eine *Polling*-Methode gestartet. Dabei wird fortwährend das Valid-Bit einer Teil-Message abgefragt, und der Transfer vom Speicher zum CPU-Register gestartet, sobald das Valid-Bit gesetzt ist. Das Laden von Daten aus dem TrackSegmentBuffer in ein CPU-Register dauert 4 CPU-Zyklen (siehe Tabelle 6.1). Während eine Teil-Message geladen wird, können die CPU-Zyklen bereits genutzt werden, die Bitmuster einer anderen Teil-Message zu entpacken. Damit eine optimale Nutzung der CPU-Register gewährleistet ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Vorgang vollständig in der DSP-Assemblersprache programmiert.

Ausgangspunkt für diese Arbeiten war ein minimaler Rahmen zum Einlesen der ersten Message, der in [132] beschrieben ist. Es werden zwischen 70 und 100 ns gemessen, die zwischen dem Zeitpunkt vergehen, in dem das Valid-Bit gültig wird, und dem CPU-Zyklus, in dem die Bitmuster der Teil-Messages in den CPU-Registern stehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die volle Funktionalität für den flexiblen Transfer von bis zu vier Spursegment-Messages hergestellt. Weiter sind die nötigen Funktionen implementiert worden, die die Informationen aus den Spursegment-Messages so aufbereiten, daß sie in einer für den Fitalgorithmus geeigneten Form vorliegen. Der Spurfitalgorithmus benötigt als Eingabewerte die Koordinaten der Raumpunkte als Gleitkommazahlen. Daher müssen die Informationen zunächst aus den Messages extrahiert werden. Die x- und y-Koordinaten werden aus der Triggerlage, der Zellnummer und der Driftstrecke sowie mit Hilfe einer Kalibrationstabelle, die die Ortskoordinaten der einzelnen Triggergruppen und die zugehörigen Driftvektoren enthält, berechnet. Die Kalibrationsdaten werden hierzu lokal in jeden der DSPs geladen. Der Berechnungsvorgang ist völlig analog zur Vorgehensweise in der Simulation, siehe Formel 5.7 in Kapitel 5. Da die Gleitkommaoperationen vier CPU-Zyklen benötigen, ist eine optimale Nutzung der Register wichtig, damit wenigstens einige Berechnungen parallel durchgeführt werden können. Daher ist auch dieser Teil der DSP Software vollständig in Assembler programmiert worden.

Message-Transfer vom DSP zum DSP-Controller-FPGA

Vom DSP versandte Messages beinhalten auf dem DSP berechnete Werte oder Statusmeldungen. Es muß ein Weg gefunden werden, die 48 Bit breiten Messages über den 32 Bit breiten Datenbus des DSP zu senden. Da vom DSP ausgehend die zeitkritischen Messages meist über den selben Kanal verschickt werden, wurde eine andere Variante zum Aufteilen einer Message benutzt als zum Einlesen von Messages in den DSP. Abbildung 6.13 zeigt die Vorschrift für die Aufteilung, wenn eine Message den DSP verlassen soll. Der erste Teil enthält die 10 Bits der Kanalnummer (einschließlich Parity-Bit). Der zweite Teil enthält die 32-Bit breite Dateninformation und die sechs Special-Bits.

Im ersten Schritt schreibt der DSP die Kanalnummer in einen definierten Speicherbereich CE2[10] Der zweite Teil der Message wird in einen Speicherbereich CE3 geschrieben, wobei die Special-Bits auf sechs der acht Adressleitungen gegeben werden. Der DSP-Controller-FPGA ist so programmiert, daß nach dem Einlesen einer Kanalnummer die Adressleitungen für die Übertragung der Special-Bits genutzt werden können[11]. Sollen weitere Daten (und Special-Bits) an den selben Kanal geschickt werden, muß die Kanalnummer nicht erneut übertragen werden.

[10] Die Bezeichnungen der Speicherbereiche folgen der Dokumentation des Herstellers [133]. Hier finden sich detaillierte Angaben zum *External Memory Interface (EMIF)* und die Anbindung von FPGAs.

[11] Nebenbemerkung: Wegen der besonderen Übertragung kamen die Special-Bits zu ihrem Namen.

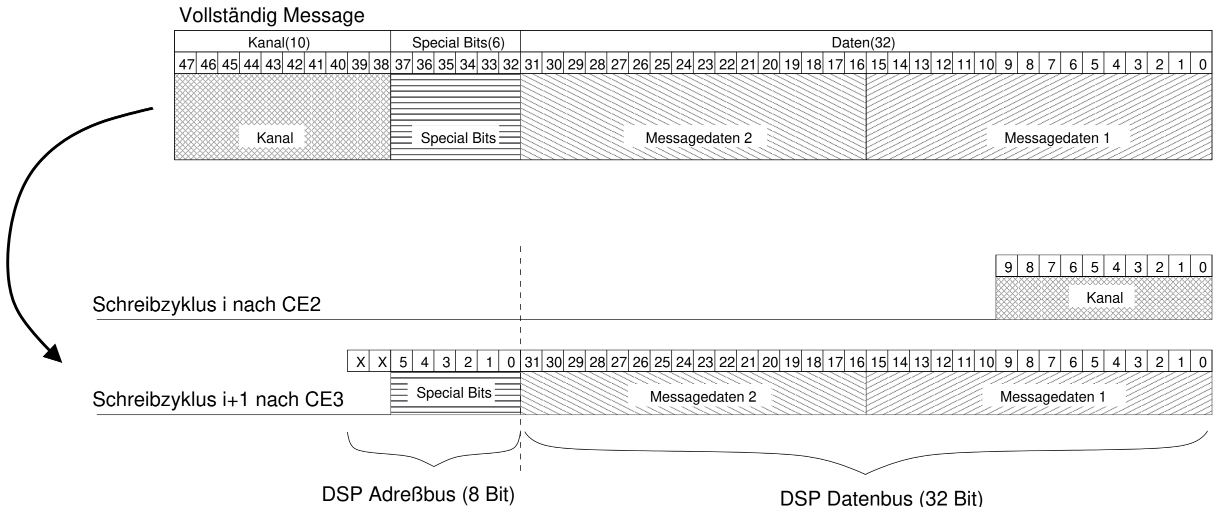


Abbildung 6.13: Übertragung von Messages vom DSP zum DSP-Controller-FPGA. Im ersten Zyklus schreibt der DSP die Kanalnummer in den Adressbereich CE2. Die Daten der Message werden im nächsten Zyklus nach CE3 geschrieben.

Folglich ist es auf diese Weise möglich, n Messages auf einem Kanal in $(n+1)$ Zyklen zu übertragen.

6.8 Portierung von Fitalgorithmen auf den DSP

Die Umsetzung des nicht iterativen Kreisfitalgorithmus im H1-Rekonstruktionsprogramm `H1REC` folgt exakt den Vorgaben in [96]. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf numerische Stabilität und Präzision der Ergebnisse gelegt. Außerdem soll der Algorithmus für verschiedenste Konfigurationen (z. B. viele oder wenige Meßpunkte) gute Ergebnisse liefern.

Für die Anwendung im FTT sind eine schnelle Ausführung bei immer sehr ähnlichen Meßpunktkonfigurationen wichtig. Eingangsgrößen sind drei bis fünf (x, y)-Wertepaare, wobei ein Wertepaar die Position des Vertex ist. Bei erheblicher Steigerung in der Bearbeitungsgeschwindigkeit sind Näherungen akzeptabel, die das Ergebnis deutlich weniger beeinflussen als die Auflösung.

Grundsätzlich gilt, daß im Prozessor Additionen und Multiplikationen sehr schnell durchgeführt werden können (siehe Tabelle 6.1). Division, das Ziehen von Wurzeln und Anwendung von Winkelfunktionen hingegen brauchen in ihrer Standardimplementierung leicht 100 und mehr Prozessortaktzyklen zur Berechnung, weshalb diese Operationen wenn irgendmöglich vermieden werden sollten. Weil in den Spurfitalgorithmen viele Gleitkommaoperationen durchzuführen sind, wurde entschieden, die Floatingpoint-Variante des DSPs einzusetzen.

Zur geschwindigkeitsoptimierten Implementierung der Fitalgorithmen wurden zwei Bereiche im Rahmen dieser Arbeit untersucht, die in den nächsten Unterkapiteln eingehender diskutiert werden:

- Optimale Nutzung des DSPs
  Durch geeignete Programmiertechnik und das Nutzen besonderer Leistungsmerkmale kann die Ausführung von bestimmten Routinen erheblich gesteigert werden.

- Modifikationen der Algorithmen
  Für den FTT sollen die Algorithmen in erster Linie schnell ablaufen. Die Algorithmen bieten Möglichkeiten, an einigen Stellen zeitkritische Operationen durch Näherungen zu ersetzen.

