

Entwicklung eines Simulationsprogramms zur Geschwindigkeitsoptimierung von Trigger-Algorithmen des H1-FTTs

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

Lehrstuhl für Experimentelle Physik V
Fachbereich Physik
der Universität Dortmund

vorgelegt von

Martin Windisch
aus Gelsenkirchen

Juni 2003

Für Anna

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Elektron-Proton-Streuung bei HERA	4
1.1 Der HERA-Speicherring	4
1.2 Kinematik der ep -Streuung	5
1.3 Die Strukturfunktionen F_1 und F_2	6
1.4 Prozesse mit besonderen Endzuständen	7
2 Das H1-Experiment bei HERA	11
2.1 Das Luminositäts-Upgrade	11
2.2 Der H1-Detektor	12
2.2.1 Das zentrale Spurkammersystem	15
2.3 Das H1-Triggersystem	18
2.3.1 Die erste Triggerstufe L1	20
2.3.2 Die zweite Triggerstufe L2	20
2.3.3 Die dritte Triggerstufe L3	21
2.3.4 Die Triggerstufe L4/5	21
2.4 Ereignisraten und Triggerstrategie nach dem Upgrade bei HERA	21
3 Der Fast Track Trigger	23
3.1 Das Konzept des Fast-Track-Triggers	24
3.2 Die Triggerstufen des FTTs	24
3.2.1 Die erste Stufe FTT-L1	24
3.2.2 Die zweite Stufe FTT-L2	28
3.2.3 Die dritte Stufe FTT-L3	30
4 Die Simulation L3Velo	33
4.1 Datenspeicherung im H1-Experiment	33

4.2	Das Konzept von L3Velo	34
4.3	Der Programmablauf von L3Velo	36
5	Laufzeitanalysen mit L3Velo	38
5.1	Laufzeitmessung	38
5.2	Datenaufbereitung	41
5.3	Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Ereignissen	44
5.4	Laufzeitanalysen am Beispiel des J/Ψ -Triggeralgorithmus	48
5.4.1	Laufzeitverhalten	48
5.4.2	Laufzeitkorrelation	54
5.5	Ausblick	54
	Abkürzungsverzeichnis	57
	Literaturverzeichnis	62
	Danksagung	68

Einleitung

Die Untersuchung der Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie und ihrer fundamentalen Wechselwirkungen untereinander ist das Hauptziel der Elementarteilchenphysik. Der heutige Wissenstand auf diesem Forschungsgebiet ist im sogenannten Standardmodell der Elementarteilchenphysik zusammengefasst.

Das Standardmodell basiert auf der Annahme, dass sich die Materie aus zwei Arten strukturloser Spin-1/2-Teilchen zusammensetzt. Bei diesen als *Fermionen* bezeichneten Teilchen handelt es sich um die *Quarks*, aus denen z. B. die beiden Kernbausteine Proton und Neutron aufgebaut sind, und die *Leptonen*, denen beispielsweise das Elektron zugeordnet ist. Zusätzlich existiert zu jedem der 12 Fermionen, welche in sechs Quarks und sechs Leptonen unterteilt sind (siehe Tabelle 1), ein Antifermion, dessen ladungsartige Quantenzahlen ein umgekehrtes Vorzeichen besitzen. Dagegen sind der Spin und die Ruhemasse bei Fermion und Antifermion gleich [1].

Leptonen	Ladung	Spin	Masse	Quarks	Ladung	Spin	Masse
e^-	-1	1/2	511 keV	u	2/3	1/2	1,5 - 4,5 MeV
μ^-	-1	1/2	106 MeV	d	-1/3	1/2	5 - 8,5 MeV
τ^-	-1	1/2	1,8 GeV	s	-1/3	1/2	80 - 155 MeV
ν_e	0	1/2	< 3 eV	c	2/3	1/2	1,0 - 1,4 GeV
ν_μ	0	1/2	< 0,19 MeV	b	2/3	1/2	4,0 - 4,5 GeV
ν_τ	0	1/2	< 18,2 MeV	t	2/3	1/2	174 ± 5 GeV

Tabelle 1: *Fermionen des Standardmodells, entnommen aus [1].*

Insgesamt wirken zwischen den Fermionen und ihren Antiteilchen vier fundamentale Wechselwirkungen, die durch Austauschteilchen mit ganzzahligem Spin, den sogenannten *Eichbosonen*, vermittelt werden. Bei der **elektromagnetischen Wechselwirkung** wird ein masseloses Photon ausgetauscht, das an alle elektrisch geladenen Teilchen koppelt. Das Photon besitzt den Spin 1 und ist elektrisch neutral. Die **schwache Wechselwirkung** wirkt auf alle Teilchen des Standardmodells und erfolgt durch den Austausch massiver W^\pm - und Z^0 -Bosonen. Die **starke Wechselwirkung** wird im Rahmen der Quanten-Chromo-Dynamik (QCD) beschrieben und wirkt ausschließlich zwischen Quarks (und Antiquarks), die neben der elektrischen Ladung auch eine sogenannte Farbladung tragen. Die Wechselwirkung zwischen Quarks bzw. Antiquarks wird durch den Austausch von masselosen Gluonen vermittelt, die an die Farbladungen koppeln. Gluonen können im Gegensatz zu den Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung auch untereinander wechselwirken, da sie selbst Farbladungsträger sind.

Obwohl dieses Modell zu den erfolgreichsten Theorien der Physik gehört, existieren immer noch ungeklärte Fragen, so dass mit Hilfe der zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten die

Vorhersagen dieses Modells bis an die Grenzen des experimentell Machbaren überprüft werden.

Die Struktur des Protons ist eine dieser offenen Fragen. Das H1-Experiment am HERA¹-Speicherring am DESY² in Hamburg wurde konstruiert, um einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage zu leisten. Hierbei werden Elektronen³ und Protonen mit jeweils hoher Teilchenenergie zur Kollision gebracht. Einer der Kollisionspunkte wird vom H1-Detektor umgeben, der nahezu den gesamten Raumwinkelbereich abdeckt. Durch Identifizierung der in dieser tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung erzeugten Reaktionsprodukte sowie durch Rekonstruktion der Ereigniskinematik gewinnt man einen Einblick in die Struktur des Protons.

Die Analyse von Elektron-Proton-Streuereignissen mit exklusiven Endzuständen, wie z. B. die Produktion von schweren Vektormesonen, erlaubt eine noch gezieltere Untersuchung der Protonstruktur. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass solche Ereignisse relativ selten sind. Mit der Zielsetzung, die Ereignisrate um etwa einen Faktor fünf zu erhöhen, wurde der HERA-Speicherring und das H1-Experiment daher seit dem Jahre 2000 einem umfangreichen Ausbauprogramm (Upgrade) unterzogen, wobei der umgebaute Ring im folgenden als HERA-II bezeichnet wird. Dabei läßt sich die erhöhte Wechselwirkungsrate nur dann optimal im Experiment ausnutzen, wenn die erforderlichen technischen Möglichkeiten zur Ereignisselektion und -aufzeichnung vorhanden sind. Diese Aufgabe übernimmt im H1-Experiment ein komplexes, mehrstufiges Triggersystem.

Im Rahmen des Upgrades wurde zur Verbesserung des Selektionsvermögens der dreistufige *Fast Track Trigger* (FTT) gebaut und in das bestehende H1-Triggersystem integriert. Seine Aufgabe besteht darin, die dreidimensionalen Spuren, entlang deren sich die Teilchen im Endzustand bewegen, unter Verwendung der Informationen der zentralen Spurkammern zu rekonstruieren. Auf den ersten beiden Stufen erfolgt die Berechnung der charakteristischen Spurparameter. Diese werden von den auf der dritten Stufe implementierten Triggeralgorithmen für eine spurbasierte Ereignisselektion verwendet. Der Vorgang darf dabei eine für die dritte Stufe charakteristische Zeit von etwa 100 μ s nicht überschreiten. Daher ist es wichtig, schon im Vorfeld zu wissen, ob die Laufzeiten der verwendeten Triggeralgorithmen innerhalb dieser Zeit liegen oder ob sie optimiert werden müssen.

Die vorliegende Arbeit dient zur Entwicklung einer Simulation, mit der die Untersuchung des Laufzeitverhaltens der auf der dritten Stufe (FTT-L3) eingesetzten Triggeralgorithmen realisiert werden soll, um die daraus gewonnenen Erkenntnisse für eine Geschwindigkeitsoptimierung zur Verfügung zu stellen. Um dieses Ziel zu erreichen, soll die im folgenden als *L3Velo* bezeichnete Simulation auf einem konventionellen PC-System⁴ lauffähig sein und die Durchführung von Laufzeittests der zu untersuchenden Triggeralgorithmen ermöglichen. Die Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit ist die Suche nach einer Korrelation zwischen den gemessenen Laufzeiten der beiden Computersysteme. Die Kenntnis des resultierenden Umrechnungsfaktors erlaubt die Vorausbestimmung der Laufzeit des zu untersuchenden Triggeralgorithmus auf dem Hardware-system mittels des konventionellen PC-Systems. Zur Eichung der Laufzeiten und zur Durchführung der Laufzeittests auf beiden Systemen wird ein wohldefinierter Triggeralgorithmus zur Selektion von exklusiven Endzuständen verwendet.

¹Hadron-Elektron Ring Anlage

²Deutsches Elektronen-Synchrotron

³Soweit nicht explizit erwähnt, wird im folgenden Elektron synonym für Elektronen und Positronen benutzt

⁴Personal Computer

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

- Kapitel 1 gibt einen kurzen Überblick über den Aufbau des HERA-Speicherrings. Daran schließt sich eine kurze Einführung in die Theorie der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung an. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Prozessen mit exklusiven Endzuständen.
- Das 2. Kapitel beschreibt das Luminositätsupgrade des HERA-Speicherrings und geht anschließend detailliert auf das H1-Experiment in der Konfiguration für HERA-II ein. Anschließend folgt eine ausführliche Beschreibung des H1-Triggersystems.
- Im dritten Kapitel wird die Funktionsweise des dreistufigen Fast Track Triggers vorgestellt. Hierbei stehen Funktionsweise und Hardwarerealisierung im Zentrum der Beschreibung. Insbesondere die dritte Stufe des Fast Track Triggers wird näher erläutert.
- In Kapitel 4 wird zunächst auf die Speicherung und den Zugriff auf Daten im H1-Experiment eingegangen. Im folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise der FTT-Triggersimulation L3Velo beschrieben.
- Das fünfte Kapitel konzentriert sich auf die Ergebnisse der mit L3Velo durchgeführten Laufzeitanalysen. Hierzu werden zunächst die einzelnen Methoden der Laufzeitmessung vorgestellt und miteinander verglichen. Im folgenden wird ein Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Mesonen beschrieben, dessen Laufzeitverhalten auf dem konventionellen PC-System und dem betreffenden Hardwaressystem der dritten Stufe des FTTs untersucht wird. Auf diesem Selektionsalgorithmus basierend, wird untersucht, ob die erwartete Korrelation zwischen beiden Computersystemen existiert.
- Abschließend werden die Ergebnisse aller Untersuchungen zusammengefasst.

Kapitel 1

Elektron-Proton-Streuung bei HERA

1.1 Der HERA-Speicherring

Der etwa 6,3 km umfassende Elektron-Proton-Speicherring HERA (siehe Abbildung 1.1) wurde im Jahre 1991 an der Großforschungsanlage DESY in Hamburg gebaut und Anfang 1992 in Betrieb genommen. Als einziger Speicherring bietet HERA die Möglichkeit, hochenergetische Elektronen- und Protonenstrahlen zur Kollision zu bringen. Nach dem Durchlaufen der Vorbeschleuniger (siehe Abbildung 1.1) werden beide Teilchensorten in den HERA-Speicherring injiziert. In zwei separaten Strahlrohren werden Protonen und Elektronen in entgegengesetzter Richtung jeweils auf ihre Endenergie von 920 GeV bzw. 27,5 GeV beschleunigt. Innerhalb des

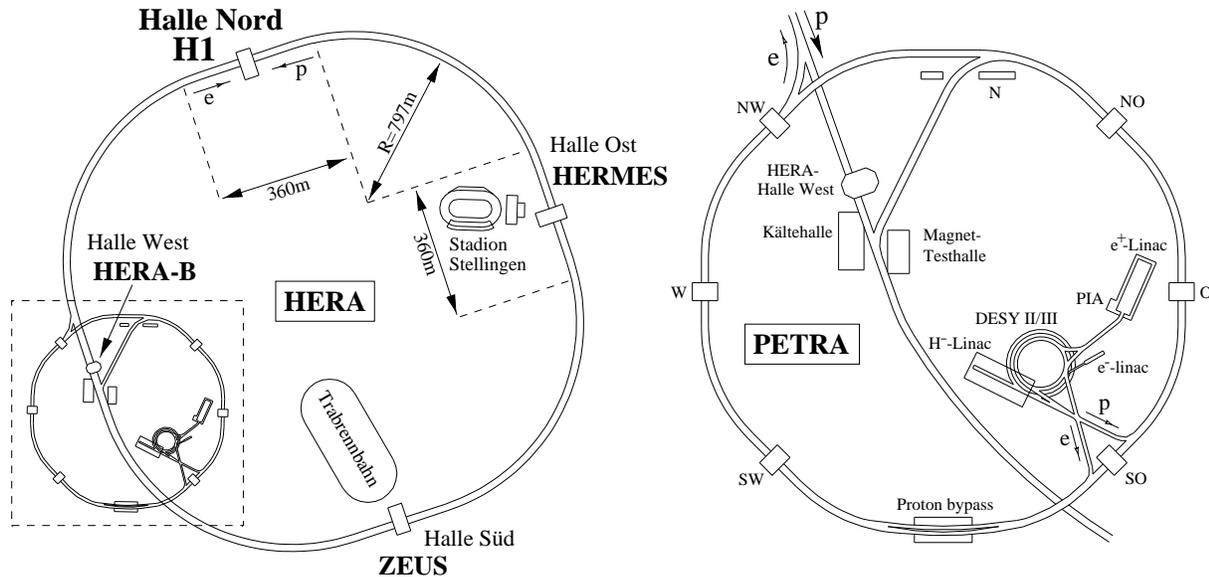


Abbildung 1.1: Der HERA-Speicherring und seine Vorbeschleuniger.

HERA-Rings sind Elektronen und Protonen nicht als kontinuierliche Strahlen gespeichert, sondern werden in Teilchenpaketen, den sogenannten *Bunchen*, beschleunigt. Pro Teilchenart können bis zu 180 Bunchen injiziert werden. Alle 96 ns werden die Bunchen an zwei Wechselwirkungszone zur Kollision gebracht. Die damit verknüpfte *Bunchcrossingrate* beträgt 10,4 MHz. An den beiden Wechselwirkungszone werden die Reaktionsprodukte der ep -Streuung mit dem H1-Detektor in der nördlichen und mit dem ZEUS-Detektor in der südlichen Experimentierhalle untersucht. An

den beiden anderen Experimentierzonen nutzt einerseits das HERA-B-Experiment den Protonenstrahl und andererseits das HERMES-Experiment den Elektronenstrahl. In beiden Experimenten wird der benutzte Teilchenstrahl mit einem festen Target zur Kollision gebracht.

Nach Einführung einiger kinematischer Begriffe wird in den folgenden Abschnitten eine Auswahl möglicher Messungen zur Bestimmung der Protonstruktur mit Schwerpunkt auf ep -Streuungen mit exklusiven Endzuständen vorgestellt.

1.2 Kinematik der ep -Streuung

Die Streuung eines Elektrons an einem Proton kann durch den Austausch eines virtuellen Photons γ oder eines Eichbosons der schwachen Wechselwirkung (Z^0 , W^\pm) beschrieben werden. Dabei seien k und P die Viererimpulse des einlaufenden Elektrons bzw. des Protons im Anfangszustand. Beim Austausch eines neutralen Eichbosons beobachtet man im Endzustand das gestreute Elektron mit Viererimpuls k' und das hadronische System X (siehe Abbildung 1.2 a). Dieser Prozess wird als *neutraler Strom* bezeichnet. Im Falle des *geladenen Stromes* wird ein geladenes Eichboson ausgetauscht (siehe Abbildung 1.2 b), wobei im Endzustand ein Neutrino mit Viererimpuls k' und das hadronische System X vorliegen. Die Größe q beschreibt den Viererimpuls des jeweils ausgetauschten Eichbosons. Bei den bei HERA-Energien erreichbaren Schwerpunktsenergien ist

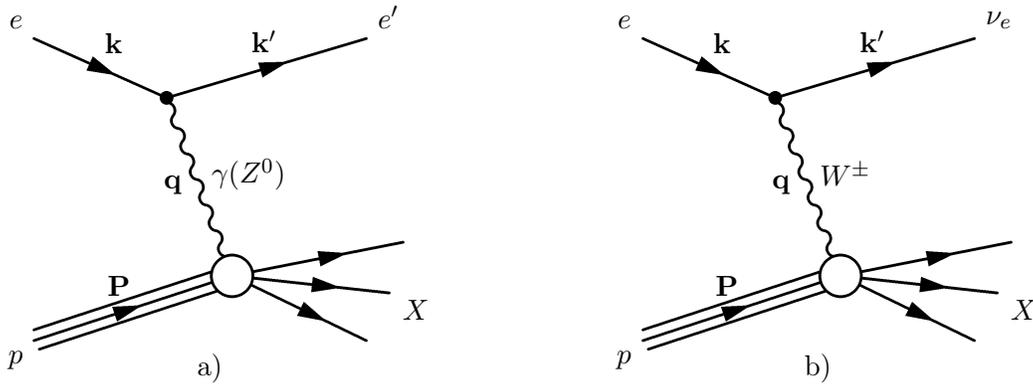


Abbildung 1.2: *Feynman-Graphen niedrigster Ordnung für die Elektron-Proton-Streuung. Man unterscheidet zwischen den Ereignissen mit Austausch von neutralen a) und geladenen Eichbosonen b).*

der Austausch von Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung in weiten Bereichen des zugänglichen, kinematischen Phasenraums aufgrund ihrer hohen Masse ($M_W \approx 80 \text{ GeV}$, $M_{Z^0} \approx 91 \text{ GeV}$) stark unterdrückt. Im folgenden soll daher ausschließlich der Photonaustausch betrachtet werden.

Vier lorentzinvariante Größen werden üblicherweise zur Beschreibung der Ereigniskinetik verwendet. Unter der bei HERA zulässigen Vernachlässigung der Ruhemassen von Elektron und Proton sind sie durch die Relation

$$Q^2 \approx sxy \tag{1.1}$$

miteinander verknüpft. Hierbei ist die Größe s das Quadrat der Schwerpunktsenergie des Elektron-Proton-Systems, die durch

$$s = (p + k)^2 \approx 4E_e E_p \tag{1.2}$$

definiert ist. Sie läßt sich aus der Energie des einlaufenden Elektrons E_e und der des Protons E_p berechnen. Das Quadrat des Viererimpulses des ausgetauschten Photons ist bei HERA stets negativ, so dass hier stattdessen

$$Q^2 = -\mathbf{q}^2 = -(\mathbf{k} - \mathbf{k}')^2 \quad (1.3)$$

verwendet wird. Desweiteren sind die *Bjorken-Skalenvariable* x und die *Inelastizität* y definiert durch:

$$x = \frac{Q^2}{2\mathbf{P} \cdot \mathbf{q}} \ , \quad y = \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{q}}{\mathbf{P} \cdot \mathbf{k}}. \quad (1.4)$$

y beschreibt im Ruhesystem des Protons den relativen Energieverlust des Elektrons. Die Größe x kann im Rahmen des naiven Quark-Parton-Modells, welches im nächsten Abschnitt beschrieben wird, als Impulsbruchteil des gestreuten Quarks relativ zum Gesamtimpuls des Protons betrachtet werden, der vom mit dem Eichboson wechselwirkenden Parton getragen wird. Die Wertebereiche dieser beiden dimensionslosen Variablen sind durch $0 \leq x \leq 1$ und $0 \leq y \leq 1$ definiert.

Gleichung 1.1 zeigt, dass bei fester Schwerpunktsenergie \sqrt{s} die Ereigniskinematik der betrachteten Prozesse durch Bestimmung von zwei der drei übrigen lorentzinvarianten Größen vollständig beschrieben wird.

Typischerweise wird als quantitative Größe der Wirkungsquerschnitt σ angegeben, der ein Maß für die Anzahl beobachteter Ereignisse in einem bestimmten kinematischen Bereich ist. Für kleine Werte von Q^2 , bei denen der Photonaustausch dominiert, kann der Wirkungsquerschnitt der tiefinelastischen ep -Streuung in niedrigster Ordnung geschrieben werden als

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha_{em}^2}{xQ^4} [y^2 x F_1(x, Q^2) + (1-y) F_2(x, Q^2)]. \quad (1.5)$$

Hierbei beschreibt α_{em} die elektromagnetische Kopplungskonstante. Die innere Struktur des Protons wird durch die von Q^2 und x abhängigen *Strukturfunktionen* F_1 und F_2 parametrisiert.