6.8.1 DSP-optimierte Implementierung zeitkritischer Operationen

Zur Entwicklung einer für den DSP optimierten Version der Fitalgorithmen wurde die Entwicklungsumgebung des Herstellers [134] verwendet. Diese Werkzeuge umfassen einen Compiler für C und C++, sowie einen DSP-Simulator, mit dem die Laufzeit von Algorithmen detailiert analysiert werden kann.

Die Dokumentation des Herstellers [135] gibt zahlreiche Hinweise, wie die Geschwindigkeit von Programmen verbessert werden kann. Durch Befolgen einiger Richtlinien kann der Compiler wesentlich effizienteren Assemblercode erzeugen. Ferner kann durch geeignete Kombination von Compileroptionen das Resultat weiter verbessert werden. Anhand des erzeugten Assemblercodes kann geprüft werden, ob der DSP seine Ressourcen optimal nutzt. Pro Taktzyklus sollten, wenn möglich, mehrere Functional-Units eine Berechnung ausführen.

Die Floatingpoint-Version C6701 der C6000 Serie besitzt unter anderem besonders schnelle Funktionen zur groben Berechnung von $1/x$, $1/\sqrt{x}$. Bei der Anwendung dieser sogenannten *Intrinsics* ist zu beachten, daß die Ergebnisse sehr grob sind. Eine ausreichende Genauigkeit kann durch nachfolgende Iterationsschritte erreicht werden. Für die untersuchten Algorithmen hat sich gezeigt, daß mit ein oder zwei Schritten eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann, während die Rechenzeit etwa einen Faktor zwei schneller ist als bei optimierten Implementierungen [136, 137]. Im Vergleich zur Standardbibliothek des DSPs gewinnt man fast einen Faktor 10.

6.8.2 Anpassung des Kreisfitalgorithmus

Die Spurfits sollen in etwa der Hälfte der L2-Latenzzeit ablaufen. In einer Zeit von etwa 10 µs sollen vom DSP zwei Fits durchgeführt werden können. Daher wurde versucht, den Kreisfit so lange zu optimieren, bis seine Laufzeit im Bereich von 2 µs liegt. Dazu wurde ein Satz von Ortskoordinaten von Spursegmenten verwendet, die mit FTTEMU (siehe Kapitel 5) bestimmt wurden. Der Originalalgorithmus [96] wurde dann schrittweise für schnelle Ausführung optimiert, wobei die Ergebnisse stets mit der Referenzimplementierung ohne Näherungen oder spezielle DSP-Funktionen verglichen wurden.

In [96] wird eine Koordinatentransformation empfohlen, bei der alle Abstände in Bezug zum ersten Meßpunkt gemessen werden. Dadurch wird eine verbesserte numerische Stabilität erreicht, falls etwa alle Meßpunkte weit vom Koordinatenursprung entfernt liegen. Im Falle des FTT hat sich gezeigt, daß der Algorithmus auch ohne diese Transformation verwendet werden kann. Daher wurde entschieden, die Transformation nicht durchzuführen.

Im Originalalgorithmus [96] wird als Ergebnis der Winkel Φ berechnet. Man kann die Anwendung trigonometrischer Funktionen im Algorithmus vermeiden, wenn man stattdessen $\sin(\Phi)$ und $\cos(\Phi)$ ermittelt. Das hat gleichzeitig den Vorteil, daß die Transversalimpulskomponenten p_x und p_y direkt berechnet werden können.

Nach Gleichung 4.18 gilt für Φ:

$$\Phi = \tfrac{1}{2}\arctan(2q_1/q_2).$$

Die Variablen q_1 und q_2 sind in Kapitel 4.3.4 definiert. Obige Gleichung kann umgeschrieben werden als:

$$\begin{aligned} \sin(\Phi) &= \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\frac{q_2}{Q}}, && (6.1)\\ \cos(\Phi) &= \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{q_2}{Q}}, && (6.2)\\ \text{mit } Q &= \sqrt{4q_1^2 + q_2^2}. \end{aligned}$$

In der Berechnungsformel für die Krümmung[12] kann eine Taylorentwicklung durchgeführt werden, wodurch die Berechnung einer Wurzel entfällt. Es gilt:

$$\kappa_{\text{exakt}} = -2\beta \cdot \frac{1}{\sqrt{1-4\delta\beta}}\,; \tag{6.3}$$

mit $\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{1}{2}x + \mathcal{O}(x^2),\ x < 1$ kann man in guter Näherung schreiben:

$$\kappa = -\beta(2 + 4\delta\beta)\,. \tag{6.4}$$

Die Berechnung des Abstandes zum Ursprung d_{ca} wurde aus dem Algorithmus entfernt, ebenso wie die Bestimmung von χ^2, da beide Größen im FTT nicht berücksichtigt werden.

Ein komplettes Listing des benutzten C-Codes ist Anhang A.1 zu finden.

Nach Durchführung aller genannten Schritte wurde schließlich eine Optimierung gefunden, die gewünschten Vorgaben hinsichtlich Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit erfüllt. Abbildung 6.14a und b zeigen einen Vergleich zwischen der Berechnung von $\sin(\Phi)$ und $\cos(\Phi)$ mit dem DSP-Simulator und der Referenzimplementierung. Die Breite der Verteilung ist für beide Größen etwa $2{,}5\cdot 10^{-5}$ (RMS). Der aus $\sin(\Phi)$ oder $\cos(\Phi)$ berechnete Wert für den Winkel Φ ist in Abbildung 6.14c dargestellt. Die ermittelte Breite der angepaßten Gausskurve beträgt 0,03 mrad und ist damit um etwa einen Faktor 100 kleiner als die Φ-Auflösung des FTT (siehe Abbildung 5.16). In Abbildung 6.14d sind das vom DSP berechnete κ und das Referenz-κ verglichen. Die Breite der angepaßten Gausskurve ist $3{,}8\cdot 10^{-7}\,\text{cm}^{-1}$. Dieser Fehler erzeugt in der Berechnung von $1/p_t$ einen Fehler von 0,01%, der Größenordnungen kleiner ist als die (inverse) Impulsauflösung des FTT.

[12] In [96] und bei H1 werden unterschiedliche Konventionen für das Vorzeichen von κ verwendet, weshalb sich die Formeln 6.3 und 4.18 um den Faktor -1 unterscheiden.