1.3 Die Strukturfunktionen F_1 und F_2

Gemäß dem naiven Quark-Parton-Modell ist das Proton aus freien und punktförmigen Konstituenten, den *Partonen*, die den Spin-1/2 tragen, aufgebaut [2]. Die Partonen im Proton wurden mit den von Gell-Mann im Jahre 1964 postulierten Quarks identifiziert. Auf diese Weise ist es möglich, die große Zahl von bekannten Hadronen aus einigen wenigen elementaren Bausteinen zu konstruieren [3]. Danach bilden drei Quarks, zwei up-Quarks und ein down-Quark, die Substruktur des Protons.

Im naiven Quark-Partonmodell beschreiben sogenannte *Quarkdichtefunktionen* $q_i(x)$ die Verteilung der Quarks im Proton. Sie geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quark der i -ten Sorte mit dem Impulsbruchteil x im Proton gefunden wird. Der Zusammenhang zwischen $q_i(x)$ und den Strukturfunktionen F_1 und F_2 ist gegeben durch:

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 q_i(x) \quad (1.6)$$

$$F_2(x) = x \sum_i e_i^2 q_i(x). \quad (1.7)$$

Hierbei ist e_i die elektrische Ladung des i -ten Quarkflavors in Einheiten der Elementarladung. Aus den Gleichungen 1.6 und 1.7 ergibt sich die sogenannte *Callan-Gross-Relation* [4]

$$F_2(x) = 2xF_1(x). \quad (1.8)$$

Man erkennt, dass im Quark-Parton-Modell die Strukturfunktionen F_1 und F_2 nicht von Q^2 abhängen. Dieses als *Skaleninvarianz* bezeichnete und von Bjorken vorausgesagte Verhalten wurde bei Streuexperimenten am SLAC im Jahre 1968 für mittlere Werte der Bjorken-Skalenvariable $x \approx 0,2$ bestätigt [5, 6].

In Abbildung 1.3 sind Messergebnisse für die Strukturfunktion F_2 von Experimenten mit festen Targets und aus ep -Daten von HERA über einen großen x - und Q^2 -Wertebereich dargestellt. Hierbei erkennt man, dass die Skaleninvarianz nur für den am SLAC lokalisierten Bereich des Partonimpulses x erfüllt ist. Zur Erklärung der Verletzung der Skaleninvarianz außerhalb dieses Bereichs müssen somit zusätzliche Mechanismen im Proton zur Beschreibung seiner Struktur berücksichtigt werden, die sich jedoch nicht durch das naive Quark-Parton-Modell beschreiben lassen.

Erst durch die Einführung der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quanten-Chromodynamik (QCD), konnte das Phänomen der Verletzung der Skaleninvarianz vollständig erklärt werden. Innerhalb der QCD [7, 8, 9] wird die Wechselwirkung von Quarks untereinander durch den Austausch von Gluonen beschrieben. Letztere können einerseits für kurze Zeit in virtuelle Quark-Antiquarkpaare fluktuieren, andererseits auch weitere Gluonen emittieren, die selbst Farbladung tragen. Daher werden neben den bestehenden Valenzquarks noch *Seequarks* erzeugt, die ebenfalls einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zur Strukturfunktion F_2 leisten. Sie entstehen durch Abstrahlungsprozesse und besitzen daher nur einen Bruchteil des Impulses des ursprünglichen Teilchens. Aus diesem Grund sind sie typischerweise im Bereich kleiner Werte der Bjorken-Skalenvariablen x .

Die Messungen der HERA-Experimente H1 und ZEUS im Jahr 2000 bestätigten die theoretischen Voraussagen, so dass das QCD-basierte Modell des Protons als außerordentlich erfolgreich eingestuft werden kann. Abbildung 1.3 zeigt, dass der tiefinelastische Streuprozess $e + p \rightarrow e + X$ über einen großen Bereich der kinematischen Variablen x und Q^2 präzise vermessen wurde.

1.4 Prozesse mit besonderen Endzuständen

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wird sich das zukünftige Messprogramm bei HERA auf Messungen konzentrieren, die bisher durch beschränkte Statistik limitiert waren. Neben der ep -Streuung bei höchsten Q^2 , soll mit Hilfe der höheren Statistik ebenfalls nach Prozessen jenseits des Standardmodells gesucht werden. Weiterhin liefert die Analyse von Prozessen mit besonderen Endzuständen die Möglichkeit zur genaueren Untersuchung der Protonstruktur. Diese sind für die vorliegende Arbeit relevant und sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Zur Messung der Protonstrukturfunktion F_2 wird allgemein der Prozess $e + p \rightarrow e + X$ betrachtet, wobei die Zusammensetzung des hadronischen Endzustands X keinen besonderen Stellenwert einnimmt. Dagegen ermöglichen Messungen von besonderen Endzuständen z. B. die direkte ex-

ZEUS+H1

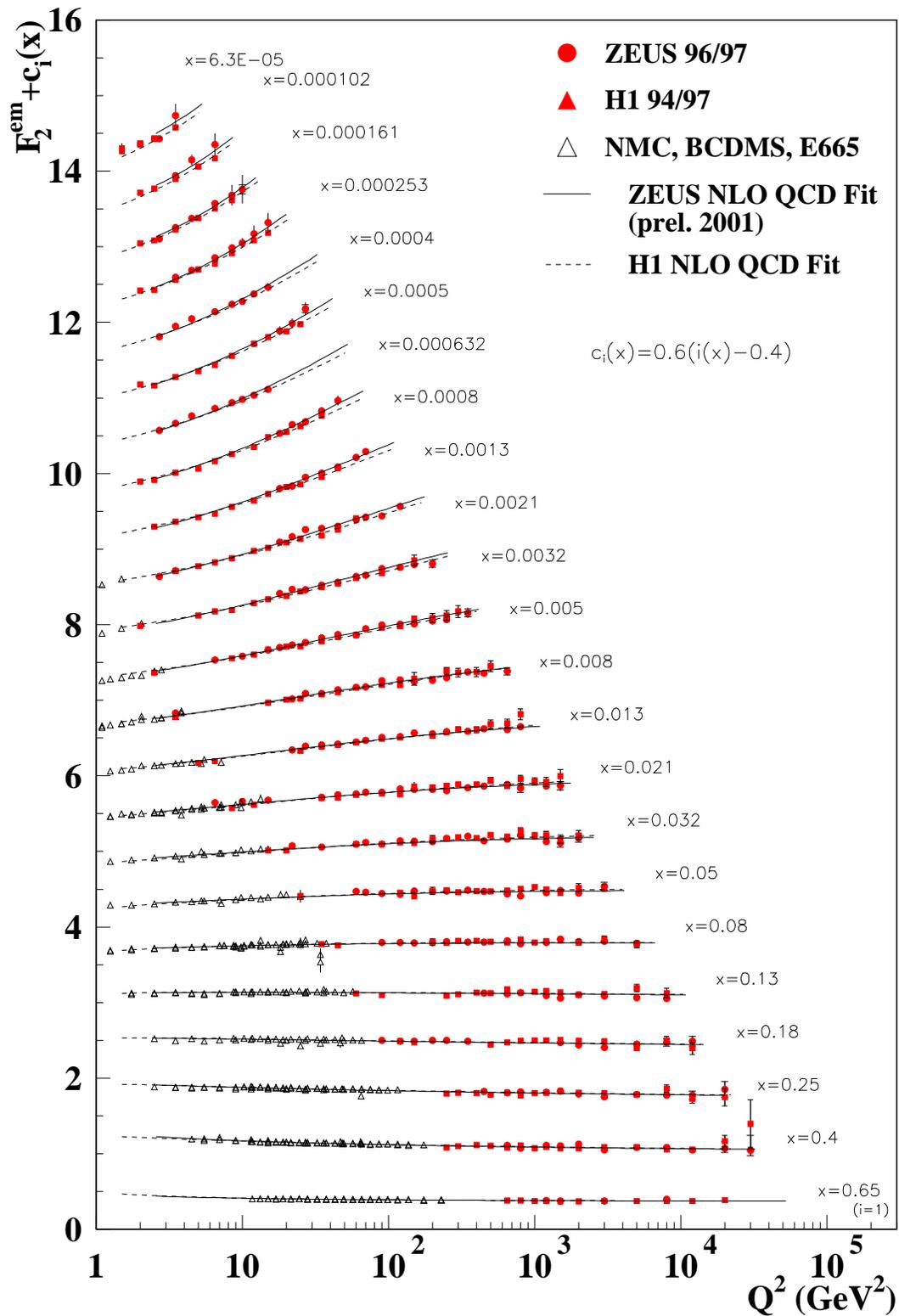


Abbildung 1.3: Protonstrukturfunktion in Abhängigkeit von Q^2 für verschiedene x . Neben den Messungen der HERA-Experimente H1 und ZEUS sind auch Daten von Fixed-Target-Experimenten eingetragen. Für $x \approx 0,2$ ist F_2 nahezu unabhängig von Q^2 . Zu den Messpunkten sind QCD-basierte Fits eingezeichnet. Man sieht deutlich, dass über mehrere Größenordnungen in Q^2 und x Messung und theoretische Vorhersage konsistent sind. [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

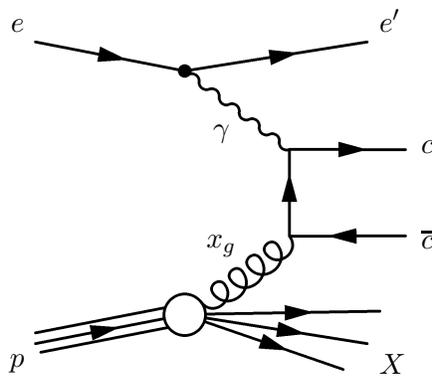


Abbildung 1.4: Graph zur Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares durch Photon-Gluon-Fusion.

perimentelle Bestimmung der Gluonverteilung im Proton und damit eine gezieltere Analyse der Protonstruktur¹.

Daher ist die Produktion schwerer Quarks ein wichtiges Beispiel für einen besonderen Endzustand. In Abbildung 1.4 ist der Graph einer Photon-Gluon-Fusion niedrigster Ordnung dargestellt. Wie bereits erwähnt, besitzt das Proton als Valenzquarks nur up- und down-Quarks. Aus diesem Grund ist der dominierende Prozess zur Erzeugung eines $c\bar{c}$ -Paares die Boson-Gluon-Fusion, wodurch die Messung dieses besonderen Zustands direkt sensitiv auf die Gluondichte im Proton ist. Das dabei ausgetauschte Photon koppelt über eine Quarkschleife an ein Gluon, wodurch ein $q\bar{q}$ -Paar entsteht, das tiefere Einblicke in die Protonstruktur erlaubt.

Eine Ereignisklasse, die sich zur Messung der Gluondichte eignet, ist die *offene Charm-Produktion*. Hierbei ist einer der wichtigsten Ereigniskanäle die Produktion von D^* -Mesonen. Deren Valenzquarkkonfiguration ist (c,\bar{d}) für das positiv und (\bar{c},d) für das negativ geladene Meson. Wegen der paarweisen Erzeugung der c -Quarks, existieren im Ereignis immer zwei Teilchen mit charm-Inhalt, wobei in der experimentellen Praxis nur eines nachgewiesen wird. Zum Nachweis eines D^* -Mesons eignet sich insbesondere der folgende auch als *goldener Charm-Zerfall* bekannte Prozess

$$D^{*+} \xrightarrow{68,3\%} D^0 \pi_{\text{slow}}^+ \xrightarrow{3,85\%} K^- \pi^+ \pi_{\text{slow}}^+ \quad (1.9)$$

Der Index *slow* am Pionsymbol in der angegebenen Zerfallskette beschreibt, dass das Pion mit einem geringen 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. Im H1-Experiment wurde die Gluondichte mit Hilfe des oben beschriebenen Zerfalls gemessen. In Abbildung 1.5 wird das Resultat der Messung für Photoproduktion (γp), bei der $Q^2 \approx 0$ gilt, und tiefinelastische Streuung (DIS) mit $Q^2 > 1 \text{ GeV}$ gezeigt. Man erkennt, dass die Fehler bei beiden Messungen durch den statischen Fehler insbesondere bei kleinen Werten von x_g dominiert wird. Zusätzlich sind zu den Meßwerten noch zwei QCD-basierte Vorhersagen eingezeichnet.

Ergänzend zur offenen Charm-Produktion ist ebenfalls die Produktion schwerer Vektormesonen eine geeignete Ereignisklasse zur Messung der Gluondichte des Protons. Das J/Ψ -Meson ($m(J/\Psi) = (3096 \pm 0,04) \text{ MeV}$ [1]) ist ein gebundener $c\bar{c}$ -Zustand, der ebenfalls aus der Photon-Gluon-Fusion resultiert. Zum Nachweis von J/Ψ -Mesonen wird meistens der leptonic Zerfall in ein Elektron-Positron- oder ein Myon-Antimyonpaar verwendet. Als problematisch zeigt sich hierbei, dass nur in etwa 6% aller Zerfälle diese beiden Endzustände jeweils auftreten werden [1].

¹Mit Hilfe der QCD kann die Gluonverteilung auch (über Fits) indirekt extrahiert werden. Direkte Messung via Heavy Quarks.

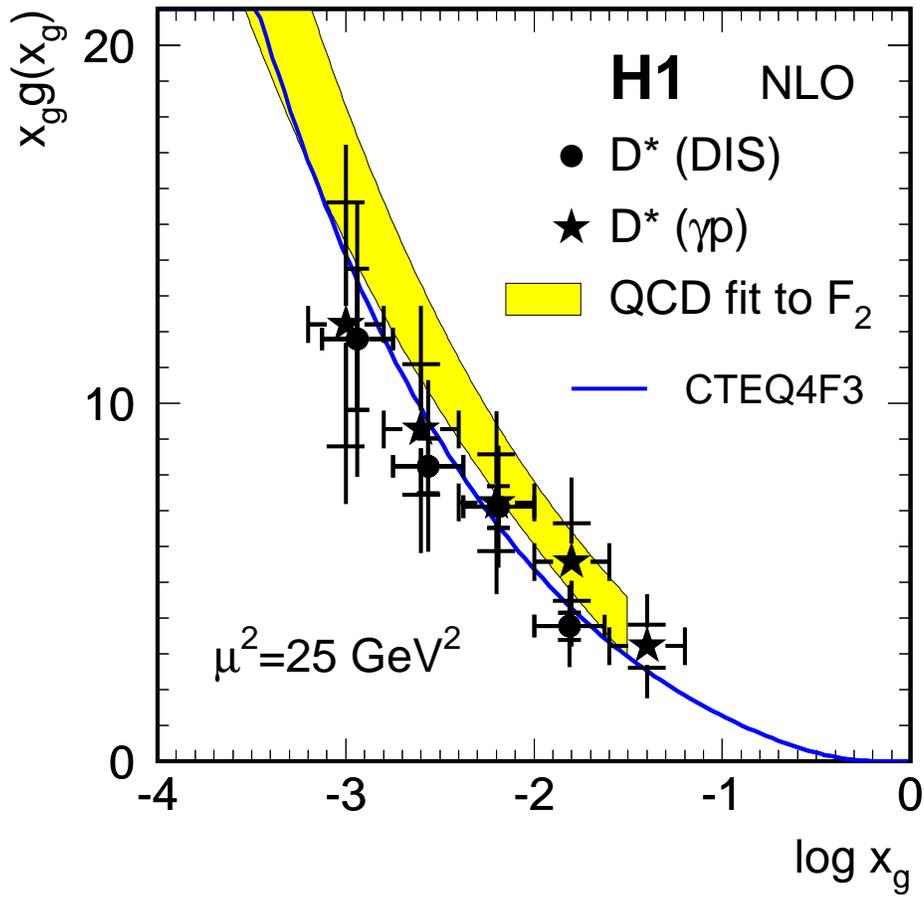


Abbildung 1.5: Gluondichte des Protons extrahiert aus Ereignissen der D^* -Produktion [19].

In beiden Fällen (J/Ψ - und D^* -Produktion) sind die Analysen zur Zeit statistisch limitiert. Das Ziel, zukünftige Messungen mit verbesserter Statistik zu ermöglichen, wird nach Abschluss des Upgrade-Programms bei HERA erreicht. Um den gewonnenen Vorteil aus der erhöhten Ereignisrate optimal nutzen und damit eine größere Anzahl von physikalisch interessanten Ereignissen selektieren zu können, werden erhöhte Anforderungen an die Triggersysteme gestellt. Durch den Einsatz des dreistufigen Fast Track Trigger (siehe Kapitel 3) ist man bei H1 in der Lage, die Zerfallsprodukte der oben beschriebenen Endzustände schon auf Triggerniveau zu rekonstruieren.

Kapitel 2

Das H1-Experiment bei HERA

Nachdem im ersten Teil dieses Kapitels das Upgrade-Programm bei HERA näher beschrieben wurde, soll im zweiten Teil ein Überblick über die einzelnen Komponenten des H1-Detektors und ihre Funktion gegeben werden. Daran schließt sich eine ausführliche Beschreibung des H1-Triggersystems an.

2.1 Das Luminositäts-Upgrade

Schon im letzten Kapitel wurde erwähnt, dass die Analyse von seltenen Ereignissen, d. h. solchen mit geringem Wirkungsquerschnitt σ , durch eine höhere Ereignisrate R deutlich erweitert werden könnte. Zwischen den beiden Größen R und σ besteht der folgende lineare Zusammenhang:

$$R = \mathcal{L}\sigma. \quad (2.1)$$

Der Proportionalitätsfaktor \mathcal{L} ist die sogenannte *instantane Luminosität* und ein Maß für die in einem Speicherringexperiment beobachtbare Anzahl von Ereignissen. Das Hauptziel des umfangreichen Upgrade-Programms bei HERA ist eine deutliche Erhöhung der Luminosität.

Bezeichnen σ_x und σ_y die Standardabweichungen der (gaussförmigen) transversalen Ausdehnung der Teilchenstrahlen um die Strahlmitte im Wechselwirkungspunkt und geht man davon aus, dass sich die Strahlungsquerschnitte von Elektron- und Protonstrahl im Wechselwirkungspunkt vollständig überlappen, so gilt für die instantane Luminosität eines *ep*-Colliders die folgende Abhängigkeit:

$$\mathcal{L} \sim \frac{1}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (2.2)$$

Anhand dieser Abhängigkeit läßt sich erkennen, dass eine Luminositätssteigerung erzielt werden kann, indem die Teilchenstrahlen vor Erreichen der Strahlungskreuzung transversal zu möglichst kompakten Teilchenpaketen fokussiert werden. Daher werden im Rahmen des Upgrades nahe den beiden Wechselwirkungszonen am HERA-Speicherring supraleitende Fokussierungsmagnete positioniert.

Durch diese Maßnahme soll eine maximale Luminosität von $7,57 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [20] erreicht werden. Verglichen mit dem Wert vor dem Upgrade (HERA-I) von $1,69 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [20] entspricht dies etwa einer Verfünffachung. Das Ziel bestand darin, im Zeitraum von 2002 bis 2006 eine integrierte Luminosität von $\int \mathcal{L} dt = 1000 \text{ pb}^{-1}$ zu erreichen. Zwischen 1993 und 2000 wurden von den Experimenten H1 und ZEUS insgesamt 120 pb^{-1} aufgezeichnet.

2.2 Der H1-Detektor

Zur Rekonstruktion der Ereigniskinematik und zur Identifikation von Endzuständen in ep -Streueignissen ist eine genaue Vermessung der im Endzustand auftretenden Teilchen zwingend notwendig. Der H1-Detektor [21, 22] liefert eine präzise Identifikation und Rekonstruktion der entstehenden Teilchen nahezu im gesamten Raumwinkelbereich. Insbesondere gilt dies für das gestreute Elektron. Die unterschiedlichen Energien von Elektron- und Protonstrahl führen zu einem erhöhten Teilchenfluss in Protonrichtung, so dass der H1-Detektor der Topologie der Ereignisse entsprechend asymmetrisch aufgebaut ist. Abbildung 2.1 zeigt eine Seitenansicht des H1-Detektors in der Konfiguration für HERA-II. Die dort abgebildeten Zahlen entsprechen den mit [Zahl] bezeichneten Detektorkomponenten, die in Tabelle 2.1 aufgelistet sind. Deutlich zu erkennen sind die neuen Fokussierungsmagnete GO [16] und GG [17], die schon im vorherigen Abschnitt erwähnt wurden.

Zur eindeutigen Beschreibung des Detektors sowie der im Detektor beobachteten Teilchen hat man sich auf ein einheitliches Koordinatensystem verständigt. Der Ursprung des rechtshändigen H1-Koordinatensystems befindet sich im nominellen Wechselwirkungspunkt [1]. Die x -Achse weist in Richtung des Mittelpunktes des HERA-Rings, die z -Achse ist durch die Richtung des Protonstrahls definiert. Zusätzlich benutzt man zur Beschreibung den radialen Abstand r zum Strahlrohr und zwei Winkel: den *Azimutalwinkel* φ , der von der x -Achse ausgehend den Winkel in der x - y -Ebene beschreibt und den Polarwinkel θ , der bezüglich der z -Achse den Winkel in der r - z -Ebene beschreibt. Im folgenden wird als *Vorwärtsbereich* der Abschnitt kleiner Polarwinkel bezeichnet, wohingegen der *Rückwärtsbereich* durch große Polarwinkel charakterisiert wird. Durch das Strahlrohr gelangen Elektronen und Protonen in das Detektorvolumen und treffen am nominellen Wechselwirkungspunkt aufeinander. Die dem Wechselwirkungspunkt am nächsten gelegene Detektorkomponente ist der zentrale Siliziumdetektor CST [2] (**C**entral **S**ilicon **T**racker) [23]. Er umgibt den nominellen Wechselwirkungspunkt und liefert präzise Informationen zur Trennung von Primär- und Sekundärvertices. Sein Polarwinkelakzeptanzbereich ist $30^\circ < \theta < 150^\circ$. An den CST schließen sich zwei weitere Siliziumdetektoren an. In negativer z -Richtung befindet sich der rückwärtige Siliziumdetektor BST [3] (**B**ackward **S**ilicon **T**racker) [24, 25]. Der vorwärtige Siliziumdetektor FST [4] (**F**orward **S**ilicon **T**racker) [26], der im Rahmen des Upgradeprogramms dem H1-Detektorsystem hinzugefügt wurde, schließt sich in positiver z -Richtung an den CST an. Während der BST zur Messung des Streuwinkels von Elektronen dient, die in den Rückwärtsbereich gestreut werden, wird durch den Einsatz des FSTs die Spurrekonstruktion in Vorwärtsrichtung verbessert. Die Polarwinkelakzeptanzbereiche für den BST und den FST sind $164^\circ < \theta < 176^\circ$ bzw. $8^\circ < \theta < 16^\circ$. Die Siliziumzähler von BST und FST sind im Gegensatz zum CST senkrecht zum Strahlrohr ausgerichtet.

Weiter außen schließt sich in radialer Richtung das komplexe Spurkammersystem des H1-Detektors an. Es setzt sich aus dem vorwärtigen Spurkammersystem FTD [9] (**F**orward **T**racker **D**etector) [27] und dem aus verschiedenen Komponenten ([5,6,7,8]) bestehenden zentralen Spurkammersystem zusammen. Die Polarwinkelakzeptanzbereiche des FTDs bzw. des zentralen Spurkammersystems sind $7^\circ < \theta < 25^\circ$ [27] bzw. $25^\circ < \theta < 155^\circ$ [22]. Der FTD dient zur präzisen Untersuchung von Wechselwirkungen in der Region großer Werte von x und Q^2 , da in diesem Fall sowohl das Elektron als auch der hadronische Endzustand in den Vorwärtsbereich des H1-Detektors gestreut werden.

Das zentrale Spurkammersystem dient zur Vermessung geladener Teilchen im Bereich $25^\circ < \theta < 165^\circ$ und wird, da es für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung ist, im

Zahl	Detektorkomponente	Abkürzung
1	Nomineller Wechselwirkungspunkt	IP
<i>Spurdetektoren</i>		
2	Zentraler Silizium-Detektor	CST
3	Rückwärtiger Silizium-Detektor	BST
4	Vorwärtiger Silizium-Detektor	FST
5	Zentrale Innere Proportionalkammer	CIP2000
6	Zentrale Äußere Proportionalkammer	COP
7	Innere Zentrale Jetkammer	CJC1
8	Äußere Zentrale Jetkammer	CJC2
9	Vorwärts-Spurkammersystem	FTD
10	Rückwärtige Proportionalkammer	BPC
<i>Kalorimeter</i>		
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.
15	Spaghetti-Kalorimeter (hadronischer Teil)	SpaCal hadr.
<i>Magnete</i>		
16	Fokussierungsmagnet GO	
17	Fokussierungsmagnet GG	
18	Solenoidspule	
<i>Myondetektoren</i>		
19	Zentrales Myonsystem	CMD
20	Vorwärts-Myonsystem mit Toroidmagnet	FMD

Tabelle 2.1: *Komponenten des H1-Detektors. Die Zahlen beziehen sich auf Abbildung 2.1. (Vergleiche Erläuterungen im Text).*

nächsten Abschnitt näher erläutert.

Bis auf den rückwärtigen Bereich ist das Spurkammersystem von einem Flüssig-Argon-Kalorimeter (**L**iquid **A**rgon **C**alorimeter) [28] umgeben. Dabei handelt es sich um ein *Sampling-Kalorimeter*, d. h. es werden unterschiedliche Materialien für die Absorption und den Nachweis der Teilchen verwendet, wobei sich Schichten aus aktivem Nachweismaterial mit Schichten aus reinem Absorbermaterial abwechseln. Es ist in einen elektromagnetischen [12] und einen hadronischen Bereich [13] unterteilt. Als aktives Material wird in beiden Bereichen flüssiges Argon eingesetzt, das durch Primärteilchen und erzeugte Sekundärteilchen ionisiert wird. Im elektromagnetischen Teil wird Blei als Absorbermaterial eingesetzt. Dagegen besteht der Absorber im hadronischen Teil aus einer Stahllegierung. Die Aufgabe dieses Kalorimeters besteht darin, die Energie der bei der Wechselwirkung entstehenden Teilchen zu messen. Es erfasst einen Polarwinkelakzeptanzbereich von $5^\circ < \theta < 156^\circ$. Das gesamte LAr-Kalorimeter befindet sich in einem Kryostaten [11].

Das sogenannte Spaghetti-Kalorimeter SpaCal (**S**paghetti **C**alorimeter) [29, 30] ist im Rückwärtsbereich positioniert und besitzt einen Akzeptanzbereich von $155^\circ < \theta < 177^\circ$. Ebenso wie das LAr-Kalorimeter ist das SpaCal ein Sampling-Kalorimeter, wobei als Absorbermaterial Blei und als aktives Material dünne szintillierende Fasern eingesetzt werden. Durch die in das SpaCal einfallenden Teilchen wird im Absorbermaterial ein Schauer von Sekundärteilchen produziert, der in den Fasern Lichtblitze erzeugt. Die Fasern sind an Photomultipliern angeschlossen, die

die Lichtblitze in ein elektrisches Signal umwandeln. Dabei ist die nachgewiesene Lichtmenge ein Maß für die deponierte Energie der Primärteilchen.

Das SpaCal ist ebenfalls in einen elektromagnetischen [14] und einen hadronischen [15] Bereich unterteilt. Der wesentliche Unterschied ist die neunmal höhere Granularität des elektromagnetischen Teils gegenüber dem hadronischen. Aufgrund des Volumenverhältnisses von Blei zu Faser (2.27 : 1) im elektromagnetischen Bereich erlaubt das SpaCal eine genaue Messung der Energiedeposition und liefert eine präzise Ortsrekonstruktion.

Zwischen dem zentralen Spurkammersystem und dem SpaCal befindet sich eine weitere Spurkammer, die rückwärtige Proportionalkammer BPC [10] (**B**ackward **P**roportional **C**hamber). Sie wurde für den Betrieb von HERA nach dem Upgrade vollständig neu konstruiert. Ihre Aufgabe ist die möglichst genaue Vermessung des Auftreffpunkts eines Teilchens auf die SpaCal-Oberfläche.

Alle bisher beschriebenen Detektorkomponenten befinden sich innerhalb einer großen supraleitenden Magnetspule [18], die ein magnetisches Feld der Stärke 1,15 Tesla erzeugt. Die Spuren von geladenen Teilchen werden durch die aufgrund des Magnetfeldes herrschende Lorentzkraft gekrümmt. Aus der Krümmung kann der Impuls der abgelenkten Teilchen bestimmt werden. Die Rückführung des magnetischen Flusses geschieht durch das mit Streamerrohrkammern instrumentierte Eisenjoch. Die Kammern sind mit einem ionisierenden Gas gefüllt und besitzen einen quadratischen Querschnitt, in dessen Mitte sich ein Draht befindet. Hierbei ist das Nachweisprinzip das gleiche wie das der Drahtkammern im Spurkammersystem, das im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. An der Innen- und Außenseite des instrumentierten Eisens sind je drei weitere Lagen von Streamerrohrkammern installiert, die zusammen mit dem Eisen das zentrale Myonsystem CMD [19] (**C**entral **M**yon **D**etector) [22] bilden. Seine Aufgabe ist die Messung von Myonspuren und der Nachweis der restlichen Energie von Hadronen, die innerhalb der Kalorimetersysteme nicht vollständig absorbiert werden konnten. Das Vorwärts-Myon-System FMD [20] (**F**orward **M**yon **D**etector) [31] dient zur Impulsmessung von Myonen im Energiebereich von 5 GeV bis 200 GeV, die den Detektor in Vorwärtsrichtung unter einem Winkel von $3^\circ < \theta < 17^\circ$ verlassen.

Zur Reduktion der Anzahl von Untergrundereignissen, die durch Wechselwirkungen der Strahlpartikel mit den Restgasatomen im Strahlrohr oder mit der Strahlrohrwand erzeugt werden, ist im H1-Detektor ein Flugzeitsystem ToF (**T**ime **o**f **F**light) [32, 33] installiert worden. Es setzt sich aus mehreren Szintillator-Anordnungen zusammen, die die Flugzeiten der am Ereignis beteiligten Teilchen mit hinreichend hoher Zeitauflösung messen können. Durch die geeignete Definition von Zeitfenstern ist es möglich, zwischen Untergrund- und Physikereignissen zu unterscheiden.

2.2.1 Das zentrale Spurkammersystem

Im zentralen Spurkammersystem bilden zwei große zylindrische, zur Strahlachse konzentrische Jetkammern die Grundlage der Spurrekonstruktion im Zentralbereich des H1-Detektors. Abbildung 2.2 zeigt eine radiale Ansicht des zentralen Spurkammersystems. Die innere Jetkammer CJC1 [7] (**C**entral **J**et **C**hamber) besitzt eine radiale Ausdehnung von $20,3 \text{ cm} \leq r \leq 45,1 \text{ cm}$, wohingegen die der äußeren Jetkammer CJC2 [8] $53,0 \text{ cm} \leq r \leq 84,4 \text{ cm}$ misst [22]. Beide Driftkammern besitzen insgesamt 2640 parallel zur z -Achse gespannte Signaldrähte, wobei 720 (CJC1) bzw. 1920 (CJC2) Signaldrähte auf 30 bzw. 60 azimuthale Zellen verteilt sind. Während die Zellen in azimuthaler Richtung durch zwei Ebenen von *Kathodendrähten* begrenzt werden, existieren in radialer Richtung sogenannte *Felldrähte*.

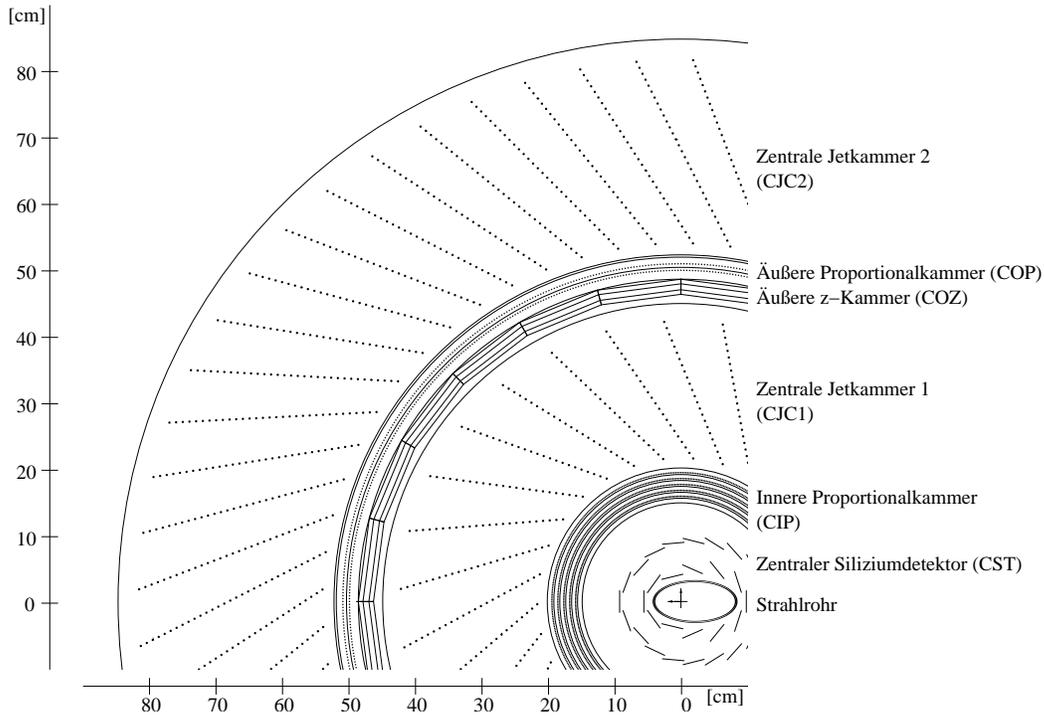


Abbildung 2.2: Querschnitt durch das zentrale Spurkammersystem des H1-Detektors für HERA-II. Die Aufgaben der konzentrisch um das Strahlrohr angeordneten Kammern sind im Text beschrieben. Der Übersichtlichkeit halber sind in den Driftkammern nur die Signaldrähte eingezeichnet.

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, befinden sich beide Spurkammern in einem homogenen Magnetfeld, dessen Feldlinien in Richtung der z -Achse orientiert sind. Die resultierende Lorentzkraft zwingt die beim ep -Streuprozess erzeugten geladenen Teilchen auf eine Kreisbahn in der x - y -Ebene. Aus deren Radius läßt sich der Transversalimpuls der Teilchen bestimmen. Die präzise Rekonstruktion der Kreisbahn basiert auf der Ionisation eines $\text{Ar} - \text{CO}_2 - \text{CH}_4$ Gasgemisches durch die geladenen Teilchen. An den Kathodendrähten ist eine Spannung angelegt, die proportional zu deren Abstand von der Ebene der Signaldrähte ist, wodurch ein möglichst homogenes elektrisches Feld erzeugt wird. Dies bewirkt eine nahezu konstante Driftgeschwindigkeit, mit der die bei der Ionisation entstehenden Ladungsträger den Signaldrähten zugeführt werden. Durch die Felddrähte werden die Inhomogenitäten des Driftfeldes am inneren und äußeren Ende der Zellen minimiert. Die Zellen sind um etwa 30° gegen die radiale Richtung geneigt. In Verbindung mit dem homogenen Magnetfeld verläuft die Driftrichtung der Ladungsträger daher nahezu senkrecht zu Teilchenspuren, die ihren Ursprung auf der Strahlachse haben und einen hohen Impuls besitzen. Dies erlaubt eine optimale Spurauflösung. Die Messung der von den Ladungsträgern benötigten Driftzeit zum Erreichen der Signaldrähte ermöglicht eine Ortsbestimmung in der r - φ -Ebene. Bei der sogenannten *Ladungsteilungsmethode* werden die Signale an beiden Enden der Signaldrähte gemessen, wodurch sich schließlich die z -Koordinate der deponierten Ladung bestimmen läßt.

Das Ortsauflösungsvermögen in der r - φ -Ebene und in z -Richtung betragen $\sigma_{r\varphi} = 170 \mu\text{m}$ bzw. $\sigma_z = 22 \text{ mm}$. Die Auflösung des Transversalimpulses beträgt etwa $\sigma_{p_t}/p_t^2 = 0,01 \text{ GeV}^{-1}$ [22]. Wei-

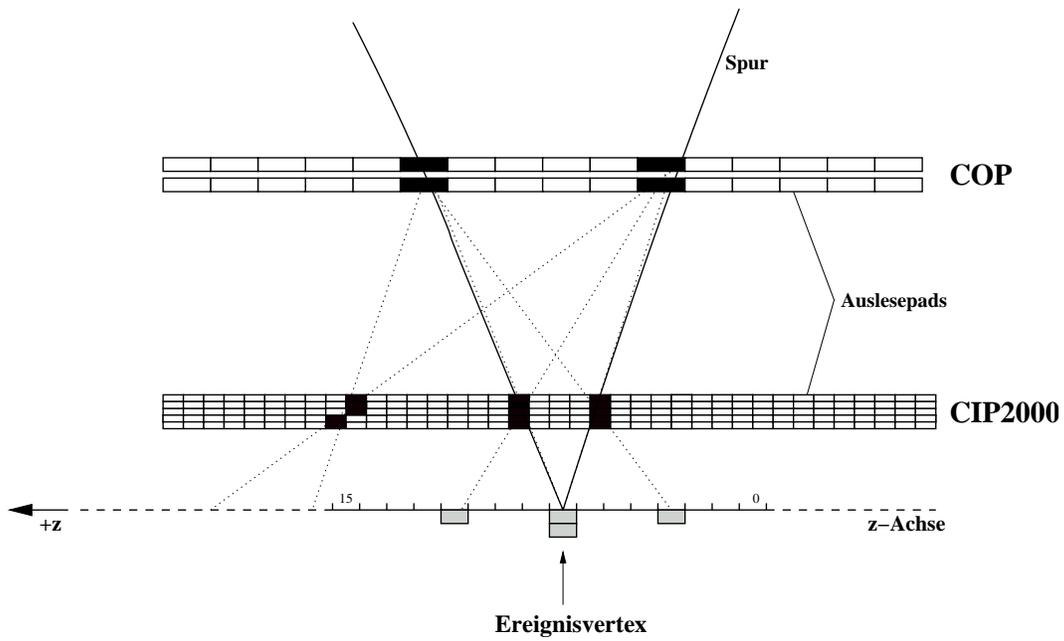


Abbildung 2.3: Das Prinzip des z -Vertex-Trigger. Zur Rekonstruktion von Spuren werden alle Trefferkoinzidenzen in den beiden Proportionalkammern paarweise durch Geraden verbunden. Der Vertex befindet sich dort, wo sich die meisten Geraden auf der z -Achse schneiden.

terhin erlauben die zentralen Spurkammern eine Messung des Energieverlustes pro Längeneinheit $\frac{dE}{dx}$, der zur Teilchenidentifikation verwendet werden kann.

Als weitere Komponenten sind zwei Proportionalkammern in das zentrale Spurkammersystem des H1-Detektors integriert. Die neue CIP2000-Kammer [5] [34] wurde für den Betrieb bei HERA-II entwickelt und ersetzt die alte innere Proportionalkammer CIP [35] sowie die innere zentrale z -Driftkammer CIZ (**C**entral **I**nnere **Z**-Chamber). Hierbei handelt es sich um eine zur Strahlachse konzentrische Vieldrahtproportionalkammer, die sich in radialer Richtung an die Innenseite der CJC1 anschließt und deren Radius sich über einen Bereich von $r_i = 15$ cm bis $r_a = 20$ cm erstreckt (siehe Abbildung 2.2). Sie besteht im Gegensatz zur alten CIP-Kammer nicht nur aus zwei sondern aus fünf übereinanderliegenden Lagen von zylindrischen Proportionalkammern, wodurch insbesondere die Akzeptanz für sehr flache Spuren im Vorwärts- und Rückwärtsbereich stark erhöht wird und Protonenstrahl-induzierte Untergrundereignisse effizienter unterdrückt werden können.

Die zweilagige äußere Proportionalkammer COP (**C**entral **O**uter **P**roportional Chamber) [6] wurde während des Upgrade-Programms nicht modifiziert. Sie befindet sich zwischen den beiden großen Jetkammern CJC1 und CJC2. Beide Proportionalkammern sind in azimuthaler Richtung 16-fach und in z -Richtung 18-fach (COP) bzw. 120-fach¹ (CIP2000) segmentiert. Im folgenden wird ein einzelnes Drahtlagensegment einer Kammerlage als *Auslesepads* bezeichnet.

Mit Hilfe dieser beiden Proportionalkammern ist man in der Lage, ein schnelles Signal (typische Übertragungszeit ≈ 10 ns [36]) nach Durchgang eines Teilchens zu erhalten und somit Informationen für das korrespondierende Triggersystem, den sogenannten z -Vertex-Trigger [37, 38], zur Verfügung zu stellen. Seine Aufgabe ist die Bestimmung der z -Koordinate des Ereignis-

¹Im Vergleich zur alten CIP-Kammer entspricht dies einer Verdoppelung der Segmentierung in z -Richtung

vertex. In Abbildung 2.3 wird das Prinzip des z -Vertex-Triggers skizziert. Fliegt ein Teilchen, das von einer Elektron-Proton-Wechselwirkung stammt, in den Akzeptanzbereich der beiden Proportionalkammern CIP2000 und COP, so kommt es zu einer Koinzidenz von bis zu sieben getroffenen Auslesepaden in den verschiedenen Kammerlagen. Letztere werden als Stützstellen für eine Spurrekonstruktion benutzt, wobei die Spur durch eine Gerade angenähert wird, die die Strahlachse schneidet. Die Schnittpunkte mit der z -Achse werden bestimmt und deren z -Koordinaten in einem 16 Bins umfassenden z -Vertex-Histogramm registriert. Identifiziert man in einem Bin des Histogramms ein eindeutiges Maximum von Einträgen, so wird dieses als die z -Position des Ereignisvertex interpretiert. Untergrundereignisse werden dadurch charakterisiert, dass entweder eine flache Verteilung von Einträgen ohne ausgeprägtes Maximum existiert oder ein Maximum außerhalb des nominellen Bereichs liegt.

Auf der Grundlage der CIP2000 ist auch ein neues z -Vertex-Trigger-System konzipiert worden, das ausschließlich Informationen von der CIP2000 verwertet. Der CIP2000-Trigger [39] zeichnet sich insbesondere durch eine Erweiterung des Akzeptanzbereichs zu negativen z -Werten und eine effizientere Identifizierung des proton-induzierten Untergrunds aus.