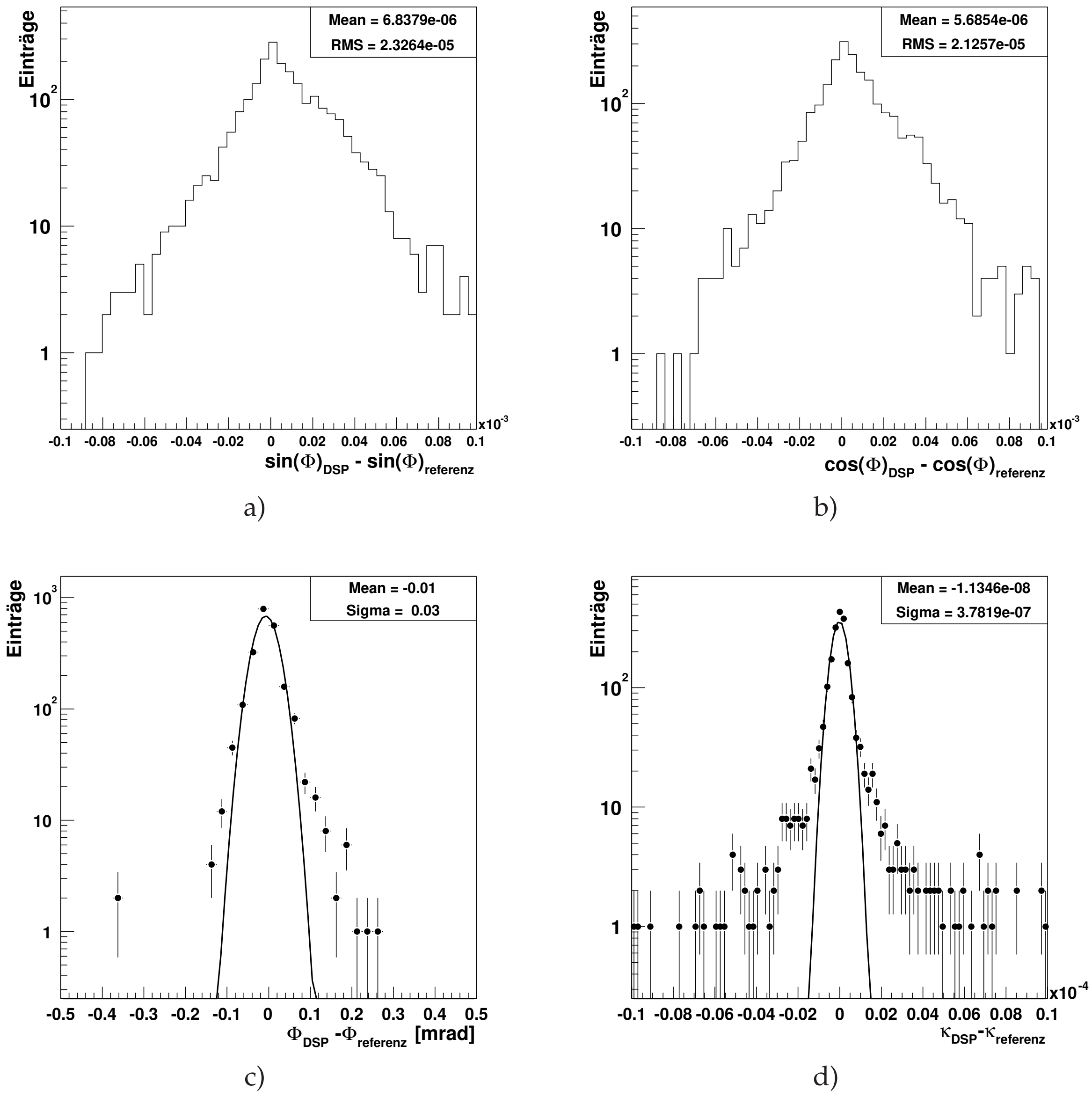


Abbildung 6.14: Vergleich von Spurparametern. Gezeigt ist die Abweichung des geschwindigkeitsoptimierten DSP Fitalgorithmus von der Referenzimplementierung. Teile a) und b) zeigen $\sin(\Phi)$ und $\cos(\Phi)$. In c) und d) sind die Abweichungen durch die optimierte Implementierung in Φ und κ dargestellt.

In Tabelle 6.2 sind die benötigen Berechnungszyklen aufgelistet. Die ermittelte Laufzeit von 2 µs erfüllt die Anforderungen.

xy-Werte	CPU-Zyklen	Berechnungszeit [µs]
3 (2 Segmente+Vertex)	319	1,9
4 (3 Segmente+Vertex)	324	1,9
5 (4 Segmente+Vertex)	329	2,0

Tabelle 6.2: Laufzeit des Kreisfitalgorithmus auf einem Floating-Point-DSP C6701 bei 167 MHz.

6.8.3 Optimierung des rz-Fits

Zur Bestimmung des Winkels Θ wird an die Wertepaare (s_i, z_i) eine Gerade angepaßt. Die Werte z_i sind z-Messungen auf den einzelnen Drahtlagen und die Werte s_i sind die Spurlängen bis zum Punkt i. Dabei ist zu beachten, daß s nur einmal pro Spursegment berechnet wird, während pro Spursegement drei z-Meßwerte berücksichtigt werden. Abbildung 6.15 zeigt schematisch die Situation.

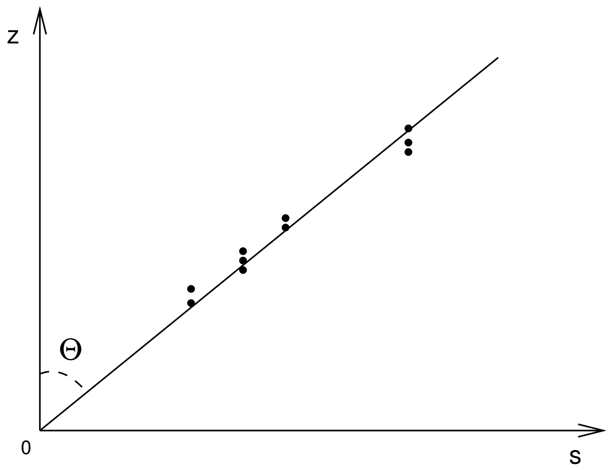


Abbildung 6.15: Veranschaulichung des rz-Fit. Pro Triggergruppe gibt es zu einer Spurlänge s bis zu drei z-Werte.

Für die Bestimmung der Ausgleichsgeraden (siehe Kapitel 4.3.4) muß folgende Gleichung gelöst werden:

$$\frac{1}{n}\sum_i z_i = a\frac{1}{n}\sum_i s_i + b \tag{6.5}$$

Man kann die Berechnung etwas beschleunigen, indem man alle Meßpunkte z_i um die z-Position des Vertex (z_0) verschiebt und verlangt, daß die Ausgleichsgerade durch den Koordinatenursprung geht. Gleichung 6.5 vereinfacht sich dann zu:

$$a = \frac{\sum_i (z_i - z_0)}{\sum_i s_i} \; . \tag{6.6}$$

Der Winkel Θ ist der Winkel, den die Ausgleichsgerade mit der z-Achse einschließt, so daß folgt:

$$a = \tan(\frac{\pi}{2} - \Theta) = \cot(\Theta) = \frac{\sum_i (z_i - z_0)}{\sum_i s_i} \ . \tag{6.7}$$

Die exakte Berechnung der Spurlänge s_i ist im DSP sehr aufwendig, da eine trigonometrische Funktion, Wurzeln und eine Division auftreten:

$$s_i = \frac{\arcsin\left(\kappa D_i \sqrt{1 - (\frac{1}{2}\kappa D_i)^2}\right)}{\kappa} \ , \tag{6.8}$$

mit

$$D_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \ ,$$

wobei x_i und y_i die xy-Koordinaten des Punktes i sind.

Gleichung 6.8 läßt sich jedoch in einer Taylorreihe entwickeln.
Mit $\arcsin\left(X\sqrt{1 - \frac{1}{4}X^2}\right) = X(1 + \frac{1}{24}X^2 + \mathcal{O}(X^4))$ für $X = \kappa D_i$ folgt

$$s_i \approx D_i + \frac{D_i^3 \kappa^2}{24} \ . \tag{6.9}$$

Der Betrag des zweiten Terms zur Summe ist für Spuren mit kleinem Transversalimpuls am größten bleibt jedoch unter 10%. Daher wird der Term zu Gunsten eines schnelleren Algorithmus vernachlässigt.

Neben den genannten Näherungen wurden für die Berechnungen der Wurzeln sowie die Divisionen spezielle auf Intinsics basierende Implementierungen verwendet. Ein Vergleich der für Θ ermittelten Werte ist in Abbildung 6.16 zu sehen. Die Abweichung aufgrund der Näherungen liegt bei etwa 0,13 mrad und kann gegenüber der limitierten Θ-Auflösung von etwa 80 mrad (siehe Kapitel 5.3.5) vernachlässigt werden. Die mit dem DSP-Simulator bestimmten Laufzeiten für den rz-Fit sind in Tabelle 6.3 zusammengestellt.

z-Werte	CPU-Zyklen	Berechnungszeit [µs]
6 + Vertex	111	0,7
9 + Vertex	145	0,9
12 + Vertex	188	1,1

Tabelle 6.3: Laufzeit des rz-Fits auf einem Floatingpoint-DSP C6701 bei 167 MHz.

Im Anhang befindet sich ein Listing, das die für den DSP optimierte Implentierung des rz-Fits in der Programmiersprache C zeigt.

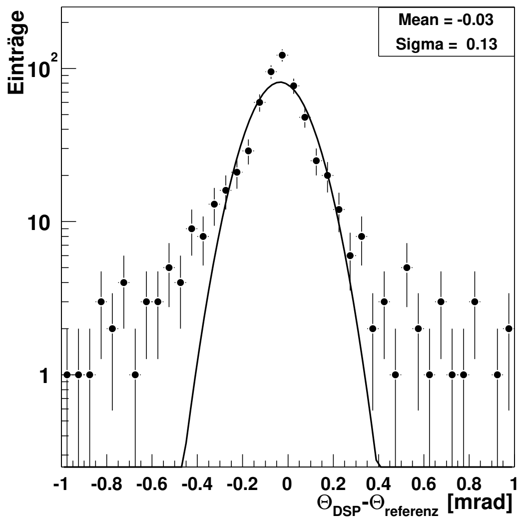


Abbildung 6.16: Vergleich zwischen Referenzimplementierung des *rz*-Fits und der geschwindigkeitsoptimierten DSP-Implementierung.

6.9 Abschließende Bemerkungen zum Status der Hardwarerealisierung

Die Implementierung der zur Realisierung des FTT-Konzepts notwendigen Algorithmen in schnellen Chips ist größtenteils abgeschlossen. Die Laufzeit sowie der Ressourcenverbrauch wurde mit den Entwicklungswerkzeugen der Hersteller eingehend studiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Spurfitalgorithmen detailiert analysiert, wodurch wichtige Erkenntnisse zum Zeitverhalten der zweiten Stufe des FTT gewonnen werden konnten. Tabelle 6.4 zeigt eine Aufstellung aller Aufgaben, die der FTT auf der zweiten Stufe verrichtet. Bei den konservativ vorgenommenen Abschätzungen wurde von kleinen Testimplementierungen auf das Gesamtsystem geschlossen oder die Zahl der nötigen Schritte berechnet.