An der Außenseite der Jetkammer CJC1 ist neben der COP eine weitere Driftkammer installiert. Die Signaldrähte der äußeren z -Driftkammer COZ (**C**entral **O**uter **Z**-Chamber) sind im Gegensatz zu allen anderen zentralen Spurkammern senkrecht zur Strahlachse ausgerichtet, wodurch diese Detektorkomponente optimal zur Messung der z -Koordinate von Spuren geeignet ist. Die Auflösung in z -Richtung beträgt $\sigma_z = 350 \mu\text{m}$ und ist damit in etwa um zwei Größenordnungen besser als die der zentralen Driftkammern.

2.3 Das H1-Triggersystem

Die Aufgabe des H1-Triggersystems [40] ist die effektive Trennung physikalisch interessanter Ereignisse von Untergrundereignissen. Die Rate, mit der Untergrundsignale im H1-Detektor erzeugt werden, kann abhängig von der Strahlqualität um etwa den Faktor 1000 größer sein als diejenige, die der Elektron-Proton-Streuung im Wechselwirkungspunkt zugeordnet wird. Zu den Hauptuntergrundquellen bei HERA zählen der strahlinduzierte Untergrund, d. h. Wechselwirkungen des Protonstrahls mit den Restgasatomen im Strahlrohr, den Atomen der Strahlrohrwand, den Kollimatoren [41], sowie die Synchrotronstrahlung der Elektronen.

Mit etwa 1 ms ist der Datenauslesevorgang des gesamten H1-Detektors wesentlich länger als der Zeitraum von 96 ns, der zwischen zwei Strahlkreuzungen vergeht. Das Ziel besteht folglich darin, eine Auslese des gesamten Detektors nur für bestimmte, interessante Physikereignisse durchzuführen. Desweiteren beträgt die Bandbreite, mit der ein vollständiges Ereignis aufgezeichnet werden kann, 1,2 MB/s, was einer Speicherrate von etwa 10 Hz entspricht. Bei einer Bunchcrossingrate von 10,4 MHz muss demnach das H1-Triggersystem in der Lage sein, eine Ratenreduktion von sechs Größenordnungen bei minimaler Detektortotzeit zu leisten. Um diesen Anforderungen zu entsprechen, ist das H1-Triggersystem aus vier Stufen aufgebaut. Wie man Abbildung 2.4 entnehmen kann, erhöht sich die zur Entscheidungsfindung zur Verfügung stehende Zeit von Stufe zu Stufe, während die maximale Eingangsrate sukzessive reduziert wird. Folgt aus der Analyse auf einer Triggerstufe, dass die verwendeten Eingangsdaten auf ein physikalisch interessantes Ereignis hindeuten, so wird eine positive Triggerentscheidung getroffen, die im folgenden mit **Keep** bezeichnet wird. Dagegen beschreibt **Reject** das Verwerfen eines Ereignisses. In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften und Funktionen der einzelnen Stufen des H1-Triggersystems näher erläutert.

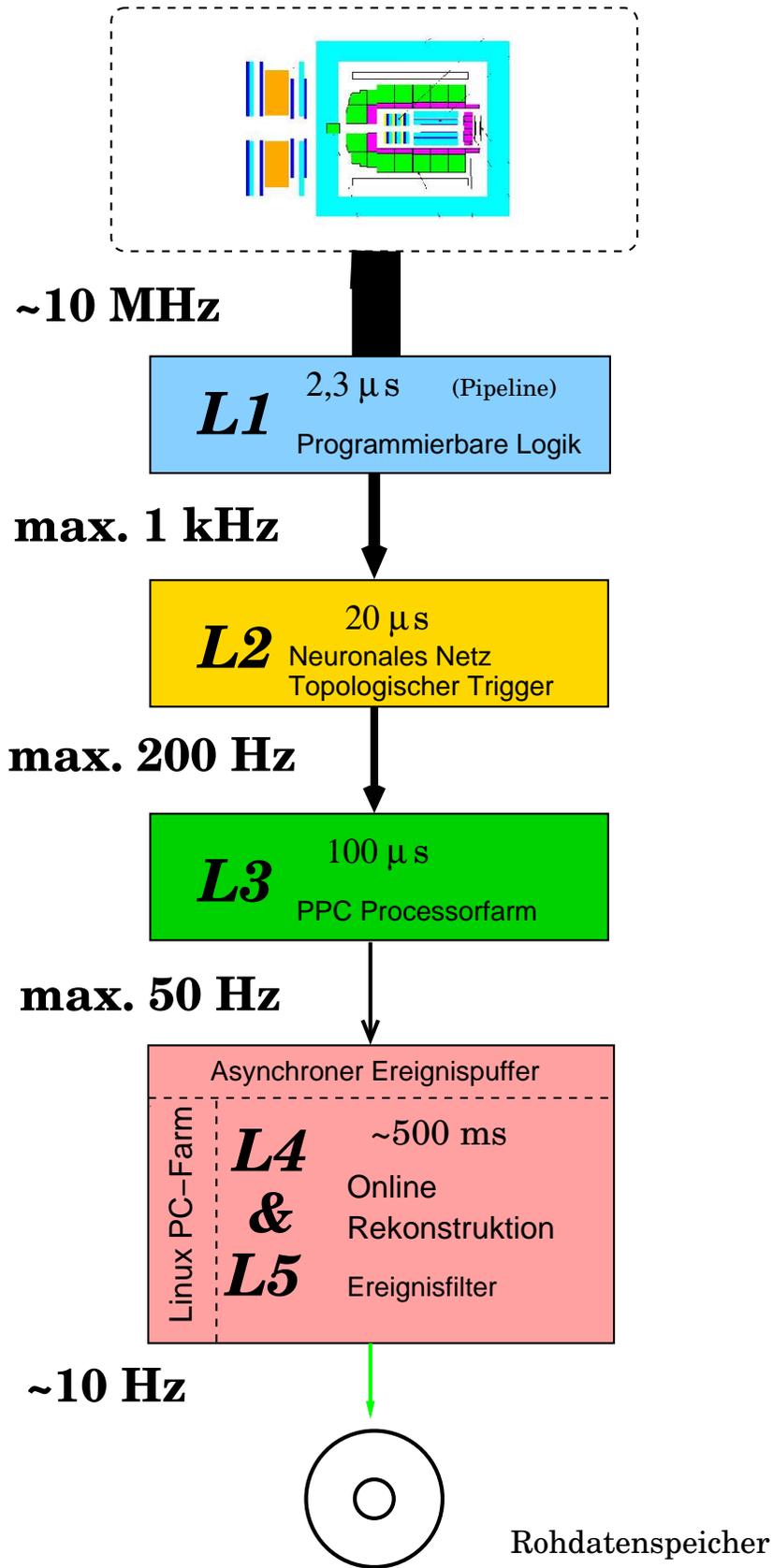


Abbildung 2.4: Die Stufen des H1-Triggersystems. Gezeigt sind typische Latenzzeiten und maximale Eingangsraten.

2.3.1 Die erste Triggerstufe L1

Aufgrund der starken Präsenz von Untergründereignissen müssen bereits auf der ersten Triggerstufe effiziente Strategien zur Untergrundunterdrückung benutzt werden. Die wirksamsten Kriterien dazu basieren auf den Daten des Flugzeitsystems. Desweiteren werden Informationen über den Ursprung von Spuren, das gestreute Elektron, die grobe Topologie des hadronischen Endzustands oder Myonsignale verwendet.

Die Zeit, die auf der ersten Triggerstufe (L1) für eine Entscheidungsfindung maximal zur Verfügung steht, ist mit $2,3\mu\text{s}$ deutlich größer als das Zeitintervall zwischen zwei Bunchcrossings. Um zu vermeiden, dass schon auf der ersten Stufe eine Totzeit erzeugt wird, werden die Daten jedes Subdetektors zunächst in einem Ringspeichersystem gehalten. Dessen Speichergröße ist dabei so dimensioniert, dass in der o. g. Latenzzeit keine Detektorinformationen verloren gehen. Auf der Grundlage der Triggersignale der Subdetektorsysteme werden sogenannte *Triggererelemente* erzeugt, die an die zentrale Triggerlogik CTL (**C**entral **T**ri**g**ger **L**ogic) gesendet werden. Dabei können die Signale z. B. durch das Ansprechen eines bestimmten Zählers oder durch das Überschreiten der Schwelle für eine physikalische Größe ausgelöst worden sein. Bis zu 256 dieser sogenannten *Triggererelemente* können von der CTL empfangen werden. Hier werden sie mittels logischer Operationen zu 128 sogenannten *Subtriggern* kombiniert. Für jedes Bunchcrossing überprüft die CTL, ob eine der 128 Subtriggerbedingungen erfüllt ist und dadurch das zu untersuchende Ereignis als physikalisch interessant akzeptiert werden kann. Ist dies der Fall, wird von der CTL ein L1-Keep-Signal erzeugt, wodurch das Ringspeichersystem angehalten wird und keine weiteren Detektorinformationen in die Ringspeicher geschrieben werden. Zu diesem Zeitpunkt beginnt die primäre Totzeit des H1-Detektors. Eine allgemeine Darstellung über den Einfluss der Totzeit auf die Datennahmeeffizienz findet man in [42]. Auf der ersten Triggerstufe kann eine Ratenreduktion von 10,4 MHz auf etwa 1 kHz erreicht werden.

2.3.2 Die zweite Triggerstufe L2

Falls auf der ersten Triggerstufe ein Ereignis akzeptiert wurde, werden die Daten von den Triggersystemen einzelner Subdetektoren über das PQZP-System (**P**arallel **Q**uickbus **Z**ero-Suppression **P**rocessor) [43] den Triggersystemen der zweiten Stufe (L2) zur Verfügung gestellt und dabei einer topologischen Analyse mit verfeinerter Granularität unterzogen.

Zur Entscheidungsfindung steht den L2-Triggersystemen, bestehend aus einem *Topologischen Trigger* (L2TT) [44] und einem *Neuronalen-Netz-Trigger* (L2NN) [45, 46], eine Latenzzeit von $20\mu\text{s}$ zur Verfügung. Im topologischen Trigger werden die Informationen der einzelnen Triggersubsysteme auf eine gemeinsame θ - φ -Ebene in Form einer 16×16 -Matrix abgebildet. Eine Entscheidung wird auf der Grundlage der Ereignistopologie getroffen. Beim Neuronalen-Netz-Trigger kommen trainierte neuronale Netze zum Einsatz. Von jedem dieser beiden Triggersysteme werden 16 Triggererelemente generiert, die zur CTL gesendet werden. Die insgesamt 32 Triggererelemente werden dazu benutzt, ausgewählte L1-Subtrigger zu validieren [47]. Wird für alle zu validierenden Subtrigger eine negative L2-Entscheidung berechnet, so wird von der CTL ein L2-Reject-Signal erzeugt. Parallel werden die Ringspeicher zur weiteren Datennahme vorbereitet. Im Falle einer positiven Triggerentscheidung wird von der CTL ein L2-Keep-Signal gesendet, wodurch die Auslese der Ringspeicher eingeleitet wird.

2.3.3 Die dritte Triggerstufe L3

Die dritte Stufe (L3) [48] des H1-Triggersystems ist Bestandteil des Fast-Track-Trigger (FTT), der im nächsten Kapitel beschrieben wird. Sie besteht aus einer Farm von modernen, programmierbaren Prozessoren. Auf jedem Prozessor wird eine Analyse durchgeführt, bei der jeweils auf der Grundlage der vom FTT rekonstruierten Spurparameter und der L1-Triggerdaten, die über das PQZP-System der dritten Stufe zur Verfügung gestellt werden, gezielt nach bestimmten Teilchenzerfällen oder Topologien gesucht wird. Das Ergebnis jeder Analyse wird in Form von Triggerelementen an die CTL gesendet, die in der Lage ist, bis zu 16 dieser L3-Triggersignale zu verarbeiten. Mit Hilfe dieser Signale können die schon auf der zweiten Stufe auf Gültigkeit überprüften L1-Subtrigger validiert werden. Falls die Berechnung der L3-Entscheidung für alle zu validierenden Subtrigger ein negatives Ergebnis liefert, erzeugt die CTL ein **L3-Reject**-Signal, das zum sofortigen Abbruch aller Auslesevorgänge führt. Desweiteren wird das Ringspeichersystem für die weitere Datenentnahme vorbereitet, wodurch die Totzeit beendet ist. Bei Erzeugung eines **L3-Keep**-Signals, wird die Datenauslese fortgeführt bis die Subdetektordaten komplett in Datenpuffern transferiert worden sind und damit für die nachfolgende Triggerstufe zur Verfügung stehen. Durch den anschließenden Neustart des Ringspeichersystems wird die Totzeit beendet. Das Ziel besteht darin, schnellstmöglichst ein **L3-Reject**-Signal zu erzeugen, um die Totzeit möglichst gering zu halten. Es ist geplant, auf der dritten Stufe spätestens nach $100\ \mu\text{s}$ zu einer Triggerentscheidung zu kommen. Bei der Ratenreduktion auf FTT-L3 muss berücksichtigt werden, dass die maximale Eingangsrate der vierten Triggerstufe auf 50 Hz limitiert ist und nicht überschritten werden darf.

2.3.4 Die Triggerstufe L4/5

Nach positiver L3-Triggerentscheidung empfängt eine aus konventionellen PCs bestehende Prozessorfarm (Filterfarm) die Subdetektordaten. Basierend auf diesen Daten werden die Ereignisse vollständig rekonstruiert. Die Zeit, die zur Rekonstruktion eines Ereignisses benötigt wird, beträgt etwa 500 ms. Anschließend werden die vollständig rekonstruierten Daten nach Physikkanälen geordneten Klassen zugeordnet. Ereignisse, die keiner Klasse zugeordnet werden können, werden entweder verworfen oder in gewissem Umfang zu Kontrollzwecken gespeichert. Die rekonstruierten Daten nicht verworfener Ereignisse werden mit einer Rate von 10 Hz auf Band gespeichert.

In der HERA-I-Datennahmepériode wurde zwischen den beiden Stufen L4 und L5 unterschieden. Auf L4 fand zunächst mit Hilfe eines modifizierten Programms eine vorläufige Rekonstruktion statt [49]. Die vollständige Rekonstruktion wurde auf L5 zeitverzögert durch den Einsatz eines Multiprozessorrechners durchgeführt. Im Zuge des Upgrade-Programms wurden beide Systeme zu der nun als L4/5 bezeichneten Triggerstufe kombiniert [50].

2.4 Ereignisraten und Triggerstrategie nach dem Upgrade bei HERA

Die Raten, mit denen im H1-Detektor bestimmte Arten von Ereignissen beobachtet werden, variieren zum Teil sehr deutlich. Tabelle 2.2 zeigt die bei maximaler Luminosität erwartete Rate ausgewählter Physikereignisse nach dem Upgrade-Programm [51]. Wie nach Gleichung 1.5 erwartet, erkennt man, dass Ereignisse mit hohen Impulsüberträgen Q^2 deutlich seltener vorkommen als

Prozeß	Rate
Photoproduktion ($Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$)	$\approx 1000 \text{ Hz}$
DIS ($1 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 10 \text{ GeV}^2$)	$\approx 40 \text{ Hz}$
DIS ($Q^2 > 10 \text{ GeV}^2$)	$\approx 4 \text{ Hz}$
$D^* \rightarrow K\pi\pi$	mehrere 1000 pro Jahr
DIS bei höchsten Q^2	einige pro Jahr

Tabelle 2.2: Triggerraten für einige Beispielprozesse wie man sie bei HERA-II erwartet. Die genauen Raten hängen stark von den Annahmen über den sichtbaren Wirkungsquerschnitt ab [51, 52].

solche mit niedrigen. Damit Ereignisse mit besonders kleinen Wirkungsquerschnitten registriert werden können, muß der HERA-Speicherring nach Gleichung 2.1 eine ausreichend hohe Luminosität zur Verfügung stellen, um die Ereignisrate derart zu erhöhen, dass es möglich ist, die gewünschten Prozesse zu beobachten.

Wie schon am Anfang dieses Kapitels erläutert wurde, erwartet man nach dem Upgrade-Programm bei HERA eine Steigerung der Luminosität um etwa einen Faktor fünf. Man geht davon aus, dass Ereignisse mit großem Q^2 durch den Einsatz des bisher beschriebenen H1-Triggersystems effizient registriert und mit akzeptabler Rate aufgezeichnet werden können. Aufgrund der hohen Rate wird dies für Ereignisse mit kleinen Q^2 nicht ohne weiteres möglich sein. Hinzu kommt, dass sich nach dem Upgrade neben der Rate der physikalisch interessanten Ereignisse auch die der Untergrundereignisse deutlich erhöhen wird (siehe Tabelle 2.2). Für Reaktionen bei kleinen Werten von Q^2 wäre es daher mit dem bisher beschriebenen Triggersystem nicht möglich, von der Luminositätserhöhung zu profitieren. Dazu zählen insbesondere die in Kapitel 1.4 erwähnten Ereignisse mit exklusiven Endzustände wie z. B. die J/Ψ -Produktion. Der Wirkungsquerschnitt für solche Ereignisse umfasst nur einen Bruchteil des Gesamtwirkungsquerschnitts. Sollen diese Ereignisse in möglichst hoher Zahl aufgezeichnet werden, muss versucht werden, sie im Bereich kleiner Werte für Q^2 zu selektieren, bei denen auch der Gesamtwirkungsquerschnitt gross ist.

Bei diesen kleinen Werten von Q^2 sind die Triggerraten extrem hoch (siehe Tabelle 2.2). Um für solche Prozesse eine hohe Selektionseffizienz bei einer gleichzeitig geringen Rate von akzeptierten Ereignissen zu erreichen, muss auf den ersten Triggerstufen (L1-L3) der Endzustand der Ereignisse frühzeitig analysiert werden. Für eine solche Analyse spurbasierter Topologien wurde das H1-Triggersystem um den dreistufigen *Fast Track Trigger* (FTT) erweitert [51, 52]. Dieser ist in der Lage, Spuren auf der Basis der Daten der zentralen Jetkammern CJC1 und CJC2 zu rekonstruieren. Auf der dritten Stufe des FTTs kommen Triggeralgorithmen zum Einsatz, die eine detaillierte Analyse der geladenen Teilchen des Endzustands ermöglichen, z. B. durch Berechnung der invarianten Masse. Hierbei besteht die Vorgabe für jeden verwendeten Algorithmus darin, dass dessen Laufzeiten die für die dritte Triggerstufe vorgegebene Latenzzeit von $100 \mu\text{s}$ unterschreiten muss. Aus diesem Grund wäre es hilfreich, wenn ein Simulationsprogramm zur Durchführung von detaillierten Laufzeittests existiere. Ein solches wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

Kapitel 3

Der Fast Track Trigger

Der Fast Track Trigger (FTT) ist in die ersten drei Stufen des H1-Triggersystems integriert [51, 52]. Er ermöglicht den Nachweis von Teilchenspuren, die einen minimalen Transversalimpuls von $p_t > 100 \text{ MeV}$ besitzen. Auf diese Weise lässt sich z. B. das langsame Pion π_s^+ des Zerfallskanals $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$ von D^* -Mesonen nachweisen. Der FTT erlaubt die Rekonstruktion von bis zu 48 Spuren. Damit werden etwa 98 % der physikalisch interessanten Ereignisse erfasst [51].

Als Eingangsdaten empfängt der Fast Track Trigger Informationen der beiden zentralen Spurkammern CJC1 und CJC2. Dabei werden die analogen Signale von insgesamt vier sogenannten *Triggerlagen* ausgewertet, die jeweils aus drei radialen Drahtlagen bestehen. Wie in Abbildung 3.1 gezeigt, befinden sich drei der vier Triggerlagen in der inneren Jetkammer CJC1 und eine in der äußeren Kammer CJC2. Eine sogenannte *Triggergruppe* wird jeweils aus den drei Signaldrähten einer Triggerlage innerhalb einer Spurkammerzelle und je einem weiteren Draht aus den beiden Nachbarzellen gebildet, so dass insgesamt fünf Signaldrähte bei einer Triggergruppe zum Einsatz kommen.

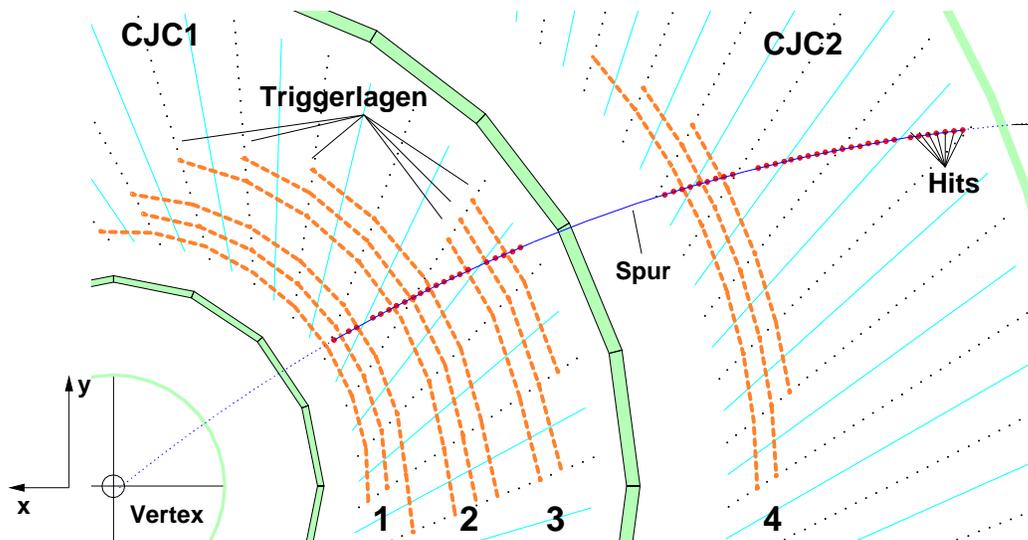


Abbildung 3.1: Ausschnitt der r - φ -Ansicht des zentralen Spurkammersystems mit Drahtlagen, die vom FTT benutzt werden. Es gibt vier Triggerlagen aus je drei Drahtlagen. Drei Triggerlagen befinden sich in der CJC1 und eine in der CJC2 [54].