Auf Prototypen der Hardwarekomponenten konnten die in der Simulation entwickelten Algorithmen implementiert und untersucht werden. Im Falle des MPB wurden im Rahmen dieser Arbeit der schnelle Datentransfer zwischen DSP und FPGA und die Ausführung von Spurfits unter Verwendung des Messagesystem erfolgreich getestet.

Ende 2002 liegt ein Großteil der Serienproduktion aller Hardwarekomponenten vor. Nachdem die meisten zentralen Algorithmen ihre Einzeltests überstanden haben, liegt nun das Hauptaugenmerk auf dem Aufbau immer komplexer Teilsysteme des FTT. Ziel ist, nach dem Frühjahrs-Shutdown 2003 mit dem FTT erste Ereignisse zu triggern.

Aufgabe	Methode	Zeit [µs]	Summe
Auffinden von 80 MHz-Segmenten	Simulation	0,3	0,3
Merger-Verzögerung	Abschätzung	0,2	0,5
Linker (max.)	Simulation	7,9	8,7
Datentransport & -formatierung	Abschätzung	0,4	9,1
Kreisfit I	Simulation	3,0	12,1
rz-Fit I	Simulation	1,1	13,2
Kreisfit II	Simulation	3,0	16,2
rz-Fit II	Simulation	1,1	17,3
Datentransport & -formatierung	Abschätzung	0,4	17,7
Verbleibende Zeit für L2-Triggerentscheidung		$\approx 2{,}1$	19,8

Tabelle 6.4: Laufzeiten für die verschiedenen Aufgaben, die in der Latenzzeit der zweiten Triggerstufe erfüllt werden müssen. Die Angaben sind jeweils die maximalen Laufzeiten.

Zusammenfassung

Nach dem umfangreichen Upgrade-Programm des HERA-Speicherrings und des H1-Experiments wird sich das Physikprogramm bei HERA-II vor allem auf Bereiche konzentrieren, die bisher statistisch limitiert sind. Dazu zählen einerseits die *ep*-Streuung bei höchsten Impulsüberträgen sowie die weitere Suche nach Physik jenseits des Standardmodells und andererseits die Analyse exklusiver beziehungsweise semi-inklusiver Endzustände der *ep*-Streuung.

Durch die gestiegene Luminosität des Beschleunigers erhöhen sich die Ereignisraten in den Experimenten so sehr, daß es unmöglich ist, alle *ep*-Ereignisse zu registrieren. Deshalb muß die Ereignisselektion auf Triggerniveau verbessert werden. Die Ereignisse werden im H1-Experiment von einem vierstufigen Triggersystem bearbeitet, in dem die Entscheidungszeit von Stufe zu Stufe erhöht wird und so eine immer detailierte "Analyse" der Daten ermöglicht wird. Auf der vierten Stufe wird ein Ereignis nahezu vollständig von einer Filterfarm rekonstruiert, was ein Einordnen in verschiedene Ereignisklassen erlaubt. Falls die Eingangsraten in die Filterfarm die maximale Bandbreite überschreiten, müssen Ereignisse durch Prescale-Faktoren auf früheren Triggerstufen verworfen werden.

Für Ereignisse mit großem Impulsübertrag ist die Rate auch nach dem Upgrade unkritisch. Ist man jedoch an Ereignissen mit besonderen Endzuständen interessiert, die hauptsächlich bei kleinen Impulsüberträgen auftreten, muß der Endzustand bereits auf den Triggerstufen vor der Filterfarm identifiziert werden, um ein willkürliches Verwerfen solcher Ereignisse zu verhindern. Deshalb wurden für den Betrieb des H1-Detektors bei HERA-II einige Triggersysteme erheblich modernisiert, um so die Selektivität auf frühen Triggerstufen zu verbessern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zur Entwicklung eines neuen mehrstufigen Fast-Track-Trigger-Systems (FTT) für die zentralen Driftkammern des H1-Detektors beigetragen. Wesentlich war dabei die Entwicklung einer etwa 14 000 Zeilen umfassenden Simulation, mit der gezeigt werden konnte, daß mit dem folgenden Konzept auf Triggerniveau Spuren in kürzester Zeit rekonstruiert werden können, deren Auflösung nur unwesentlich schlechter ist als die der vollständigen H1-Rekonstruktion.

Für den FTT werden vier Triggerlagen bestehend aus je drei Drahtlagen gebildet, so daß zwölf der insgesamt 56 Driftkammerlagen zur Spurrekonstruktion genutzt werden. Im ersten Schritt werden in jeder Driftkammerzelle Spursegmente gesucht, indem die an drei Drähten gemessenen Driftzeiten mit vorher berechneten Mustern verglichen werden. Für die erste Triggerstufe werden die Spursegmente zu Spuren zusammengefügt und daraus Informationen für den zentralen Trigger generiert.

Auf der zweiten Stufe werden die Spursegmentsuche und das Zusammensetzen der Segmente mit erhöhter Auflösung wiederholt. Mit Hilfe von Spurfitalgorithmen berechnet der FTT dreidimensionale Spurparameter, die dann Grundlage der FTT-Triggerentscheidung für die zweite und dritte Stufe sind. Mit der in dieser Arbeit entwickelten FTT-Simulation wurde die erwartete Leistung des FTTs eingehend untersucht. Die Auflösungen $\sigma_{\Phi} \approx 3\,\mathrm{mrad}$, $\sigma_{1/p_t} \approx 0{,}05\mathrm{GeV}^{-1}$ und $\sigma_{\Theta} \approx 80\,\mathrm{mrad}$ sind nicht viel schlechter als die der vollständigen Rekonstruktion. Für verschiedene Ereignisklassen konnte mit Hilfe der FTT-Simulation gezeigt werden, daß der FTT die Eingangsrate in die Filterfarm bei guter Selektionseffizienz um einen Faktor 10 oder mehr reduzieren kann.

Neben einer guten Auflösung für die Spuren muß sichergestellt werden, daß die mit Hilfe der FTT-Simulation erarbeiten Algorithmen innerhalb der Latenzzeiten der einzelnen Triggerstufen ablaufen können. Die Entwicklungswerkzeuge der Elektronikhersteller erlauben eine genaue Analyse der Laufzeiten und des Ressourcenverbrauchs. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Spurfitalgorithmen für die zweite FTT-Stufe entwickelt und eingehend untersucht sowie geschwindigkeitsoptimiert auf einen DSP portiert. Die Ergebnisse dieser Studien haben wichtige Informationen für den Entwurf einer Prozessorkarte (MPB) geliefert, die an mehreren Stellen im FTT-Projekt eingesetzt wird. Es konnte gezeigt werden, daß sich ein dreidimensionaler Spurfit in weniger als $3{,}5\,\mu\mathrm{s}$ durchführen läßt. Mit $10\,\mu\mathrm{s}$ wurde etwa die Hälfte der Latenzzeit der zweiten Triggerstufe für Spurfits vorgesehen, so daß bis zu zwei Fits von jedem Prozessor abgearbeitet werden können.

Die Hardware der zweiten Stufe des FTT besteht aus acht MPBs. Der gesamte Datentransfer auf den Komponenten dieser Prozessorkarten und zwischen den Prozessorkarten wird durch ein komplexes Messagesystem organisiert. Auch der Versand von Spurdaten benutzt dieses Messagesystem. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses System so erweitert, daß es für die Spurfits genutzt werden kann. Wesentliche Funktionalitäten wurden an einem Prototyp des MPBs ausführlich getestet.

Ende 2002 ist die Serienproduktion der meisten Karten für das FTT-Projekt abgeschlossen. In den nächsten Schritten werden die einzelnen Karten zu komplexeren Testsystemen zusammengefügt. Für das L2-System bedeutet das die Inbetriebnahme einer Kette von MPBs, die Spurfits durchführen und die Ergebnisse an ein weiteres MPB am Ende der Kette schicken.

Mit dem FTT sollen nach dem Frühjahrs-Shutdown 2003 die ersten Ereignisse getriggert werden.

Anhang A

Programmcode der Spurfitalgorithmen

A.1 Kreisfitalgorithmus

```
void cirparC(short const NofPoints,float* X,float* Y,float* kappa,float* sinPHItrack,float* cosPHItrack)
/* This version of the rPHI fit is a C implementation derived
   from the CIRPAR routine. Some things are speed optimized.
   Input values are only:
    - Number of points to fit
    - X[],Y[] coming from FTT L1
    Results:
    - Pointer to kappa
    - pointers to sinPHI and cosPHI
    ( option DCA: another pointer dca)
*/
{
  /* fraction avoids division by number, works ONLY for 3 to 5 points! */
  float const frac[3]={0.333333333,0.25,0.2};
  register float Sx,Sy,divi;
  float R2=0,R4=0;
  float Sr2=0,Sr4=0,Sx2=0,Sy2=0,Sxy=0,Sxr2=0,Syr2=0;
  float Cr2r2=0,Cxy=0,Cxx=0,Cyy=0,Cxr2=0,Cyr2=0;
  float beta,delta,root,sinPHI,cosPHI;
  float q1,q2,qq,qq3;
  short i;

  /* Start calculation */

  for(i=0;i<NofPoints;++i) {
    R2=X[i]*X[i]+Y[i]*Y[i]; /* Inprincipal know in FTT, but */
    Sr2=Sr2+R2;
    R4=R2*R2;
    Sr4=Sr4+R4;
    Sx =Sx+X[i];
    Sy =Sy+Y[i];
    Sx2=Sx2+X[i]*X[i];
    Sy2=Sy2+Y[i]*Y[i];
    Sxy=Sxy+X[i]*Y[i];
    Sxr2=Sxr2+X[i]*R2;
    Syr2=Syr2+Y[i]*R2;
  }

  divi=frac[NofPoints-3]; /* Note that this works ONLY for 3 to 5 pointe */
  /* Alternative divi=1.f/(float)NofPoints */

  Cr2r2=(Sr4-Sr2*Sr2*divi);
```

```
  Cxx=(Sx2-Sx*Sx*divi);
  Cxy=(Sxy-Sx*Sy*divi);
  Cyy=(Sy2-Sy*Sy*divi);
  Cxr2=(Sxr2-Sx*Sr2*divi);
  Cyr2=(Syr2-Sy*Sr2*divi);

  q1=Cr2r2*Cxy-Cxr2*Cyr2;
  q2=Cr2r2*(Cxx-Cyy)-Cxr2*Cxr2+Cyr2*Cyr2;

  /* Original implementation to option PHI */
  /* PHI=0.5*atan2(2.0*q1,q2); */
  /* Avoid trigonometric functions. But result of routine will be sinPHI and cosPHI. Not PHI itself. */

  qq = q1 * invf1(q2);    /* qq = q1/q2; But faster on DSP */
  root=(1.f+4.f*qq*qq);

  if(q2>0.f)
    qq3 = 0.5f * rsqrtf1(root);
  else
    qq3 =-0.5f * rsqrtf1(root);

  sinPHI=(0.5f-qq3)*rsqrtf1(0.5f-qq3); /* rsqrtf1(x) calculates 1/sqrt(x) fast on DSP */
  cosPHI=(0.5f+qq3)*rsqrtf1(0.5f+qq3);
  /* This value has ambiguity +-pi
     It can be resolved by looking at the track probagation */
  if(cosPHI * Sx*divi < 0.f)
    cosPHI= -cosPHI;
  if(sinPHI * Sy*divi < 0.f)
    sinPHI= -sinPHI;
  *sinPHItrack=sinPHI; /* Return values */
  *cosPHItrack=cosPHI;

  beta=(sinPHI*Cxr2-cosPHI*Cyr2)*invf1(Cr2r2);
  delta=divi*(-beta*Sr2+sinPHI*Sx-cosPHI*Sy);
  /* kappa_{exact}=-2*beta/root
     where root=sqrtf(1.0-4.0*delta*beta)
     This root is very close to 1.
     Taylorpolynom x<<1 for 1/sqrt(1-x)=1+.5*x+( .375*x^2 )
     => 1.0-4.0*delta*beta = 1-x => x = 4*delta*beta  */

  *kappa=beta*(-2.f-4.f*delta*beta); /* Return value */
  /* Design option DCA calculation:  DISABLED */
  /*  *dca=(float)(2.0*delta/(1.0+root)); */
}
```

A.2 *rz*-Fitalgorithmus

```
void DspRZfit(short const N, float *X, float *Y, float *Z,float ZVTX, float *CotTheta)
{

  /* Reduced RZfit for running on DSP.
  Compared to the full implementation some approximations are made.
     Input values are only:
       - Number of points to fit
       - X[],Y[] (up to 4)  Z[] up to 12 z coordinates (3 each group)
       - z position of vertex ZTVX
     Result is:
       - CotTheta
  */

  short i,j;
  register float SumS=0.f,SumZ=0.f;
  float s,S2;
#ifdef CHECKS
  if(N>4 || N<2) {
    printf("Something wrong! More than 4 (or less than 2) points to fit!!!\n");
    *theta=1.57079632679489656;
    *CotTheta=0.0;
    return;
  }
#endif

  for(i=0;i<N;i++)
    {
      /* Full implementation: Dist=sqrt(X[i]*X[i]+Y[i]*Y[i]); */
      /* Full implementation for ArcLength */
      /* s=asin(Dist*(kap)*sqrt(1-(0.5*(kap)*Dist)*(0.5*(kap)*Dist))) / kap; */
      /* Approximation for ArcLength is simply distance (sqrt(x*x+y*y) neglecting x,y-vertex */
      S2=X[i]*X[i]+Y[i]*Y[i];
      s=S2*_rsqrsp(S2); /* Fast SQRT implementation */
      for(j=0;j<3;j++){
         SumS=SumS+s;
         SumZ=SumZ+(Z[(i*3)+j]-ZVTX);
      }
    }
  *CotTheta=SumZ*_rcpsp(SumS);
}
```

Anhang B

Verwendete Triggerelemente

z-Vertex-Trigger

- `zVtx_Cls`
  Die Bedingung dieses Triggerelementes ist erfüllt, wenn sich alle Einträge im z-Vertex-Histogramm auf vier seiner Intervalle konzentrieren. Hierdurch wird indirekt auf niedrige Spurmultiplizitäten geschnitten.
- `zVtx_sig`
  Dieses Triggerelement verlangt eine gewisse Signifikanz des Maximums im z-Vertex-Histogramm, d.h. das Verhältnis der Anzahl der Einträge im Intervall mit den meisten Einträgen zur Anzahl der Einträge in allen Intervallen muß einen bestimmten Wert überschreiten.
- `Topo_Mult` < 3
  Durch dieses Triggerelement wird die Anzahl der Big Rays eingeschränkt.

DCRΦ-Trigger

- `DCRPh_TNeg`
  Von diesem Element wird mindestens eine angesprochene Spurmaske für negativ geladene Teilchen gefordert.
- `DCRPh_THig`
  Um die Bedingung dieses Elementes zu erfüllen, muß mindestens eine Maske angesprochen haben, die zu einer Spur mit einem Transversalimpuls oberhalb von 800 MeV korrespondiert.
- `DCRPh_Tc`
  Dieses Element verlangt das Ansprechen von mindestens drei gültige Masken. Daher wird es zum Triggern "hoher" Spurmultiplizitäten benutzt.

LAr-Kalorimeter Trigger

- `LAr_BR`
  Es wird das Vorhandensein eines Big Rays verlangt.

SpaCal Trigger

- `SPCLe_IET` $>$ `n`
  Das Triggerelement `SPCLe_IET` $>$ `n` ($\mathtt{n} = 0, 1, 2$) fordert, daß die mit einem Cluster-Bit verknüpfte Energiedeposition die Schwelle $E_{CB,\mathtt{n}}$ überschritten hat. Die Cluster-Bits des zentralen LIET-Bereiches werden von diesem Triggerelement nicht berücksichtigt.
- `SPCLe_IET_Cen_m`
  Um die Bedingung des Triggerelementes `SPCLe_IET_Cen_m` ($\mathtt{m} = 1, 2, 3$) zu erfüllen, muß die mit einem Cluster-Bit des zentralen LIET-Bereiches verknüpfte Energiedeposition die Schwelle $E_{CB,\mathtt{m}}$ überschritten haben.
- `SPCLe_ToF_E_2`
  Dieses Triggerelement fordert, daß die gesamte im elektromagentischen Teil des SpaCals deponierte Energie 12 GeV überschritten hat. Dabei werden nur solche Energiedepositionen berücksichtigt, die vom Flugzeitsystem einem Zeitintervall von etwa 20 ns um den nominellen Wechselwirkungszeitpunkt zugeordnet werden.

Myontrigger

- `Mu_Bar`
  Von diesem Triggerelement wird verlangt, daß im Zentralbereich des Myonsystems in mindestens zwei der ersten vier Triggerlagen ein geladenes Teilchen nachgewiesen wurde.
- `Mu_ECQ`
  Die Bedingung dieses Triggerelementes ist erfüllt, wenn im Rückwärtsbereich oder im äußeren Vorwärtsbereich des Myonsystems drei der fünf Triggerlagen angesprochen haben.