Im nächsten Abschnitt wird das Gesamtkonzept des dreistufigen Fast Track Triggers erläutert, wobei deren Charakteristiken und Hardwarerealisierungen im Zentrum der Beschreibung stehen. Dieses Konzept wurde anhand von Simulationsstudien, die auf dem Softwarepaket FTTEMU [54] basieren, entwickelt. FTTEMU erlaubt die Simulation der wesentlichen Funktionen der ersten beiden Stufen des Fast Track Triggers und liefert die vom FTT rekonstruierten dreidimensionalen Spurparameter. Letztere dienen den auf der dritten Stufe zum Einsatz kommenden Triggeralgorithmen als Grundlage, um innerhalb von $100\ \mu\text{s}$ relevante Physikereignisse zu selektieren. Entscheidend dabei ist folglich, dass die auf der dritten Stufe eingesetzten Selektionsalgorithmen in ihrem Laufzeitverhalten auf die genannte Zeitvorgabe abgestimmt sind bzw. bei Bedarf optimiert werden. Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die dritte Triggerstufe des FTTs relevant.

3.1 Das Konzept des Fast-Track-Triggers

Die Hauptaufgabe des Fast Track Triggers besteht darin, bestmögliche Spurinformatoren für die ersten drei Triggerstufen (L1, L2 und L3) des H1-Triggersystems zu rekonstruieren. In Abbildung 3.2 ist das Konzept des Fast Track Triggers dargestellt. Auf der ersten Stufe (FTT-L1) werden die Signaldrahttreffer (Hits) auf entsprechenden Drahtlagen der beiden zentralen Driftkammern CJC1 und CJC2 gesucht. Dabei werden die gefundenen Driftzeitspektren mittels schneller Mustererkennung mit denen verglichen, die gültigen Spuren zugeordnet werden können. Im nächsten Schritt werden daraus *Spursegmente* gebildet, die schließlich durch den Prozess des *Linkings* grob zu Spurkandidaten verknüpft werden. Basierend auf Spurmultiplizitäten und Transversalimpulsen werden auf der ersten Stufe innerhalb einer Latenzzeit von $2,3\ \mu\text{s}$ Triggerelemente für L1 generiert. Zur Rekonstruktion von Spuren, deren Auflösung nur wenig schlechter ist als die der vollständigen H1-Rekonstruktion, steht der zweiten Stufe (FTT-L2) eine Latenzzeit von $20\ \mu\text{s}$ zur Verfügung. Dazu werden die gefundenen Spursegmente durch den Linking-Prozess bei höherer Auflösung erneut zusammengefügt. Durch den Einsatz von Fitalgorithmen [54] werden die dreidimensionalen Spurparameter optimiert. Anschließend wird auf der Grundlage von dreidimensionalen Spurinformatoren bezüglich der Spurmultiplizität und Impulssummen Triggerelemente für L2 generiert. Im Falle einer positiven Entscheidung werden die Spurparameter an die dritte Stufe (FTT-L3) übertragen und bilden dort die Basis zur Suche von Teilchenzerfällen, wofür maximal $100\ \mu\text{s}$ zur Verfügung stehen.

3.2 Die Triggerstufen des FTTs

In den folgenden Abschnitten werden die Triggerstufen des FTTs genauer beschrieben. Ebenso wird kurz auf die einzelnen Komponenten zur Hardwarerealisierung eingegangen, die in Abbildung 3.3 im Überblick dargestellt ist.

3.2.1 Die erste Stufe FTT-L1

Beim Fast Track Trigger werden insgesamt 450 Drähte eingesetzt, die jeweils an beiden Anodendrahtenden ausgelesen werden. Die analogen Spurkammersignale werden an 30 sogenannte FEMs (**F**ront **E**nd **M**odule) gesendet. An deren Eingangsseite befinden sich jeweils 15 FADCs (**F**lash **A**nalog to **D**igital **C**onverter), die die analogen Signale der Drähte von fünf benachbarten Spur-

FTT L1: 2,3 μ s		FTT L2: 20 μ s		FTT L3: ~100 μ s	
Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Auffinden von Hits (Qt-Analyse) • Spursegmentsuche • Grobes Zusammenfügen von Segmenten 	Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfügen von Spursegmenten • Dreidimensionale Spurparameter • Impulssummen 	Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Ereignisanalyse • Auffinden von Resonanzen • Topologien
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Programmierbare Bausteine (FPGA) • Schnelle Mustererkennung 	Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Programmierbare Bausteine (FPGA) • Digitale Signalprozessoren • Online Helixfit 	Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessorfarm • Echtzeitbetriebssystem

Abbildung 3.2: Hauptaufgaben und Technologien des dreistufigen FTT-Systems [54].

kammerzellen einer Triggerlage mit einer Frequenz von 80 MHz digitalisieren. Jedes FEM ist mit fünf sogenannten FPGAs (**F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray) bestückt (ein FPGA pro Spurkammerzelle).

Zur Rekonstruktion der Hits auf den Signaldrähten wird auf jedem FPGA ein sogenannter *Qt-Algorithmus* [53] durchgeführt. Hierbei werden nach der Auslese die jeweiligen digitalisierten Signale dazu benutzt, den Zeitpunkt, bei dem ein Hit gemessen wurde, mit einer Genauigkeit von etwa 0,5 ns zu bestimmen. Zusätzlich läßt sich durch Ladungsteilung die z -Koordinate mit einer Auflösung von etwa 6 cm bestimmen. Dabei wird eine Methode angewendet, bei der das mit einem gefundenen Treffer verknüpfte Signal über einen definierten Zeitraum aufintegriert wird. Aus den unterschiedlichen Amplituden an den beiden Drahtenden deponierten Ladungen kann man dann z bestimmen [53].

Nachdem die Hit-Rekonstruktion abgeschlossen ist, beginnt die Suche nach den Spursegmenten. Zu diesem Zweck sind in die FPGAs sogenannte *Schieberegister* implementiert. In diese werden die gefundenen Hits unter Benutzung der Zeitinformation des *Qt*-Algorithmus geschrieben. Das Prinzip der Schieberegister zeigt Abbildung 3.4. Zum Zeitpunkt des Füllens der Register ist nicht eindeutig bekannt, auf welcher Seite die Spur den Signaldraht passiert hat. Deshalb werden zur Berücksichtigung dieser Links/-Rechts-Ambiguität jedem Signaldraht zwei Register zugeordnet. Für jeden identifizierten Hit kommt es zu einem Eintrag an jeweils einem Ende der beiden Schieberegister, wobei letztere mit einer Taktfrequenz von 80 MHz betrieben werden, so dass die Registereinträge alle 12,5 ns um eine Einheit verschoben werden. Auf diese Weise sind die Einträge für nahe am Draht verlaufende Spuren weiter vorgerückt als für entferntere Spuren. Das mit den Einträgen verknüpfte Muster liefert somit ein Abbild der Driftzeiten in der Spurkammer. Parallel zum 80 MHz-Schieberegister existiert auf der ersten Stufe ein weiteres Schieberegister. Dies wird durch disjunktive Verknüpfung von vier benachbarten Einträgen aus dem 80 MHz-Register erzeugt. Auf diese Weise werden die Driftzeiten der bei der Ionisation erzeugten Ladungsträger nach oben beschriebem Verfahren mit einer effektiven Frequenz von 20 MHz diskretisiert. Das 20 MHz-Schieberegister wurde eingeführt, um das Datenvolumen für die erste Triggerstufe des FTTs zu reduzieren. Auf diese Weise steht der ersten Triggerstufe eine

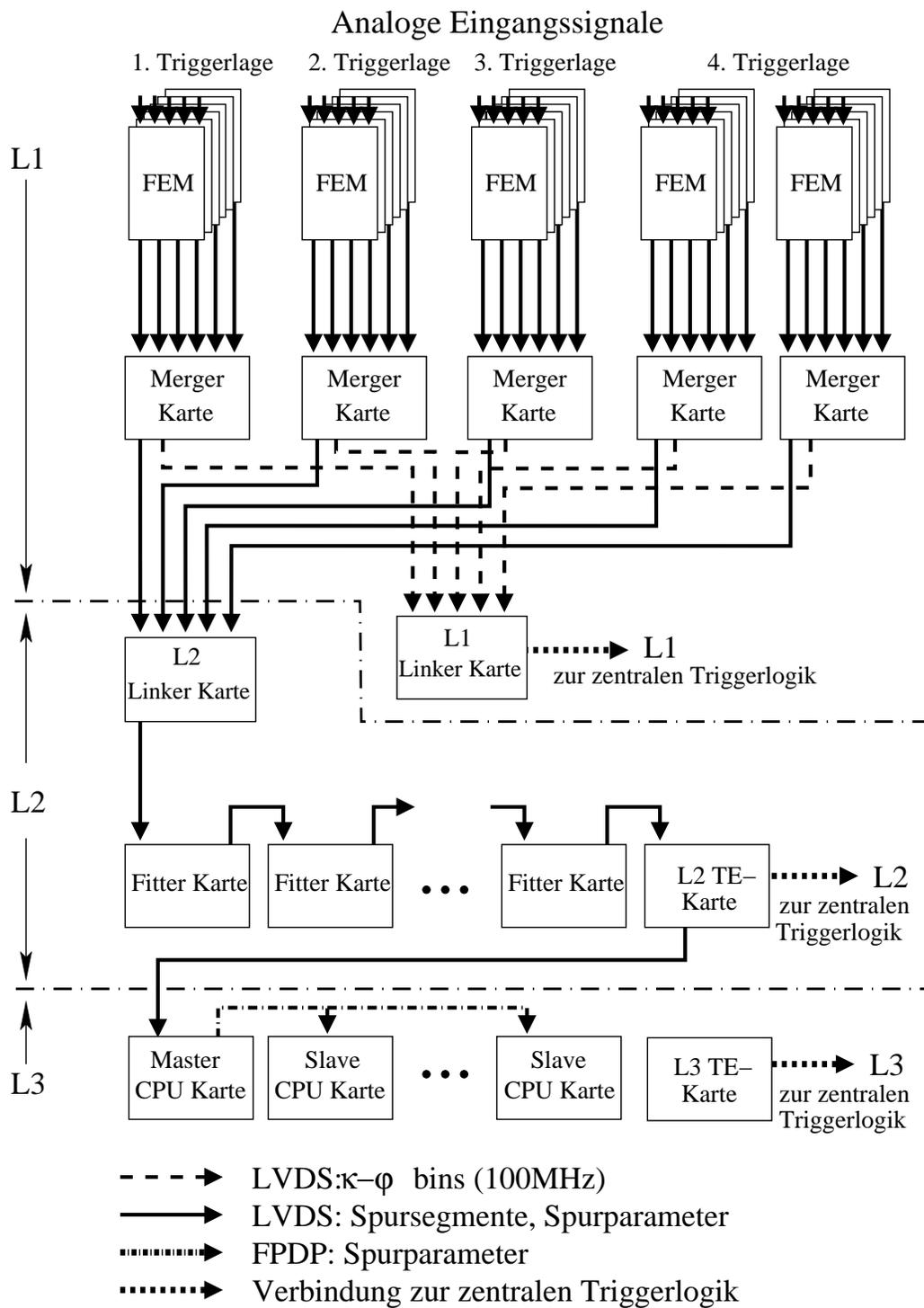


Abbildung 3.3: Übersicht über die Komponenten des Fast Track Triggers. Die Hauptrichtung des Datenflusses verläuft von oben nach unten.

Ortsauflösung zur Verfügung, die gegenüber der Auflösung der 80 MHz-Schieberegister um den Faktor vier herabgesetzt ist. Die volle Auflösung der 80 MHz-Schieberegister wird erst auf der zweiten Triggerstufe genutzt.

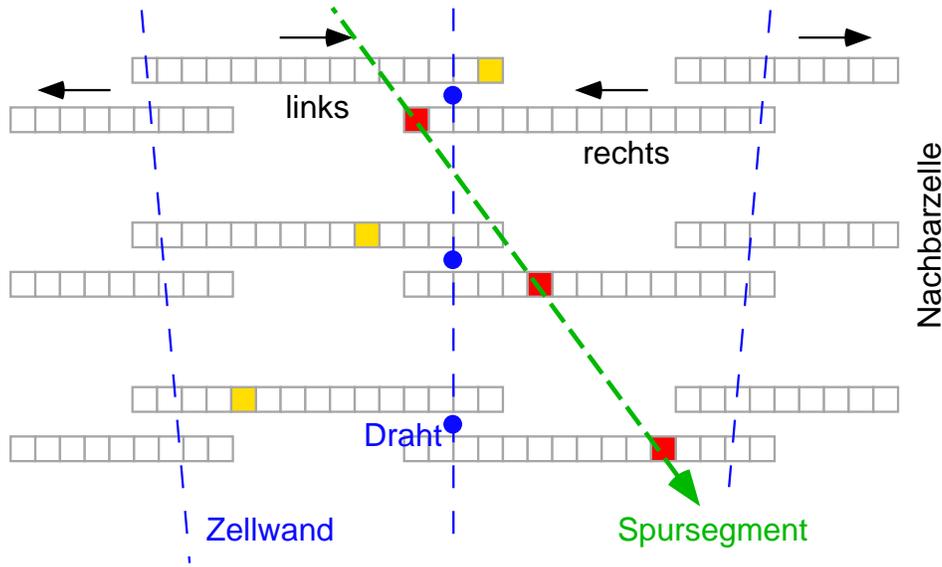


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Schieberegister, die für eine Triggergruppe innerhalb einer Zelle betrachtet werden. Die beiden äußeren gestrichelten Linien markieren die Zellgrenzen. Die Punkte in der Mitte der Abbildung kennzeichnen die Position der Signaldrähte. Jeder Signaldrahttreffer wird in zwei Schieberegister gefüllt, da nicht bekannt ist, auf welcher Seite die Spur die Signaldrähte passiert hat. Die dadurch entstehenden Ambiguitäten werden durch das Linking aufgelöst. Um auch Spuren rekonstruieren zu können, die die Zellgrenze überqueren, wird die Suche nach Spursegmenten auf ausgewählte Drähte benachbarter Zellen ausgedehnt. Die Hits werden an den äußeren Rändern der Zelle in die Register eingefüllt und bewegen sich in Driftrichtung (siehe Pfeile). Der gestrichelte Pfeil markiert ein mögliches Spursegment.

Innerhalb der Schieberegister einer Triggergruppe entstehen charakteristische Eintragungsmuster. Die Muster, die von gültigen Spuren erzeugt werden, können im Voraus berechnet werden. Dabei wird eine Spur als gültig eingestuft, wenn sie auf den nominellen Ereignisvertex zeigt und die Spurkrümmung $\kappa \sim \frac{1}{p_t}$ einen Wert unterschreitet, der einem Transversalimpuls von 100 MeV entspricht. Bei Kenntnis der geometrischen Position der Drähte, der Driftrichtung der bei der Ionisation erzeugten Ladungsträger, deren Driftgeschwindigkeit sowie des Zeitnullpunkts des Ereignisses lassen sich aus den Schieberegistereinträgen drei Punkte in der r - φ -Ebene rekonstruieren. Für den Fall, dass man durch diese drei Punkte in der r - φ -Ebene und den nominellen Ereignisvertex einen Kreis fitten kann, wird das betreffende Muster als gültig definiert [54]. Diese als *Masken* bezeichneten gültigen Muster werden im Voraus berechnet und gespeichert, so dass entstehende gültige Muster durch Vergleich gefunden werden können. Zu jedem gültigen Muster existiert ein Spursegment mit seinen zugehörigen Spurparametern κ (Krümmung) und φ (Azimutalwinkel).

Da für jedes einzelne Bunchcrossing eine möglichst schnelle Suche nach Spursegmenten durchgeführt werden soll, sind in den FPGAs sogenannte CAMs (**C**ontent **A**dressable **M**emory) [55] implementiert. Diese ermöglichen, dass die Bitmuster der Schieberegister parallel mit einer ganzen Reihe von Masken verglichen werden können und liefern im Falle der Übereinstimmung als Ergebnis ein (κ, φ) -Wertepaar, das zu einem gültigen Spursegment korrespondiert.

Nach abgeschlossener Spursegmentsuche werden die Datenströme der FEMs durch den Einsatz

von sogenannten *Merger-Karten* gebündelt und zur *L1-Linker-Karte* gesendet. Für die Datenübertragung wird eine sogenannte LVDS-Verbindung (**L**ow **V**oltage **D**ifferential **S**ignaling) verwendet, mit deren Hilfe Datentransferraten von bis zu 600 MByte erreicht werden.

Auf der L1-Linker-Karte werden die Spursegmente gesammelt und zur Berechnung von FTT-Triggerelementen benutzt. Dazu werden die zu verschiedenen Triggerlagen zugehörigen Spursegmente mit grober Granularität zu Spuren zusammengefügt. Dieser *Linking*-Prozess basiert im wesentlichen auf dem gleichen Prinzip und der gleichen Hardware wie der Linking-Prozess auf der zweiten Stufe. Letzteres wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Wird ein Ereignis auf der ersten Stufe akzeptiert, so wird von der zentralen Triggerlogik ein **L1-Keep**-Signal gesendet. In diesem Fall werden die zu allen gültigen Mustern aus den 20 MHz-Schieberegistern entsprechenden hochauflösenden Muster aus den 80 MHz-Schieberegistern auf Gültigkeit geprüft. Falls diese gültig sind, werden die zugehörigen κ - und φ -Werte herausgesucht. Über die L1-Merger-Karten werden diese zusammen mit den drei z -Werten für die betreffende Triggergruppe an die zweite Stufe übertragen.

3.2.2 Die zweite Stufe FTT-L2

Die Hauptaufgabe der zweiten Stufe des Fast Track Triggers ist die Berechnung der dreidimensionalen Spurparameter auf der Grundlage der auf der ersten Stufe des FTTs bestimmten κ - φ - und z -Werte. Dazu werden zunächst die rekonstruierten Spursegmente in der κ - φ -Ebene zu Spuren zusammengefügt (Linking). Dabei besteht die Grundidee des Linkings darin, die gefundenen Spursegmente in ein κ - φ -Histogramm zu füllen und in diesem nach einer Anhäufung von nahe beieinander liegenden Spursegmenten zu suchen, wobei erwartet wird, dass Segmente, die zur selben Spur gehören, die gleichen κ - und φ -Werte besitzen. Im nächsten Schritt werden die gelinkten Spursegmente einem Fit unterzogen, wobei die z -Werte miteinbezogen werden. Zur Durchführung beider Arbeitsschritte wird eine äußerst flexible Prozessorkarte, das sogenannte MPB (**M**ulti **P**urpose **B**oard) [56, 57], eingesetzt. Diese ist mit drei FPGAs und bis zu vier DSPs (**D**igital **S**ignal **P**rocessor) bestückt. Karten dieses Typs sind ebenfalls die Merger-Karten und die L1-Linkerkarte. Um die jeweils benötigten Schnittstellen zu anderen Karten zur Verfügung zu stellen, können auf einem MPB bis zu vier sogenannte Piggy-Back-Karten [58] aufgesteckt werden. Eine solche Karte ist die LVDS-Piggy-Back-Karte, mit der alle LVDS-Verbindungen in der L2-Kette ermöglicht werden. Eine weitere dient als Empfänger von PQZP-Signalen der verschiedenen Triggersubsysteme.

Für den Linking-Prozess werden die auf der ersten Stufe gefundenen Spursegmente von der L2-Linker-Karte empfangen und nach Triggerlagen geordnet, in vier zweidimensionale κ - φ -Histogramme gefüllt. Jedes Histogramm besitzt 40 Bins in κ und 640 Bins in φ und wird durch 25 CAMs realisiert, die in den FPGAs der Prozessorkarte implementiert sind. Mit Hilfe der CAMs ist es möglich, in einem Bearbeitungsschritt nach Koinzidenzen von Spursegmenten in den vier Triggerlagen zu suchen. Da die Spursegmente aus verschiedenen Triggerlagen wegen der begrenzten Auflösung nicht unbedingt ins gleiche Histogrammbin fallen müssen, wird mit Hilfe einer sogenannten *Sliding-Window-Technik* die Suche auf benachbarte Histogrammbins ausgeweitet [54]. Hierzu wird ein Suchfenster der Größe 3×3 Bins verwendet, das über den Bereich bewegt wird, in dem die Koinzidenz auftritt. Beinhaltet das gefundene Maximum mindestens zwei Spursegmente aus unterschiedlichen Triggerlagen, deren κ - und φ -Werte gleich sind, so wird davon ausgegangen, dass eine gültige Spur vorliegt. Abbildung 3.5 zeigt das Prinzip des Linkings anhand eines Beispielergebnisses.