Elektrontagger

- `eTAG`
  Dieses Triggerelement ist bereits eine Kombinations aus mehreren Komponenten des Luminositätssystems. Im wesentlichen wird ein Signal im Elektrontagger bei -33 m verlangt. Im Photondetektor und einem Vetozähler darf keine signifikante Energiedeposition vorliegen.
- `eTAG44`
  Sehr ähnlich zu `eTAG`. Wichtiger Unterschied ist, daß eine Energiedeposition im Elektrontagger bei -44 m gemessen wird.
- `eTAG8`
  Dieses Triggerelement verlangt ein Signal Elektrontagger bei -8 m. Ansonsten wie `eTAG`.

Neuronaler Netzwerktrigger (L2)

- `L2[2]`
  Bei diesem Triggerelement handelt es sich um ein zur Erkennung von Zwei-Elektron-Ereignissen trainiertes neuronales Netz.
- `L2[5]`
  Das diesem Triggerelement zugrundeliegende neuronale Netz wurde zur Erkennung von Ereignissen mit mindestens einem Myon trainiert.

Anhang C

Abkürzungen und Begriffe

Bunch
Paket von Teilchen, das im Speicherring umläuft. Typische Teilchenzahlen pro Paket liegen im Bereich 10^{10} bis 10^{11}.

Bunchcrossing
Zusammentreffen von zwei Teilchenpaketen (Bunches) im Wechselwirkungspunkt. Bei HERA beträgt die Zeit zwischen zwei Bunchcrossings 96 ns.

CAM Content addressable memory.
Speicher, der als "inverses RAM" arbeitet. Eingabe ist ein (potentieller) Speicherinhalt. Ausgabe ist die Adresse des Inhalts sofern er im CAM gespeichert ist.

DCA Distance of closest approach.
Kürzeste Entfernung einer Spur vom Koordinatenursprung.

DMA Direct memory access.
Datentransfer zwischen Speicherbereichen ohne Intervention des Prozessors.

DPIO Digital parallel input output.
Aufsteckkarte für PPC-Karten zur Verbindung des FPDP-Bus mit dem lokalen Bus der PPC-Karte.

DPRAM Dual ported RAM.
RAM-Speicher, der von zwei Komponenten gelesen und beschrieben werden kann.

DSP Digitaler Signalprozessor.
Prozessor, der speziell für die Verarbeitung von Eingangssignalen in Echtzeit geeignet ist.

DSP-Intrinsic
Besonderes Leistungsmerkmal von DSPs der C6000 Serie von TexasInstruments. Die Floatingpoint-Variante kann so zum Beispiel sehr schnell (wenige Zyklen) eine grobe Näherung für $1/x$ oder $1/\sqrt{x}$ berechnen.

FADC/ADC (Fast) analog digital converter.
Elektronisches Bauteil, das analoge Pulse digitalisiert.

FEM Front end module.
Karte, die für die erste Stufe im FTT-Projekt eingesetzt wird.

FIFO First in first out.
Pufferspeicher, bei dem Inhalte in der Reihenfolge ausgegeben werden, in der sie gespeichert wurden.

FPDP Front panel data port.
Verbindungsstandard, der in der dritten Stufe des FTT zum Einsatz kommt.

FPGA Field programable gate array.
Chip der vom Anwender sehr flexibel programmiert werden kann.

HDL Hardware description language.
Beschreibungssprache für Hardware.

HERA Hadron Elektron Ringanlage.
Elektron-Proton-Speicherring in Hamburg mit einem Umfang von 6,3 km.

JTAG Joint test action group.
Konsortium, das den JTAG-Standard (festgeschrieben in IEEE 1149.1) entworfen hat. Über JTAG-Verbindungen kommunizieren Entwicklungssyteme mit ihren Target-Systemen.

L2NN Level 2 neuronal network.
System der zweiten Triggerstufe, das mit neuronalen Netzen arbeitet.

L2TT Level 2 topological trigger.
System der zweiten Triggerstufe, das Subdetektordaten unter toplogischen Aspekten analysiert.

LVDS Low voltage differential signal.
Signalstandard.

MPB Multi purpose board.
Vielseitige Prozessorkarte, die für die Aufgaben der zweiten Stufe und einige der ersten Stufe des FTT-Projekts benutzt wird.

PMC Piggyback mezzanine card.
Standard für Aufsteckplatinen.

PQZP Parallel quickbus zero-suppression processor.
Protokollstandard im H1-Experiment zum Versenden von Triggerinformationen an die zweite Triggerstufe.

TE Triggerelement.
Signal eines Subdetektors an den zentralen Trigger.

ST Subtrigger.
Logische Verschaltung mehrerer Triggerelemente.

VME Versa module europcard.
Bus- und Kartenstandard, der häufig im Labor eingesetzt wird. Die Spezificationen sind in IEEE 1014-1987 festgeschrieben.

Literaturverzeichnis

[1] Particle Data Group, K. Hagiwara *et al.*, Phys. Rev. D **66** (2002).

[2] S. L. Glashow, Nucl. Phys. **22** (1961) 579.

[3] S. L. Glashow, Rev. Mod. Phys. **52** (1980) 539.

[4] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett˙**19** (1967) 1264.

[5] S. Weinberg, Rev. Mod. Phys. **52** (1980) 515.

[6] A. Salam, Rev. Mod. Phys. **52** (1980) 525.

[7] D. Rutherford, Phil. Mag. **21** (1911) 669.

[8] R. Hofstader, Rev. Mod. Phys. **28** (1956) 214.

[9] J. I. Friedmann, Rev. Mod. Phys. **63** (1991) 615.

[10] J. D. Bjørken, E. A. Paschos, Phys. Rev. **185** (1969) 1975.

[11] M. Gell-Mann, Phys. Lett. **8** (1964) 214.

[12] C. G.Callan, D. J. Gross, Phys. Rev. Lett. **22** (1969) 156.

[13] E. D. Bloom *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 930.

[14] H. W. Kendall, Rev. Mod. Phys. **63** (1991) 597.

[15] E. Reya, Phys. Rep. **69** (1981) 196.

[16] M. Glück, E. Reya, A. Vogt, Eur. Phys. J. **C5** (1998) 461.

[17] A. D. Martin *et al.*, Eur. Phys. J. **C4** (1998) 463.

[18] H. L. Lai *at al.* [CTEQ Collaboration], Phys. Rev. **D55** (1997) 1280 [arXiv:hep-ph/9903282(1999)].

[19] G. Altarelli, G. Parisi, Nucl. Phys. B **126** (1977) 298

[20] V. N. Gribov, L. N. Lipatov, Sov. J. Nucl. Phys. **15** (1972) 438.

[21] Y. L. Dokshitzer, Sov. Phys. JETP **46** (1977) 641.

[22] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C **21** (2001) 33.

[23] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C **19** (2001) 269 [arXiv:hep-ex/0012052].

[24] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C **13** (2000) 609 [arXiv:hep-ex/9908059].

[25] J. Breitweg *et al.* [ZEUS Collaboration], Eur. Phys. J. C **12** (2000) 411 [arXiv:hep-ex/9907010].

[26] S. Chekanov *et al.* [ZEUS Collaboration], Eur. Phys. J. C **21** 2001 443 [arXiv:hep-ex/0105090].

[27] A. C. Benvenuti *et al.* [BCDMS Collaboration], Phys. Let. B **223** (1989) 485.

[28] M. R. Adams *et al.* [E665 Collaboration], Phys. Rev. D **54** (1996) 3006.

[29] M. Arneodo *et al.* [New Muon Collaboration (NMC)], Nucl. Phys. B **483** (1997) 3.

[30] H1 Collaboration,
"*ep* Physics beyond 1999",
H1-10/97-531 (H1 interner Bericht).

[31] H1 Collaboration,
"Observation of events with isolated leptons and missing P_T and comparison to W production at HERA",
Contributed paper to XXXI International Conference on high Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands, Abstract 1022, July 2002.

[32] ZEUS Collaboration,
"Search for events with isolated high-energy leptons and missing transverse momentum at HERA",
Contributed paper to XXXI International Conference on high Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands, Abstract 909, July 2002.

[33] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C **13** (2000) 609.

[34] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Nucl. Phys. B **545** (1999) 21 [arXiv:hep-ex/9812023].

[35] J. Breitweg *et al.* [ZEUS Collaboration], Eur. Phys. J. C **18** (2001) 625 [arXiv:hep-ex/0011081].

[36] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Phys. Lett. B **467** (1999) 156 [Erratum-ibid. B **518** (2001) 331] [arXiv:hep-ex/9909029].

[37] ZEUS Collaboration,
Contributed paper to XXXI International Conference on High Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands, Abstract 784, July 2002.

[38] ZEUS Collaboration,
Contributed paper to XXXI International Conference on High Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands, Abstracts 783 & 785, July 2002.

[39] H1 Collaboration,
Contributed paper to XXXI International Conference on High Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands, Abstract 1013, July 2002.

[40] [ZEUS Collaboration], ZEUS-STATUS-REPT-1993.

[41] K. Ackerstaff *et al.* [HERMES Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **417** (1998) 230 [arXiv:hep-ex/9806008].

[42] C. Padilla [HERA-B Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 176.

[43] G. Hoffstaetter,
Vortrag im HERA-Status Seminar, Zeuthen, Jan. 2002.

[44] I. Abt *et al.* [H1 Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 310.

[45] I. Abt *et al.* [H1 Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 348.

[46] D. Pitzl *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **454**, 334 (2000) [arXiv:hep-ex/0002044].

[47] J. Gassner,
"A Measurement of D-Meson Production at HERA by Decay Vertex Identification",
Dissertation, ETH Zürich, 2002 (ETHZ-IPP Internal Report 2002-45).

[48] W. Eick *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **386**, 81 (1997).

[49] H. Henschel and R. Lahmann, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 93.

[50] W. Braunschweig *et al.*,
"A Forward Silicon Tracker for H1",
DESY-PRC-99/01, H1-02/99-563 (H1 interner Bericht).

[51] K. Müller *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **312** (1992) 457.

[52] M. Cuje *et al.*,
"H1 High Luminosity Upgrade 2000 CIP and Level 1 vertex Trigger"
DESY-PRC-98/02, H1-01/98-535 (H1 interner Bericht).

[53] F. Sauli,CERN 77-03 sowie "Principles of MWPC and Dirft Chambers", in T. Ferbel, "Experimental Techniques in High Energy Physics".

[54] S. Eichenberger *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **323** (1992) 532.

[55] M. Urban,
"Ein schneller Trigger für H1 bei HERA",
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2000.

[56] Th. Wolff *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A323** (1992) 537.

[57] Th. Wolff,
"Entwicklung, Bau und erste Ergebnisse eines totzeitfreien Spurfinders als Trigger fuer das H1-Experiment",
Dissertation, ETH Zürich, 1993 (ETHZ-IPP Int.Rep. 94-2).

[58] S. A. Baird *et al.*,
"A Fast Track Trigger with High Resolution for H1",
DESY-PRC-99/06 und H1-06/99-573 (H1 interner Bericht).

[59] S. A. Baird *et al.*,
"Addendum to the proposal: A Fast Track Trigger with High Resolution for H1",
H1-09/99-576 (H1 interner Bericht).

[60] H1 Collaboration,
"Proposal for an Upgrade of the H1 Forward Track Detector for HERA 2000",
DESY PRC-98/06.

[61] R. D. Appuhn *et al.* [H1 SPACAL Group Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 397.

[62] T. Nicholls *et al.* [H1 SPACAL Group Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **374** (1996) 149.

[63] H. Hutter,
"Teststrahl-Untersuchungen an einem Sphaghetti-Kalorimeter für den H1-Detektor",
Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1995.

[64] D. Reyna,
"Modifications to SpaCal for H1 High Luminosity Operation and the Effect on Acceptance",
H1-11/98-555 (H1 interner Bericht).

[65] M. Domke,
"Technische Zeichnungen des neuen Inserts",
http://e5pc51.physik.uni-dortmund.de/H1/Neues-Insert/neues_insert.html .

[66] B. Andrieu *et al.* [H1 Calorimeter Group Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **336** (1993) 460.

[67] T. Carli *et al.*,
"Proposal to Upgrade the LAR Calorimeter Trigger",
DESY-PRC-99/02, H1-01/99-560 (H1 interner Bericht).

[68] P. Biddulph *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **340** (1994) 304.

[69] T. Ahmed *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **364** (1995) 456.

[70] A. Vargas,
"Experience with FIT detector in H1",
Sommerstudentenreport, 1998 (H1 intern).

[71] M. Keller, K. Meier, O. Nix, G. Schmidt, A. Stellberger, J. Stiewe and A. Streich,
Nucl. Instrum. Meth. A **409** (1998) 604.

[72] I. Herynek, J. Hladky,
"VLQ-TOF System"
H1-05/99-572 (H1 interner Bericht).

[73] Ch. Wissing,
"Bestimmung der Charakteristika des Flugzeitsystems des H1-Detektors zur Messung des Strahluntergrundes",
Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1998.

[74] Ch. Wissing, A. Beglarian, P. Biddulph, M. Fleischer,
"The H1 ToF system in 1996 and 1997",
H1-01/98-533 (H1 interner Bericht).

[75] K. Flamm,
"Messung von Strahluntergrund bei HERA für den Betrieb von H1",
Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1992.

[76] H1 Collaboration,
Contributed paper to the 28th International Conference on High Energy Physics, Warsaw, Poland,Paper pa17-026, July 1996.

[77] H. Bethe, W. Heitler, Proc. Roy. Soc. **A146** (1934) 83.

[78] E. Elsen,
"Aspects Of The H1 Trigger And Data Acquisition System,"
Prepared for 2nd Annual Conference on Electronics for Future Colliders, Chestnut Ridge, N.Y., 19-21 May 1992.

[79] H. C. Schultz-Coulon, D. Wegener,
Skriptum zur Vorlesung "Teilchendetektoren", Kap. 12,
http://www.physik.uni-dortmund.de/e5/skript/detektoren/index.html .

[80] F. Sefkow, E. Elsen, H. Krehbiel, U. Straumann and J. Coughlan, IEEE Trans. Nucl. Sci. **42** (1995) 900.

[81] J. H. Köhne, D. Deckert, D. Schmidt,
"Simulation of the PQZP System for the L2 Triggers",
H1-0297-514 (H1 interner Bericht).

[82] J. C. Bizot *et al.*,
"Strategy Studies for the H1 Topological L2-Trigger (L2TT)",
H1-01/97-508 (H1 interner Bericht).

[83] J. H. Köhne *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **389** (1997) 128.

[84] T. Krämerkämper,
"Messung der Gluondichte im Photon und Entwicklung eines neuronalen Triggers",
Dissertation, Universität Dortmund, 1997.

[85] J. Naumann,
Dissertation, Universität Dortmund, in Vorbereitung.

[86] H1 Collaboration,
"Proposal to Merge Level-4 and Level-5 System of the H1-Experiment",
DESY-PRC-99/03.

[87] S. Egli *et al.*,
"Calculating Event Weights in Case of Downscaling on Trigger Levels 1–4",
H1-04/97-517 (H1 interner Bericht).

[88] H. C. Schultz-Coulon, E. Elsen, T. Nicholls, J. Coughlan and H. Rick, IEEE Trans. Nucl. Sci. **46** (1999) 915.

[89] S. A. Baird *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **48** (2001) 1276 [arXiv:hep-ex/0104010].

[90] S. A. Baird *et al.*,
"Level 1 Fast Track Trigger Feasibility Study",
DESY-PRC-99/06,07.

[91] S. A. Baird *et al.* [FTT Group],
"H1 Fast Track Trigger Specification of the Level 1 System",
DESY-PRC-00/05 und H1-10/00-588 (H1 interner Bericht).

[92] D. P. C. Sankey,
"Proposed QT Algorithm for Fast Track Trigger",
Projektdokument, 1998 (H1 intern).

[93] D. P. C. Sankey, persönliche Mitteilung, Okt. 2002.

[94] D. Meer,
Dissertation, ETH Zürich, in Vorbereitung.

[95] Super Computing Systems,
"H1 Second Level Fast Track Trigger – Design Description",
http://www.scs.ch/ftt .

[96] V. Karimäki, Nucl. Inst. Meth. A **305** (1991) 187.

[97] V. Blobel,
"The BOS System", Fourth updated printing,
http://www-h1.desy.de/icas/imanuals/ (H1 intern).

[98] H1NDB Manual,
http://www-h1.desy.de/icas/imanuals/ndb_man.html (H1 intern).

[99] J. Samson,
"θ-fit in the FTT",
FTT-Gruppen-Meeting, Oktober 2001.

[100] O. Behrendt,
"Entwicklung von Algorithmen zur Identifikation von Vektormesonen-Ereignissen mit dem neuen H1-Spurtrigger",
Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2002.

[101] O. Behrendt, private Mitteilung, Dezember 2002.

[102] J. Wagner.
"Triggering Charm with D^*-Mesons",
Vortrag beim Ringberg Workshop of Future Triggering, 2002.

[103] Y. H. Fleming,
"Triggering CC at low pt",
Vortrag beim Ringberg Workshop of Future Triggering, 2002.

[104] D. Schmidt,
"Diffractive Photoproduktion von Charmonium im H1-Detektor bei HERA",
Dissertation, Universität Hamburg, 2001.

[105] J. Merkel,
"Triggern von inelastische J/Ψ-Mesonen mit dem FTT"
Sommerstudentenreport, 2002 (H1 intern).

[106] T. Kluge, M. Wessels,
"b-Jets in HERA-II",
Vortrag beim Ringberg Workshop of Future Triggering, 2002.

[107] J. Seehafer,
"Jets mit dem FTT",
Sommerstudentenreport, 2002 (H1 intern).