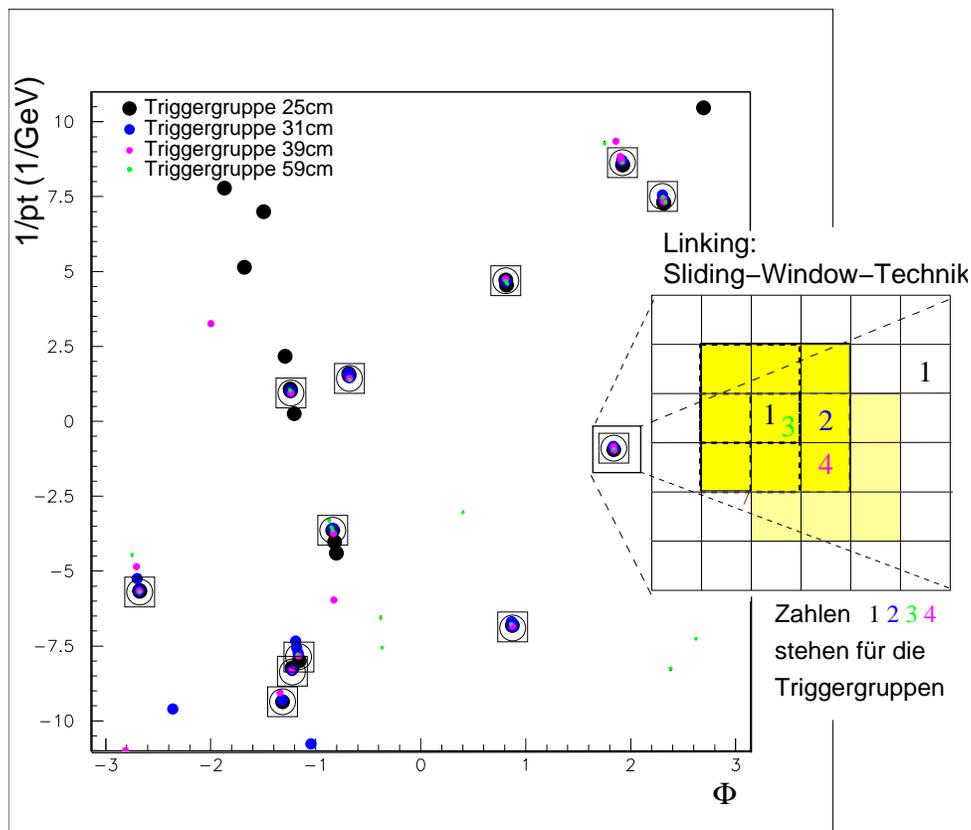


Abbildung 3.5: Prinzip des Spurlinkings (Zusammenfügen) von Spursegmenten. Die in das Histogramm gefüllten Spursegmente der verschiedenen Triggerlagen sind durch Punkte verschiedener Größe repräsentiert. Offene Kreise markieren vom FTT während des Linkings gefundene Spuren. Die offenen Quadrate zeigen das Ergebnis der vollständigen Spurrekonstruktion. Der vergrößert dargestellte Ausschnitt veranschaulicht die Sliding Window Technik, die zur Suche nach der Position maximaler Überlagerung von Spursegmenten in den vier Triggerlagen benutzt wird [54].

Die κ -, φ und z -Werte der zusammengefügt Spursegmente werden von der L2-Linker-Karte an eine Kette von sechs Fitter-Karten übergeben, die jeweils über vier DSPs verfügen. Auf diesen ist ein nichtiterativer Fitalgorithmus zur Durchführung von dreidimensionalen Spurfits [54], von denen auf den insgesamt 24 DSPs bis zu 48 durchgeführt werden, implementiert. Die Bestimmung des Spurfits erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Spurparameter κ und φ mit Hilfe eines nichtiterativen Kreisfits [59] in der r - φ -Ebene bestimmt. Im zweiten Schritt wird der Polarwinkel θ der Spur durch die Berechnung einer Ausgleichsgeraden in der r - z -Ebene ermittelt [54], wobei als zusätzliche Stützstelle die z -Position des Ereignisvertex berücksichtigt wird. Diese wird vom z -Vertextriggers [60] an FTT-L2 gesendet.

Nach abgeschlossener Berechnung der Spurparameter kommt am Ende der Kette von L2-Fitter-Karten mit der L2-Trigger-Karte (L2-TE) ein weiteres MPB zum Einsatz. Hier werden die Daten aller gefitteten Spuren gesammelt, wobei Triggerelemente für L2 auf der Grundlage von spurba-sierten Variablen erzeugt werden. Sendet die zentrale Triggerlogik ein L2-Keep-Signal, werden die dreidimensionalen Spurinformatio-nen an die dritte Stufe übermittelt.

3.2.3 Die dritte Stufe FTT-L3

Die dritte Stufe besteht aus einer Multi-Prozessor-Farm, die mit bis zu 16 CPU-Karten bestückt werden kann. Auf jeder dieser Karten ist ein Triggeralgorithmus implementiert, der innerhalb der Latenzzeit von etwa 100 μ s nach bestimmten Teilchenzerfällen oder ausgewählten Ereignistopologien sucht. Dazu dienen sowohl die dreidimensionalen Spurparameter aller auf der zweiten Stufe des FTTs gefundenen Spuren als auch die Informationen anderer Triggersubsysteme der ersten Stufe. Letztere werden durch den Einsatz der PQZP-Piggy-Back-Karte auf der zweiten Stufe bereitgestellt, da diese in der Lage ist, PQZP-Informationen zu empfangen. Neben dem z -Vertextrigger senden beispielsweise auch die Triggersubsysteme des SpaCals, des BSTs und des Myonsystems ihre Triggerinformationen im PQZP-Format zu FTT-L2 [76].

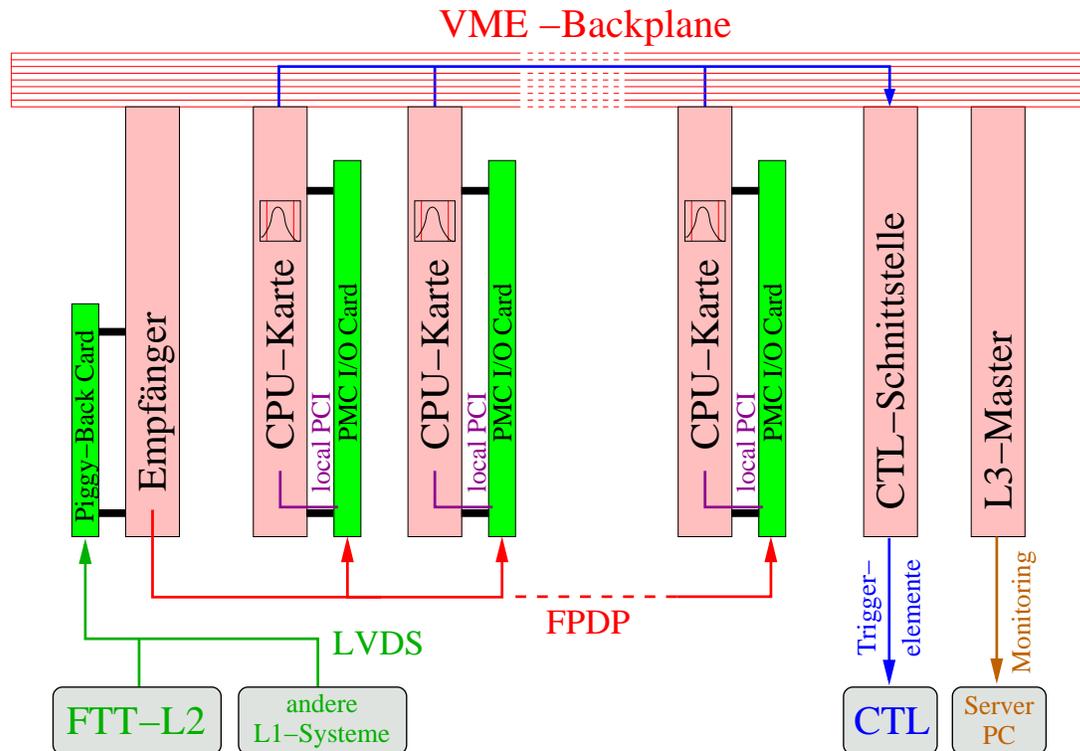


Abbildung 3.6: Die dritte Triggerstufe des FTTs. Neben den Hardwarekomponenten sind die Datentransferstrecken eingezeichnet, auf denen die Informationen der zweiten Stufe des FTTs (FTT-L2) und der ersten Stufe anderer Triggersubsysteme (andere L1-Systeme) die CPU-Karten erreichen. Ebenfalls dargestellt ist der Übertragungsweg der Triggerelemente von den CPU-Karten an die zentrale Triggerlogik (CTL) [48].

Mittels einer LVDS-Verbindung wird der Datenstrom an die dritte Triggerstufe übertragen. Dabei werden die Daten über eine LVDS-Piggy-Back-Karte zur L3-Receiverkarte gesendet. Diese ist mit einem FPGA bestückt, über den die Daten mittels einer FPDP (**F**ront **P**anel **D**ata **P**ort)-Verbindung [61] parallel an alle CPU-Karten verteilt werden. Als spezielle CPU-Karte kommuniziert die L3-Master-Karte über eine durchgehende Rückwandplatine, die sogenannte VME-Backplane (**V**ersa **M**odule **E**urocard) [62], mit den übrigen CPU-Karten (Slaves) und sendet Daten an einen Computer. Dessen Funktionen sind die Überwachung und Steuerung des

Prozessor	Power-PC 750 32-bit RISC ^a (Typ G3) mit 450 MHz Taktfrequenz
RAM	32 MBytes an 100 MHz Bus
Echzeitbetriebssystem	Vx-Works (Windriver)
VME-Anbindung	Type Tundra Universe
Netzwerkanbindung	10/100 Mbits/s Ethernet
PMC-Anschluß	2 Steckplätze
weitere Anschlüsse	serieller Port
getaktete Zählwerke	1 16-bit-, 4 32-bit-Echtzeituhrzähler, Laufzeitzähler mit Interruptfunktion
Stromverbrauch	typisch 3,93 A, maximal 4,31 A bei 5 V

Tabelle 3.1: *Kenndaten der MVME2400-Karte von Motorola. [65]*

^a**R**educed **I**nstruction **S**et **C**omputer

L3-Gesamtsystems.

Auf jeder CPU-Karte ist eine sogenannte PMC-Karte (**P**eripheral **C**omponent **I**nterconnect-**M**ezzanine **C**ard) [63, 64] aufgesteckt, über die die Daten direkt in den lokalen Speicher der CPU-Karten geschrieben werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Triggerinformationen schon bereits nach weniger als 10 μ s, nachdem ein L2-Keep-Signal von der zentralen Triggerlogik gesendet wurde, den CPU-Karten für eine topologische Untersuchung zur Verfügung stehen [48]. Jede CPU-Karte ist so konfiguriert, dass sie die Identifikation von Teilchen eines Physikkanals durchführen kann. Aus dem Ergebnis der topologischen Analyse jeder CPU-Karte wird ein Triggersignal abgeleitet, das in Form von Triggerelementen über eine CTL-Schnittstellen-Karte zur zentralen Triggerlogik weitergeleitet wird.

Bei der sogenannten Power¹-PC-CPU-Karte handelt es sich um eine VME-Karte vom Typ MVME2400 vom Hersteller Motorola, auf der ein nahezu kompletter Rechner integriert ist (siehe Abbildung 3.7). Ihre Ausstattungsmerkmale sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Die CPU-Karten können mit verschiedenen Betriebssystemen verwendet werden. Für den Betrieb im Rahmen des FTT-Projekts findet das Betriebssystem Vx-Works von der Firma Windriver [66] Anwendung. Hierbei handelt es sich um ein Echtzeitbetriebssystem, das die Abarbeitung von Programmen unter Berücksichtigung der damit verbundenen Datentransfers auf einer CPU-Karte steuert und dieser die Möglichkeit einräumt, auf bestimmte Signale schnell zu reagieren und damit gewährleistet, dass Anfragen in einer garantierten Antwortzeit von etwa 10 μ s bearbeitet werden können. Desweiteren erlaubt es die Implementierung von Programmen in der Hochsprache C, wodurch jedem potentiellen Benutzer von FTT-L3 die Möglichkeit ermöglicht wird, einen von ihm produzierten Triggeralgorithmus zur Ereignisselektion auf Triggerniveau, mit deren Hilfe sich Teilchen im Endzustand der *ep*-Streuung identifizieren lassen, einfach zu integrieren. Bei der Implementierung ist jedoch darauf zu achten, dass die Triggeralgorithmen, die auf der dritten Stufe des FTTs zur Ereignisselektion eingesetzt werden, folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Laufzeit des jeweiligen Triggeralgorithmus unterschreitet die Latenzzeit der dritten Triggerstufe von 100 μ s.
- Der Triggeralgorithmus muss in der Lage sein, die relevanten Physikereignisse zu identifizieren.

¹**P**erformance **O**ptimized **W**ith **E**nhanced **R**ISC microprocessor architecture for Personal Computers

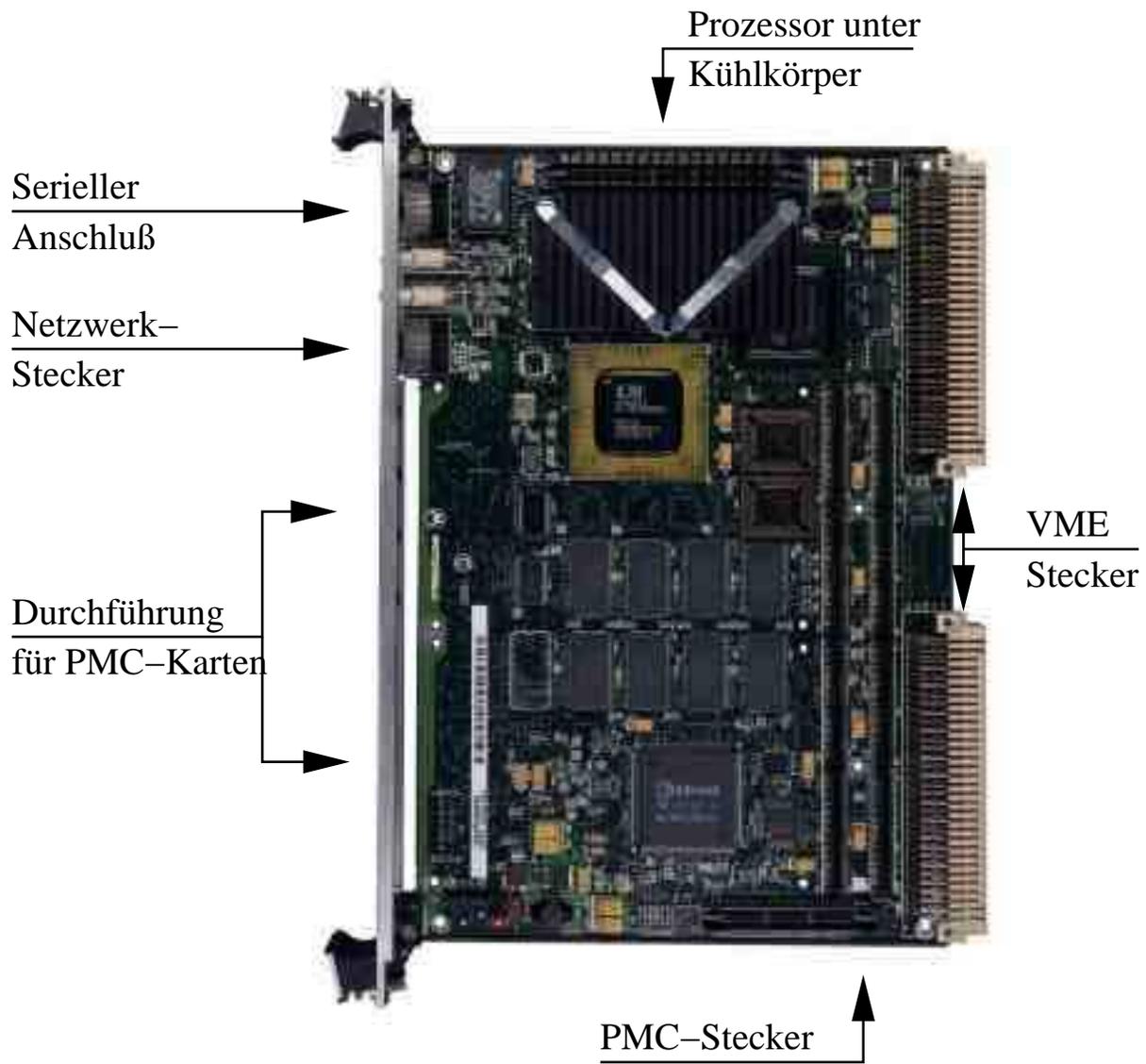


Abbildung 3.7: *MVME2400-Karte von Motorola [65]. Im oberen Teil der Karte befindet sich unter einem Kühlkörper der PowerPC 750-Prozessor, in der Mitte befinden sich die Bänke für Speicherbausteine. Für den Datentransfer zu der Karte hin oder von der Karte weg sind ein serieller Anschluss, ein Netzwerkanschluss, eine VME-Schnittstelle und zwei PMC-Steckplätze integriert.*

Um sicherzustellen, dass beide Bedingungen noch **vor** der Implementation von Triggeralgorithmen auf der Power-PC-CPU-Karte erfüllt sind, ist es notwendig, den betreffenden Algorithmus zu analysieren und im Bezug auf Laufzeitverhalten und korrekten Ablauf, falls nötig, optimieren zu können. Zu diesem Zweck wurde die Triggersimulation *L3Velo* entwickelt, die im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

Kapitel 4

Die Simulation L3Velo

Im letzten Kapitel wurde das Softwarepaket FTTEMU [54] erwähnt, welches die ersten beiden Stufen des Fast Track Triggers simuliert und die dreidimensionalen Spurparameter liefert, die zu den nachgewiesenen Teilchenspuren korrespondieren. Diese werden als Eingangsgrößen für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten FTT-L3-Triggersimulation L3Velo verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Testumgebung zur Durchführung von Laufzeitanalysen für die auf FTT-L3 verwendeten Triggeralgorithmen.

Zunächst soll im folgenden Abschnitt eine kurze Übersicht über den Ablauf der Datenspeicherung im H1-Experiment gegeben sowie die Daten vorgestellt werden, die für die FTT-Triggersimulation L3Velo relevant sind. Anschließend wird das generelle Konzept beschrieben, das der Triggersimulation L3Velo zugrunde liegt. Die sich daraus ableitende Softwarerealisierung zur Umsetzung des Konzepts wird nachfolgend erläutert. Die mit L3Velo durchgeführten Laufzeitanalysen basieren auf einem Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Mesonen. Beides soll im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

4.1 Datenspeicherung im H1-Experiment

Nahezu alle vom H1-Detektor gelieferten Daten werden in sogenannten BOS-Banken gespeichert. Das damit assoziierte BOS-System [67] gestattet ein strukturiertes Management der Daten, die vom H1-Detektor bei einem Ereignis erzeugt werden. Ein Ereignis wird in einer Vielzahl von Banken gespeichert, wobei die Daten einzelner Detektorkomponenten in unterschiedlichen BOS-Banken abgelegt werden. Eine Bank wird durch einen Namen, der vier Buchstaben umfasst, identifiziert und besitzt ein vordefiniertes Format. Dieses besteht in der Regel aus 16- oder 32-Bitworten.

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

Die vom Detektor oder von der Simulation erzeugten Daten werden der Rekonstruktion zugeführt, wobei deren Resultate in Form von BOS-Banken ausgegeben werden. Für die Analyse werden dann sogenannte DSTs (**D**ata **S**ummary **T**apes) erzeugt, in denen nur noch die für die Analyse wichtigsten Detektorinformationen und Variablen, welche durch die Rekonstruktion berechnet wurden, enthalten sind. Die DSTs stehen üblicherweise auf schnellen Festplattenspeichern zur Verfügung und sind für Analysen bequem zugänglich.

Daten, die sich nicht für jedes einzelne Ereignis ändern, werden in einer Datenbank (Database) [68] ebenfalls in Form von BOS-Banken gespeichert. Auf diese Weise ist der Zugriff auf Informationen aus der Database dem Zugriff auf Daten, die einem mit dem H1-Detektor aufgezeichneten Ereignis zugeordnet sind, sehr ähnlich. Zu diesen Daten gehören beispielsweise Kalibrationskonstanten, Informationen über die Detektorgeometrie und Triggerkonfigurationen. Die Hauptaufgabe der Datenbank besteht darin, eine eindeutige Korrelation zwischen den gespeicherten Daten, die während der Datennahmeperiode (*Run*) zum Einsatz gekommen sind, und den *Run-Nummern* herzustellen. Über diese können die gespeicherten Daten den einzelnen Runs eindeutig zugeordnet werden. Die Run-Nummer erlaubt folglich einen bequemen Zugriff auf die mit ihr verknüpften Daten, die innerhalb der entsprechenden Datenperiode verwendet wurden. Wird beispielsweise eine neue Version eines bisher genutzten Triggeralgorithmus verwendet, so wird diese unter einer neuen Runnummer verwaltet.

4.2 Das Konzept von L3Velo

Die Grundlage für eine effiziente Geschwindigkeitsoptimierung von Triggeralgorithmen, die auf der dritten Stufe des Fast Track Triggers zur Ereignisselektion verwendet werden, ist die möglichst genaue Kenntnis der mit den Algorithmen verknüpften Laufzeiten auf der Power-PC-CPU-Karte (PPC). Wie schon im letzten Kapitel erwähnt, steht den auf der dritten Stufe des FTTs verwendeten Triggeralgorithmen zur Durchführung von Ereignisselektionen eine maximale Laufzeit von 100 μ s zur Verfügung. Aus diesem Grund muss das Laufzeitverhalten des jeweiligen Algorithmus in einer an die dritte Stufe des Fast Track Triggers angelehnten Testumgebung mit möglichst hoher Zeitauflösung analysiert werden. Eine solche Umgebung ist die im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte FTT-L3-Triggersimulation *L3Velo*¹. Sie erlaubt die Durchführung von Laufzeittests auf einem kommerziellen PC-System.

Das Ziel ist eine Korrelation zwischen den Laufzeiten beider Computersysteme, so dass von der durch L3Velo bestimmten Laufzeit auf die Laufzeit geschlossen werden kann, die ein beliebiger Algorithmus auf dem PPC-System benötigen wird. Daher wird ein ausgewählter FTT-L3-Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Ereignissen (siehe Kapitel 5.3) als Referenz verwendet, dessen Laufzeitverhalten im Rahmen der vorliegenden Arbeit für beide Computersysteme mit geeigneten Methoden der Laufzeitmessung (siehe Kapitel 5.1) analysiert wurde, um die Laufzeiten beider Computersysteme zu korrelieren. Besitzt der dabei gefundene Umrechnungsfaktor zwischen den auf beiden Systemen gemessenen Laufzeiten für jeden beliebigen FTT-L3-Triggeralgorithmus den gleichen Wert, so ist eine Vorhersage der Laufzeit, die ein beliebiger Triggeralgorithmus zur Ausführung auf der dritten Stufe des FTTs benötigt, mit Hilfe von L3Velo auf dem konventionellen PC-System möglich. Auf diese Weise kann entschieden werden, ob der betreffende Triggeralgorithmus einer Geschwindigkeitsoptimierung unterzogen werden muss oder ob diese entfallen kann. Die oben genannte Bedingung für den Umrechnungsfaktor lässt sich mit Hilfe eines weiteren Triggeralgorithmus überprüfen. Hierzu bietet sich beispielsweise ein Algorithmus zur Selektion von D^* -Mesonen [48] an.

Abbildung 4.1 zeigt schematisch, wie die Triggersimulation L3Velo auf die erforderlichen Daten zurückgreift. Während der Datennahmeperiode wird der verwendete Triggeralgorithmus auf einem Monitor-PC, der sich in der Experimentierhalle des H1-Experiments befindet, kompiliert, d. h. in Maschinensprache-Code umgewandelt. Der Algorithmus kann nun auf der Power-PC-CPU-Karte unter Gebrauch der Spurdaten, die von der zweiten Stufe des Fast Track Triggers

¹Velocity (engl.) = Geschwindigkeit

Befehlen verwendet wird. Im Gegensatz zu einem Compiler lassen sich Skripte mit CINT ohne zusätzliche Durchführung von Compile- und Linking-Prozessen ausführen. Daher besteht der große Vorteil beim Gebrauch des CINT-Interpreters gegenüber einem Compiler in der Möglichkeit der sogenannten *Online*-Interpretation von C-Quellcodes der zu untersuchenden Triggeralgorithmen. Daraus folgt, dass der Programmcode des betreffenden Triggeralgorithmus während der Nutzung der H1-Simulation des Fast Track Triggers bzw. der Simulation L3Velo interpretiert werden kann. Dies gilt insbesondere in dem Fall, in dem der Quellcode eines während der Datennahme verwendeten Triggeralgorithmus modifiziert wurde. Hierbei erlaubt das Programm CINT die Interpretation des modifizierten Quellcodes ohne weitere zusätzliche Vorbereitungen. Auf diese Weise ist z. B. die Simulation von vielen Runperioden in einem Schritt möglich.

Ein weiterer Vorteil ist die Portabilität, da CINT auf einer großen Anzahl von Betriebssystemen lauffähig ist und auf diese Weise ein nahezu plattform-unabhängiger Einsatz von L3Velo gewährleistet ist. Für die vorliegende Arbeit wurde die Version CINT 5.15 verwendet.

4.3 Der Programmablauf von L3Velo

In Abbildung 4.2 wird schematisch der Programmablauf skizziert. Die wesentlichen Schritte können wie folgt zusammengefasst werden:

- Einlesen des C-Quellcodes aus einer BOS-Bank
- Einlesen der Spurdaten
- Ausführung des Triggeralgorithmus unter Verwendung von CINT
- Messung der Laufzeit für den betreffenden Triggeralgorithmus

Im folgenden sollen die einzelnen Schritte näher beschrieben werden.

Zunächst wird der zu untersuchende Algorithmus der Triggersimulation L3Velo zugeführt. Hierzu muss folgende Fallunterscheidung getroffen werden: im ersten Fall wird ein Triggeralgorithmus benutzt, der in der H1-Datenbank in BOS-Banken gespeichert ist und tatsächlich während der Datennahme verwendet wird, im zweiten Fall handelt es dabei um einen neuentwickelten bzw. modifizierten Triggeralgorithmus, der über eine Textdatei in die Simulation eingelesen wird. In beiden Fällen ist die Schnittstelle eine BOS-Bank innerhalb der Simulation, in welche der betreffende Algorithmus übertragen wird. Der Einleseprozess erfolgt zeichenweise über das sogenannte *Steering*, wobei der Quellcode des Triggeralgorithmus direkt in die Simulation übertragen wird.

Als weitere Eingangsgrößen dienen die rekonstruierten L2-Spurdaten. Wie im nächsten Kapitel beschrieben wird, werden für jede auf FTT-L2 registrierte Spur die Größen κ , φ^* und $\cot\theta$ an die dritte Stufe des Fast Track Triggers übertragen, wobei sämtliche Spuren, die zu einem Ereignis gehören, zusammengefasst sind. Da derzeit der Fast Track Trigger noch nicht in Betrieb genommen worden ist, werden die oben genannten Größen vom Programm FTTEMU, welches die ersten beiden Stufen des Fast Track Triggers simuliert, erzeugt. Um später bei der Ausführung des Triggeralgorithmus Rechenzeit zu sparen, werden die eingelesenen L2-Spurdaten im Vorfeld durch ein CINT-Skript aufbereitet und die resultierenden Größen in einer Datenstruktur ("L3-Datensatz") gespeichert.

Im folgenden wird der zu untersuchende Triggeralgorithmus aus der BOS-Bank extrahiert. Zu seiner Ausführung wird ein CINT-Skript benutzt. Sowohl letzteres als auch das schon beschriebene

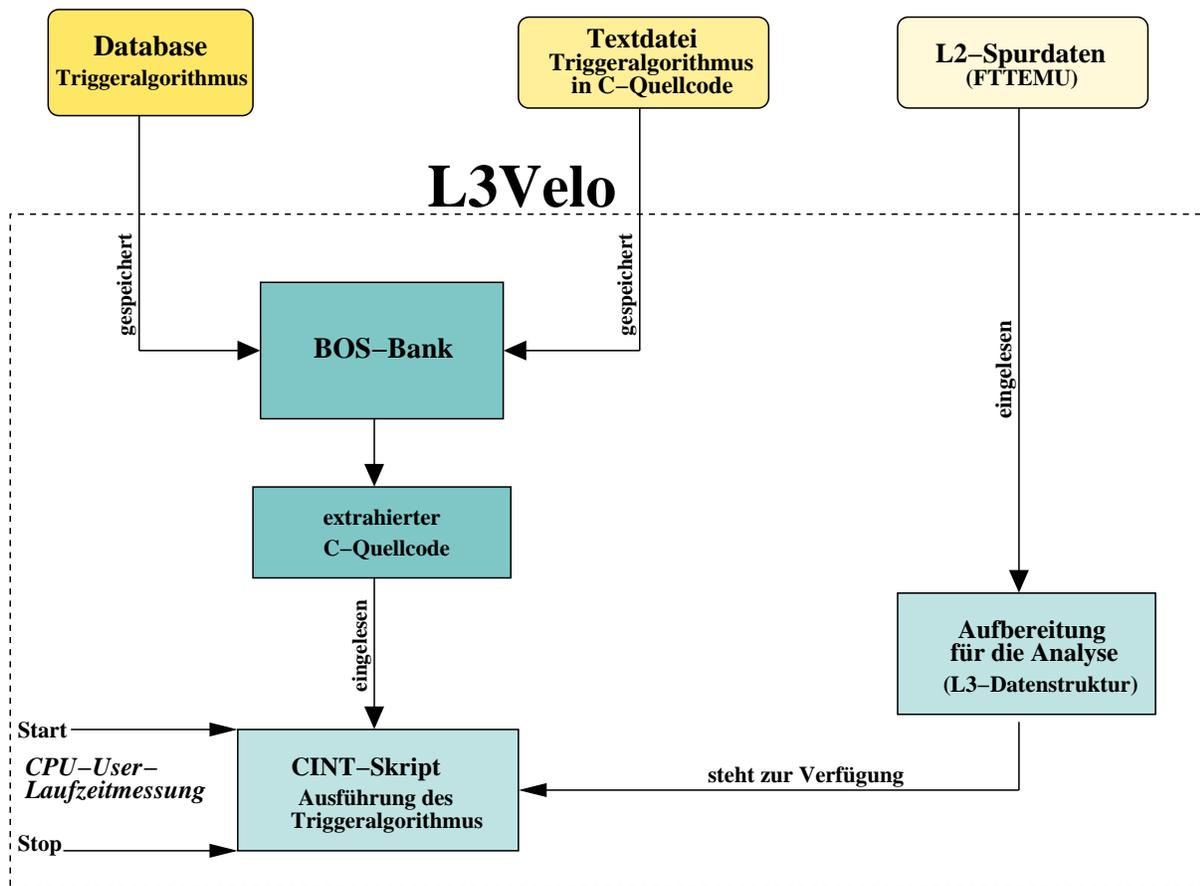


Abbildung 4.2: Schematischer Programmablauf von L3Velo. Weitere Beschreibung siehe Text.

CINT-Skript zur Aufbereitung der L2-Spurdaten greifen auf einen gemeinsamen Speicherbereich zurück, in dem sich die aufbereiteten Daten befinden. Diese können somit bei der Ausführung des Triggeralgorithmus verwendet werden.

Mittels einer speziellen Laufzeitroutine (siehe Kapitel 5.1) wird die bei der Ausführung des betreffenden Triggeralgorithmus vergangene Laufzeit, die sogenannte *User-CPU-Zeit* (siehe Abbildung 4.2), für jedes einzelne Ereignis gemessen. Die verschiedenen Methoden der Laufzeitmessung sowohl für das konventionelle PC-System als auch für das PPC-System sollen im nächsten Kapitel detailliert besprochen und miteinander verglichen werden.

Nach Beendigung des Algorithmus wird die gemessene Laufzeit für jedes Ereignis in eine Textdatei gespeichert, die im folgenden für die Durchführung von Laufzeitanalysen herangezogen werden kann.

Kapitel 5

Laufzeitanalysen mit L3Velo

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die verschiedenen Methoden der Laufzeitmessung gegeben, die auf dem PC-System und auf dem PPC-System zum Einsatz gekommen sind. Es werden Laufzeittests vorgestellt, bei denen die Zeit für das Füllen der L3-Datenstruktur unter Variation von verschiedenen Spurvariablen untersucht wird. Im Anschluss daran wird ein Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Mesonen beschrieben, der für die durchgeführten Laufzeitanalysen als Referenzalgorithmus eingesetzt wird. Die Ergebnisse der einzelnen Laufzeitanalysen werden diskutiert. Hierbei wird insbesondere auf die Laufzeitkorrelation zwischen PPC- und konventionellen PC-System eingegangen.

5.1 Laufzeitmessung

Wie im letzten Kapitel beschrieben, werden mit Hilfe der FTT-Triggersimulation L3Velo Laufzeitanalysen für Triggeralgorithmen durchgeführt, die auf den Power-PC-CPU-Karten zur Ereignisselektion verwendet werden. Entscheidend dabei ist die enge Laufzeitvorgabe von $100\ \mu\text{s}$ an der sich das Laufzeitverhalten der auf FTT-L3 verwendeten Triggeralgorithmen orientieren muss. In der vorliegenden Arbeit wird ein ausgewählter Triggeralgorithmus verwendet, dessen Laufzeitverhalten sowohl auf der Power-PC-CPU-Karte als auch auf dem konventionellen PC-System analysiert wird. Die Kenndaten des verwendeten PC-Systems sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Bei der Messung der Laufzeit des verwendeten Triggeralgorithmus muss gewährleistet sein, dass ausschließlich die Zeit erfasst wird, die der Triggeralgorithmus effektiv zur Ausführung benötigt. Bei der Erfassung der Laufzeit mit Hilfe der beiden beschriebenen Computersysteme wird im Rahmen dieser Arbeit prinzipiell zwischen zwei verschiedenen Arten von Zeitmessung unterschieden: der *Echt-* bzw. *Realzeitmessung* und der *User-CPU-Zeitmessung* [71]. Die Messung der Echtzeit basiert in der Regel auf einer im Rechner integrierten Hardware-Uhr, wobei sämtliche vom Rechner ausgeführten Prozesse zeitlich erfasst werden, jedoch zwischen den einzelnen Prozessen nicht zeitlich differenziert wird. Hierzu gehören sämtliche Hintergrundprozesse, die während des Betriebs des jeweiligen Computersystems ausgeführt werden. Will man die Laufzeit für einen bestimmten Prozess (z. B. Ausführung eines Triggeralgorithmus) erfassen, so bedeutet dies im Falle der Echtzeitmessung, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass der zu untersuchende Prozess von weiteren parallel laufenden Prozessen überlagert und auf diese Weise die Laufzeitmessung verfälscht wird.

Anders verhält sich dies für den Fall der User-CPU-Zeitmessung. Unter der User-CPU-Zeit ver-

Prozessor	Intel(R) Pentium(R) 4, 32-bit mit 1,70 GHz Taktfrequenz
RAM	512 MBytes
Betriebssystem	DESY Linux 4 (entspricht SUSE Linux 7.2)
Netzwerkanbindung	10/100 Mbits/s Ethernet Pro 100
Cache-Größe	256 KBytes

Tabelle 5.1: *Kenndaten des PC-Systems*

steht man die gesamte Rechenzeit eines Prozessors zur Bearbeitung einer einzelnen Aufgabe [72] (z. B. Laufzeitmessung eines Triggeralgorithmus). Die Messungen der User-CPU-Zeit sind an das sogenannte *Scheduling* des Betriebssystems gekoppelt [73]. Dieses beschreibt die zeitabhängige Zuteilung von Ressourcen (z. B. Rechenleistung) an die Prozesse, die somit völlig unabhängig voneinander erfasst werden. Dies bedeutet für die Bestimmung der Laufzeit eines Triggeralgorithmus, dass die gemessene Zeit tatsächlich der Zeit entspricht, die während der Ausführung des Triggeralgorithmus vergangen ist. Wie weiter unten anhand von Laufzeittests erläutert, eignet sich diese Methode der Laufzeitmessung für die Bestimmung der Laufzeit von Triggeralgorithmen, die sowohl auf dem PPC-System als auch auf dem konventionellen PC-System ausgeführt werden.

Die Messung der User-CPU-Zeit beim konventionellen PC-System basiert auf einer Routine, die im folgenden als *getCPUtime()* bezeichnet wird. Diese greift sowohl beim Start als auch bei Beendigung des zu untersuchenden Triggeralgorithmus auf die User-CPU-Zeit zurück. Durch Differenzbildung ergibt sich die Laufzeit, die der Algorithmus benötigt hat. Die Zeitauflösung entspricht hierbei etwa 10 ms und ist daher nicht ausreichend für die Messung von Laufzeiten im μs -Bereich. Um dies zu kompensieren und das Laufzeitverhalten von FTT-L3-Triggeralgorithmen dennoch erfassen zu können, werden bei den folgenden Laufzeitmessungen mit dem PC-System die Anzahl der Algorithmusdurchläufe pro Ereignis erhöht und die dabei gemessenen Laufzeiten entsprechend akkumuliert.

In Abbildung 5.1 werden die Ergebnisse der Laufzeittests für die Echtzeit- und User-CPU-Zeit-Messung vorgestellt. Die Laufzeiten wurden jeweils auf dem konventionellen PC-System bestimmt. Basierend auf den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Triggeralgorithmen wurden für beide Messmethoden jeweils zwei Laufzeitmessungen durchgeführt. Im oberen Diagramm von Abbildung 5.1 ist auf der x -Achse die Echtzeit aufgetragen, bei der parallel ein künstlich generierter Hintergrundprozess¹ ausgeführt wurde. Auf der y -Achse ist die Echtzeit entsprechend ohne Hintergrundprozess aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt $0,47 \pm 0,0006$. Dies zeigt, dass die Echtzeitmessung vom selbsterzeugten Hintergrundprozess beeinflusst wird und folglich für die Durchführung von Laufzeittests nicht in Frage kommt. Im unteren Diagramm von Abbildung 5.1 ist die User-CPU-Zeit mit gleichzeitig ausgeführten Hintergrundprozess (x -Achse) und ohne Hintergrundprozess (y -Achse) aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt $1,00 \pm 0,0011$. Die Messung der User-CPU-Zeit ist daher erwartungsgemäß unabhängig vom selbsterzeugten Hintergrundprozess und damit zur Durchführung von Laufzeittests für Triggeralgorithmen optimal geeignet. Im folgenden wird ausschließlich die User-CPU-Zeit-Messung zur Erfassung der Laufzeit verwendet.

Um beim PPC-System Programmabläufe zeitaufgelöst kontrollieren zu können, ist die CPU-Prozessor Karte mit einem sogenannten Hawk-Baustein [48, 74] bestückt, dessen Zählerregister

¹Als Hintergrundprozess wurde eine Endlosschleife benutzt, in der eine Bildschirmausgabe durchgeführt wurde. Dies führte zu einer CPU-Auslastung von nahezu 99 %.