[108] S. Lüders, Dataquality-Meetings, 2000.

[109] M. Tluczykont,
"Kalibration der zentralen Spurenkammer des H1-Detektors bei HERA",
Diplomarbeit, Unversität Hamburg, 1999.

[110] K. Daum,
"The new CJC MC Simulation",
Vortrag im Heavy-Quark-Meeting, November 2002.

[111] A. Schöning,
"Description of the L1 Linking Algorithm",
Projektdokument, 2002 (H1 intern).

[112] N. E. Berger,
"Development of a z-vertex trigger based on drift chamber signals at H1",
Diplomarbeit, ETH Zürich, June 2002 (ETHZ-IPP Internal Report 2002-04).

[113] W. Yan, Bericht im FTT-Meeting, November 2002.

[114] O. Behnke,
"Selektion eines D^*-Samples mit CST-Lifttime-Tag",
der FTT-Gruppe zur Verfügung gestelles Sample, 1998.

[115] A. Schöning, Y. H. Fleming, Vortrag im FTT Meeting, 2002.

[116] A. Schöning,
"The FTT Calibartion Concept and Software Scheme",
Projektdokument, 2002 (H1 intern).

[117] National Semiconductor,
"DS90C387/DS90CF388: Dual Pixel LVDS Display Interface (LDI)-SVGA/QXGA,"
Datenblatt, November 2000. Verfügbar unter http://www.national.com/ .

[118] Altera,
Datenblatt "APEX20K programable logic device family",
http://www.altera.com .

[119] Analog Devices,
Datenblatt verfügbar unter:
http://www.analog.com/technology/dataConverters/designTools/ .

[120] Y.H. Fleming,
Dissertation, University of Bimingham, in Vorbereitung.

[121] D. Meer, D. Müller, J. Müller, A. Schöning, Ch. Wissing,
"A Multifunctional Processing Board for the Fast Track Trigger of the H1 Experiment",
IEEE Trans. Nucl. Sci. **49** (2002) 357 [arXiv:hep-ex/0107010].

[122] ALTERA Quartus II Software Overview,
http://www.altera.com/products/software/pld/products/q2/qts-index.html .

[123] Motorola Comuter Group,
Datenblatt zum MVME2400:
http://mcg.motorola.com/ .

[124] Wind River, http://www.windriver.com .

[125] M. Kolander,
"Testmöglichkeiten der L3-Receiver-Karte",
persönliche Mitteilung, 2002.

[126] Datenblatt verfügbar unter:
http://www.fpdppmc.com/pmc/index.htm .

[127] Datenblatt: "TMS320C6701 - FLOATING-POINT DIGITAL SIGNAL PROCESSOR",
TexasInstruments, Literature Number: SPRS067E .

[128] "TMS320C6000 CPUand Instructions Set Reference Guide",
TexasInstruments, Literature Number: SPRU189F .

[129] J. Müller, D. Müller,
"Message System",
SCS-Projektdokument, 2001 (H1 intern).

[130] J. Müller,
"Routing Tables User Guide",
SCS-Projektdokument, 2001 (H1 intern).

[131] D. Müller,
“Design Description Dsp Controller (DspCtrl)”,
SCS-Projektdokument, 2002 (H1 intern).

[132] B. Hangartner,
“DSP Testing Software - Implementation Details”,
SCS-Projektdokument, 2001 (H1 intern).

[133] “TMSC6000 Peripherials Reference Guide”,
TexasInstruments, Literature Number: SPRU190C .

[134] “Code Composer Studio User’s Guide”,
TexasInstruments, Literature Number: SPRU328B .

[135] “TMS320C6000 Optimizing Compiler User’s Guide”,
TexasInstruments, Literature Number: SPRU187I .

[136] “TMS32067x FastRTS Library Programmer’s Reference”,
TexasInstruments, Literature Number: SPRU100a .

[137] “TMS320C67xx Divide and Square Root Floating-Point Functions”,
TexasInstruments, Literature Number: SPRA516 .

Danksagung

Ohne die tatkräftige Unterstützung anderer ist es kaum möglich, eine Doktorarbeit anzufertigen. An dieser Stelle möchte diejenigen würdigen, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dietrich Wegener, daß er es mir ermöglicht hat, diese Arbeit in seiner Gruppe durchzuführen. Die gute Ausstattung des Lehrstuhls und die hervorragende Stimmung verdankt die Gruppe maßgeblich ihrem Chef.

Ich war sehr erfreut als Herr Priv.-Doz. Dr. Eckhard Elsen sich bereit erklärt hat, die Aufgabe des Zweitgutachters wahrzunehmen. Als einer der “geistigen Väter”des FTT hat er das Projekt entscheidend geprägt.

Herr Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon war als Fast-immer-gute-Laune-PostDoc stets Ansprechpartner der Dortmunder Gruppe am DESY. Ich bedanke mich bei ihm für die sehr sorgfältige Korrektur des Manuskripts.

Ich danke Herrn Dr. André Schöning für seine vielen kreativen Ideen zur Lösung auch der kniffeligsten Probleme. Unser gemeinsames Hacken an der FTT-Simulation war immer auch großer Spaß. Während des “Zusammenschreibens” hat er mir geduldig meine Fragen insbesondere zum L1-Teil des FTT beantwortet.

Wichtig für die Verwirklichung des FTT war die gute Zusammenarbeit mit der Super-Computing-Systems AG in Zürich. Mein persönlicher Dank gilt den beiden FTT-Projektleitern bei SCS Herrn Dr. David Müller und Herrn Jörg Müller sowie Herrn David Meer. Bereitwillig erklärten sie mir die vielen kleinen Tricks, mit denen SCS das letzte aus den Chips herausholt. Zwei Projektaufenthalte in Zürich haben wertvolle Ergebnisse für diese Arbeit geliefert.

Vielen Dank an alle Mitglieder der gesamten FTT-Gruppe. Besonders die Zusammenarbeit mit den Gruppenmitgliedern am DESY und in Dortmund wird mir nicht zuletzt wegen einiger sehr gelungener “Offsite-Meetings” in guter Erinnerung bleiben. Ich danke Simon Baumgartner, Olaf Behrendt, Nik Berger, Marc-Oliver Bönig, Yves Fleming, Markus Kolander, Jürgen Naumann, Andrea Vargas und Martin Windisch.

Auch außerhalb der FTT-Gruppe hatte ich es mit vielen netten Kollegen zu tun. Neben gutem Teamwork und den netten Kaffeerunden haben besondere “Events” außerhalb der Forschung Maßstäbe gesetzt. Das “98er Sportstudio Wilsdorfallee” mit dem unübertroffenen Studiodirektor Dr. Roman Pöschl, die Grillparties im Hause Schultz-Coulon, die Ausflüge zum Elbstrand, die Experiment-übergreifenden Abendmeetings mit der TG66 im Vogel[1] und die legendären Spiele im Millerntor-Stadion haben uns immer wieder daran erinnert, daß es auch außerhalb der Forschung noch interessante Tätigkeiten gibt. Nicht zuletzt wegen derartiger Aktionen habe ich die guten Kontakte zu ehemaligen Kollegen nach Übersee nicht verloren. Besonders erwähnen möchte ich Dr. Çiğdem İşsever und Dr. Guillermo Contreras.

Jürgen Naumann und Dr. Rainer Stamen haben mit mir über Jahre das selbe Büro und/oder die selbe Wohnung bewohnt. Daß es in dieser Zeit viel Spaß und niemals Streß gab, ist schon bemerkenswert.

Die Bearbeitung von Anträgen und Formularen wäre ohne die geduldige Hilfe von Frau Eva Lorenz deutlich schleppender verlaufen. Vielen Dank.

Gemeinsam mit Frau Dr. Çiğdem İşsever habe ich die Rechner der Dortmunder H1-Gruppe in Hamburg betreut. Dabei wurden wir von Dr. Klaus Wacker und Dr. Dieter Lüke "remote" aus Dortmund unterstützt. Einige Mitarbeiter bei DEST-IT bearbeiteten unsere Wünsche über den "kurzen Dienstweg". Namentlich nennen möchte ich Thomas Finnern, der uns stets wertvolle Tips gab. Ihnen allen sei hier für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Ich danke meinen Freunden und Bekannten außerhalb der Forschung. Die gemeinsamen Unternehmungen im Bereich Sport und Kultur sorgten immer wieder dafür, den Kopf frei zu bekommen.

Besonderer Dank gilt meiner Schwester und meinen Eltern, denen ich die Möglichkeit verdanke, den Verlauf der Ausbildung ganz nach meinen Neigungen gestalten zu können.

Das in dieser Arbeit beschriebene Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter der Referenz 05 H1 1PEA/6 gefördert.

[1] Auch als Wohnzimmer von Mitch Symalla und Christopher van Eldik bekannt.