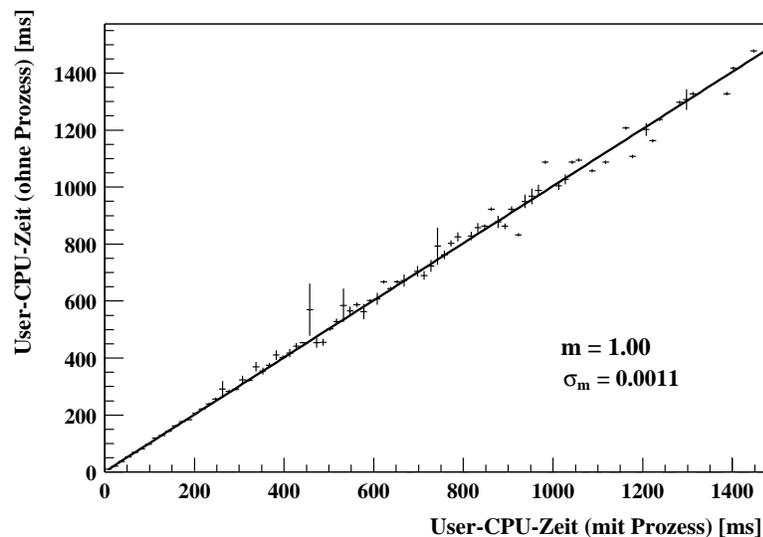
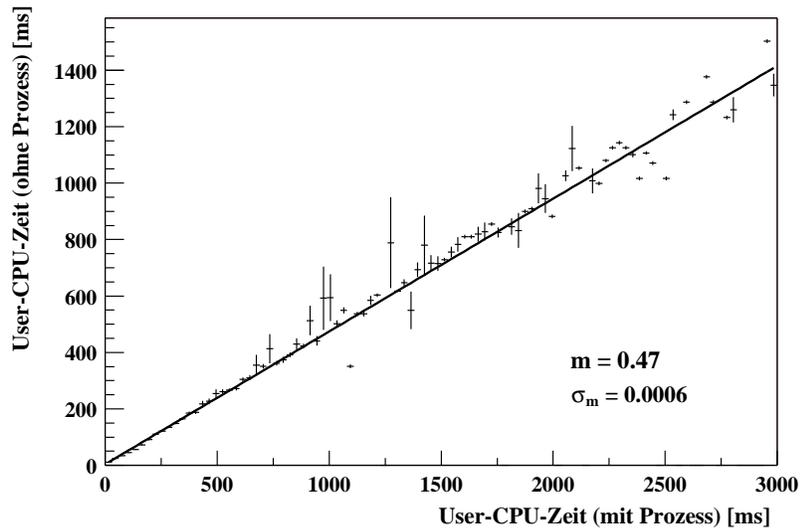


Abbildung 5.1: Laufzeittests mit dem PC-System für Echtzeit (oben) und User-CPU-Zeit (unten). Auf der x -Achse ist jeweils die gemessene Laufzeit aufgetragen, bei der ein künstlich generierter Hintergrundprozess zusätzlich durchgeführt wurde. Auf der y -Achse sind jeweils die Laufzeiten ohne Hintergrundprozess aufgetragen. In beiden Diagrammen sind die jeweiligen Ausgleichsgeraden eingezeichnet sowie deren Geradensteigung angegeben. Für jede Laufzeitmessung wurden jeweils 500 Algorithmusdurchläufe pro Ereignis durchgeführt. (Vergleiche Erläuterungen im Text.)

ausgelesen wird. Der Inhalt dieses Zählerregisters wird alle vier Takte des Prozessorsbusses mit einer Frequenz von 25 MHz inkrementiert. Dies entspricht einer Zeitauflösung von 40 ns. Das Betriebssystem Vx-Works stellt zwei Routinen zur Verfügung, die für Laufzeitmessungen verwendet werden können. Mit Hilfe der Startroutine `fttUtilTimeBase()` wird eine Referenzzeit festgelegt, wohingegen mit der Stopproutine `fttUtilTimeGet()` der Zeitpunkt festgelegt wird, an dem der Triggeralgorithmus terminiert ist. Die Differenz beider Zeiten liefert die Laufzeit des zu unter-

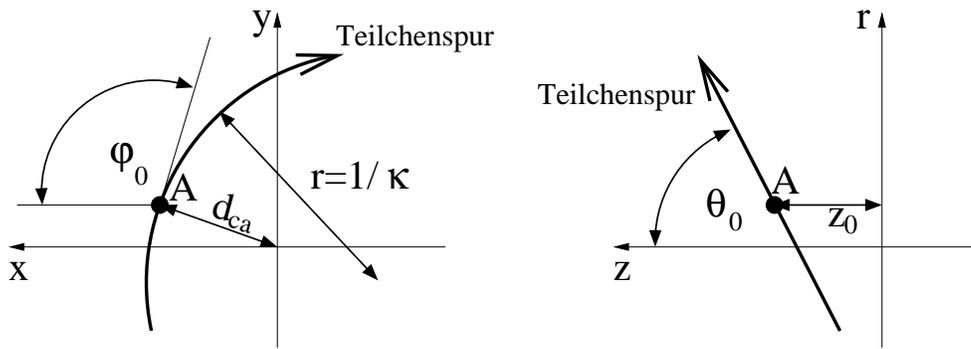


Abbildung 5.2: Projektion einer Spur in die x - y -Ebene (links) und die r - z -Ebene (rechts) des H1-Koordinatensystems. Eingezeichnet sind die fünf im Text erläuterten Spurparameter, durch die die Spur beschreibende Helix festgelegt wird. Zusätzlich ist der Punkt A markiert, an dem Orts- und Richtungsvektor der Spur einen rechten Winkel bilden und somit der Abstand zwischen Spur und Koordinatenursprung minimal ist.

suchenden Triggeralgorithmus. In Vx-Works besitzt man die Möglichkeit, zu erzwingen, dass kein weiterer Prozess die Ausführung des Triggeralgorithmus und folglich die Laufzeitmessung beeinflusst [48].

5.2 Datenaufbereitung

Wie im Kapitel 3.2.2 beschrieben, handelt es sich bei den auf der zweiten Stufe des Fast Track Triggers bestimmten Daten um die rekonstruierten dreidimensionalen Spurparameter κ , φ und $\cot \theta$, die die auf FTT-L2 gefundenen Teilchenspuren parametrisieren. Letztere können in sehr guter Näherung durch eine Helix beschrieben werden, deren Achse in z -Richtung zeigt. Ihre Projektion auf die x - y -Ebene ergibt einen Kreis. In drei Dimensionen wird die Helix durch die folgenden fünf Parameter beschrieben:

- *Abstand d_{ca} :*
Der Spurparameter d_{ca} (**d**istance of **c**losest **a**pproach) ist vorzeichenbehaftet. Sein Betrag gibt den kürzesten Abstand des Spurkreises in der x - y -Ebene vom Koordinatenursprung an (siehe Abbildung 5.2). Die entsprechende Stelle des Spurkreises wird im folgenden als d_{ca} -Punkt (**d**istance of **c**losest **a**pproach) bezeichnet. Bilden der Vektor vom Koordinatenursprung zum d_{ca} -Punkt und die Flugrichtung des Teilchens im d_{ca} -Punkt ein rechtshändiges System, so ist d_{ca} positiv (vgl. Abbildung 5.2, links), andernfalls negativ.
- *Koordinate z_0 :*
Der Wert z_0 ist gleich der z -Koordinate des d_{ca} -Punktes.
- *Azimutalwinkel φ_0 :*
Der Winkel zwischen der x -Achse des H1-Koordinatensystems und der Tangente an den Spurkreis im d_{ca} -Punkt in der x - y -Ebene ist als φ_0 definiert.
- *Polarwinkel θ_0 :*
Der Polarwinkel θ_0 ist der Winkel zwischen der Teilchenspur und der z -Achse (Protonstrahlrichtung).

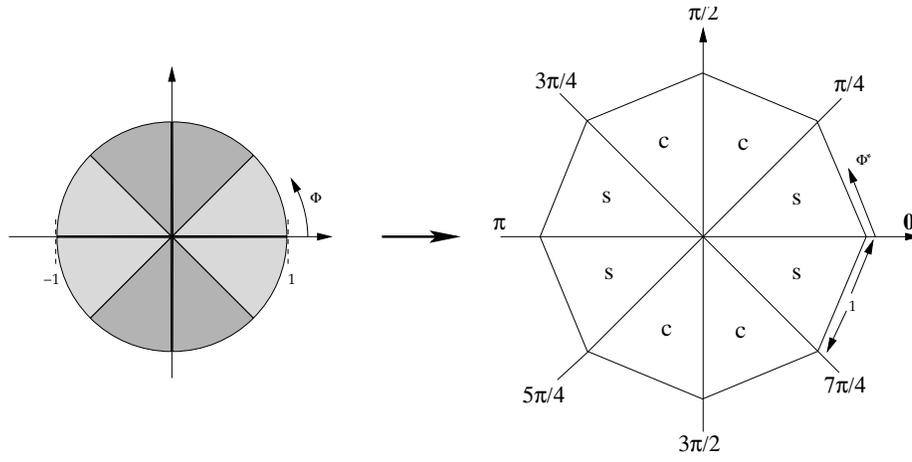


Abbildung 5.3: Transformation φ nach φ^* : Der Einheitskreis wird auf ein Oktagon mit der Kantenlänge 1 transformiert. Für die rechte Figur gelten folgende Definitionen: $c := \sqrt{2} \cos \varphi$; $s := \sqrt{2} \sin \varphi$.

- *Spurkrümmung κ :*

Die Spurkrümmung κ ist vorzeichenbehaftet. Sie ist mit dem Transversalimpuls p_t über die folgende Beziehung verknüpft:

$$p_t[\text{GeV}] = q \cdot 0,29979 \cdot B_z [\text{T}] \cdot \frac{1}{\kappa [\text{m}^{-1}]} \quad (5.1)$$

Hierbei ist die Größe B_z das in z -Richtung orientierte Magnetfeld und q die Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung e .

Die Impulskomponenten des Teilchens lassen sich mit Hilfe des Transversalimpulses wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned} p_x &= p_t \cos \varphi, \\ p_y &= p_t \sin \varphi \quad \forall \varphi \in [0, 2\pi], \\ p_z &= \frac{p_t}{\tan \theta} \quad \forall \theta \neq 0. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Man erkennt, dass für die Berechnung der transversalen Impulskomponenten p_x und p_y die Größen $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$ erforderlich sind. Hierzu bestehen zwei Möglichkeiten: zum einen kann der Winkel φ auf der zweiten Stufe des FTTs berechnet und an die dritte Stufe gesendet werden. Da die beiden Größen $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$ direkt aus dem auf FTT-L2 durchgeführten Kreisfitalgorithmus [59] resultieren, bedeutet dies, dass zur Bestimmung des Winkels φ äußerst zeitaufwendige Berechnungen von trigonometrischen Funktionen entweder auf der zweiten oder der dritten Stufe des FTTs durchgeführt werden müssten. Somit ist es besonders vorteilhaft, wenn die Größen $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$ der dritten Stufe des FTTs direkt zur Verfügung gestellt werden. Zur Reduzierung des Datenvolumens wird für den FTT eine spezielle Variable φ^* berechnet, in der die beiden Größen $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$ zusammengefasst sind. Zur Berechnung von φ^* wird der Einheitskreis $\varphi \in [0, 2\pi]$ auf ein Oktagon mit der Kantenlänge 1 abgebildet $\varphi^* \in [0, 8[$ (siehe Abbildung 5.3). Die Größe φ^* nimmt dabei die folgenden Werte an:

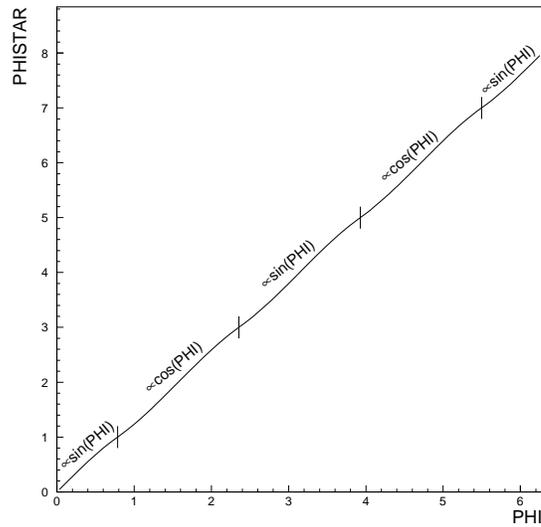


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen φ und φ^*

$$\varphi^* = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \varphi \in [0, \frac{1}{4}\pi] \\ 2 - \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi), & \varphi \in]\frac{1}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi] \\ 4 - \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \varphi \in]\frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi] \\ 6 + \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi), & \varphi \in]\frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi] \\ 8 + \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \varphi \in]\frac{7}{4}\pi, 2\pi[. \end{cases} \quad (5.3)$$

Wie man anhand von Abbildung 5.4 erkennen kann, besteht zwischen dem Winkel φ und der Variablen φ^* ein eindeutiger Zusammenhang. Zur Berechnung des Winkels φ kann das Invertieren von Gleichung 5.3 werden, wenn eine Näherung ausreichend ist, denn es gilt die lineare Approximation $\varphi \approx \frac{\pi}{4}\varphi^*$ [75].

Zusammenfassend werden für jede Teilchenspur die Größen κ , φ^* und $\cot \theta$ an die dritte Stufe des Fast Track Triggers als Eingangsdaten gesendet. Wie schon im letzten Kapitel skizziert, lassen sich daraus eine Reihe von abgeleiteten physikalischen Größen berechnen und in einer Datenstruktur speichern, wie zum Beispiel:

- die *Azimutalwinkelinformation* $(\sin(\varphi), \cos(\varphi)) = f(\varphi^*)$
Wie oben gezeigt, ist die Azimutalwinkelinformation in der Größe φ^* codiert. Durch Invertierung von Gleichung 5.3 und eine vom Oktant abhängige Fallunterscheidung kann eine der beiden trigonometrischen Größen $\cos \varphi$ oder $\sin \varphi$ direkt aus der Größe φ^* extrahiert werden. Mit Hilfe der Winkelrelation $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$ kann das Komplement zur jeweils extrahierten Größe berechnet werden. Unvorteilhaft ist hierbei die Wurzelberechnung, für die sehr viel Rechenzeit benötigt wird. Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, indem der Wurzelausdruck durch eine Taylorreihe bis zum dritten Glied entwickelt wird.
- die *Polarwinkelinformation* $\cot \theta$
Diese Information wird direkt aus den von FTT-L2 übertragenen Daten in die L3-Datenstruktur geschrieben, da der Polarwinkel θ insbesondere zur Berechnung der z-Komponente des transversalen Impulses (siehe Gleichung 5.2) nicht benötigt wird. Für den Fall, dass ein Schnitt auf den Streuwinkel durchgeführt werden soll, kann dessen Grenze als der Kotangens des geforderten Winkels angegeben werden.
- der *Transversalimpuls* p_t
Die Berechnung des Transversalimpulses erfordert gemäß Gleichung 5.1 die Spurkrümmung κ und den Wert des magnetischen Feldes.
- die *Impulskomponenten* p_x, p_y und p_z
Mit Hilfe des Transversalimpulses und den Winkelinformationen erfolgt die Bestimmung der Impulskomponenten, die später zur Berechnung der invarianten Masse benötigt werden.

Die Zeit, die zum Berechnen dieser Daten und zum Füllen der Datenstruktur benötigt wird, kann mit Hilfe der in Abschnitt 5.1 beschriebenen User-CPU-Zeitmessung erfasst werden. In Abbildung 5.5 sind die mit dem PPC-System gemessenen Füllzeiten für verschiedene L2-Spurdatensätze in Abhängigkeit von der Spurmultiplicität der untersuchten Ereignisse dargestellt. Erwartungsgemäß verhält sich die Füllzeit linear zur Spurmultiplicität der Ereignisse. Bei den L2-Spurdatensätzen wurde die Azimutalwinkelinformation variiert. Dabei zeigt sich, dass der L2-Datensatz mit φ^* als Azimutalwinkelinformation das günstigste Laufzeitverhalten besitzt. Zum Vergleich wurde das Zeitverhalten für zwei weitere Fälle aufgenommen. Im ersten Fall werden die beiden Winkelgrößen $(\cos \varphi, \sin \varphi)$ direkt von FTT-L2 übergeben. Der zweite Fall berücksichtigt die Berechnung der beiden Winkelgrößen $(\cos \varphi, \sin \varphi)$ unter Benutzung der Näherung $\varphi \approx \frac{\pi}{4} \varphi^*$.

5.3 Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Ereignissen

Abbildung 5.6 zeigt die Topologie eines charakteristischen J/Ψ -Ereignisses mit leptonischen Zerfall $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ im H1-Detektor. Nach elastischer Produktion zerfällt das J/Ψ -Meson in ein Myon-Antimyon-Paar. Man erkennt deutlich die Signatur der beiden Myonen in den zentralen Jetkammern (CJC1, CJC2). Daher sollten diese mit Hilfe des Fast Track Triggers nachgewiesen werden können.

Aus dieser Ereignistopologie resultieren die physikalischen Größen, die zur Selektion von J/Ψ -Mesonen auf Triggerniveau benutzt werden können. Diese sind die **Ladungen** der beiden Zerfallsleptonen, deren **Transversalimpulse** und deren **invariante Masse**. Mit Hilfe des Fast Track Triggers können die Spurkrümmungen von Myon und Antimyon bestimmt werden, wodurch auf Impuls und Ladungen geschlossen werden kann. Aufgrund der Masse des J/Ψ -Mesons

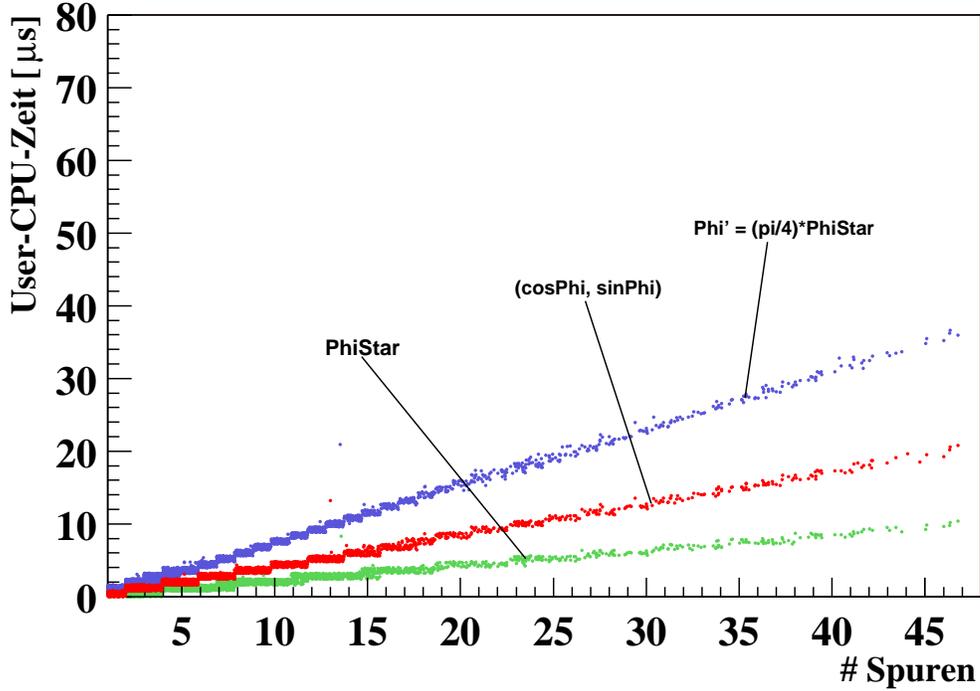


Abbildung 5.5: Laufzeitverhalten für das Berechnen der Eingangsinformationen für L3Velo unter Variation der von FTT-L2 übergebenen Azimutalwinkelinformation.

$m_{J/\Psi} = 3096,87 \text{ GeV}$ [1] ist zu erwarten, dass Myon und Antimyon jeweils einen Transversalimpuls deutlich oberhalb der FTT-Triggerschwelle von 100 MeV (siehe Kapitel 3) besitzen.

Der Selektionsalgorithmus, der zur eindeutigen Identifizierung von J/Ψ -Ereignissen (J/Ψ -Finder) genutzt wird, muss daher pro Ereignis nach zwei Spuren suchen, die entgegengesetzte Spurkrümmungen, jeweils einen Transversalimpuls oberhalb einer bestimmten Schwelle besitzen und deren invariante Masse sich in einem festgelegtem Massenintervall um die nominelle J/Ψ -Masse befindet. Für die Selektionsschnitte der einzelnen physikalischen Größen gilt dabei:

- Krümmung: $\kappa_{\mu^+} \cdot \kappa_{\mu^-} < 0$
- Transversalimpuls: $p_{t,\mu^+}, p_{t,\mu^-} \geq p_{t,cut}$
- invariante Masse: $|M_{\mu^+\mu^-} - m_{J/\Psi}| \leq \Delta_{J/\Psi}$.

Typische Werte in H1-Analysen zur elastischen J/Ψ – Produktion für die Transversalimpulsschwelle $p_{t,cut}$ und die maximale Massendifferenz $\Delta_{J/\Psi}$ sind 0,7 GeV bzw. 1,2 GeV [76, 77, 78].

Wie in Abbildung 5.7 schematisch dargestellt, besteht der Algorithmus aus drei ineinander verschachtelten Schleifen über jeweils alle Spuren. Die äußerste Schleife (Schleife 1) ermöglicht es, den Algorithmus beliebig viele Male für das gleiche Ereignis zeitlich hintereinander auszuführen, wobei die dabei gemessene Laufzeit akkumuliert wird. Wie schon im Kapitel 5.1 beschrieben, ist dies insbesondere bei den Laufzeitmessungen mit dem PC-System nötig, da ansonsten die

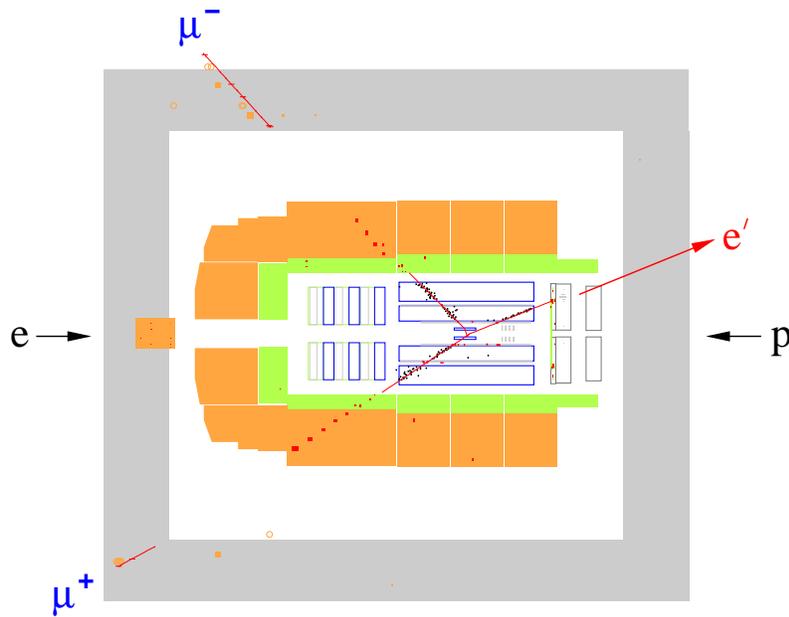


Abbildung 5.6: Charakteristische Ereignistopologie der elastischen J/Ψ -Produktion im H1-Detektor. Das dargestellte Ereignis wurde in der Datennahmeperiode des Jahres 1995 aufgezeichnet.

Zeitauflösung von 10 ms eine Messung von Laufzeiten im μ s-Bereich unmöglich macht. Aus diesem Grund müssen die Algorithmusdurchläufe pro Ereignis entsprechend inkrementiert werden, um somit eine Laufzeitmessung für Triggeralgorithmen im genannten Messbereich zu ermöglichen.

Im folgenden werden die einzelnen Schritte für den Selektionsalgorithmus näher erläutert.

Zunächst liegen die L2-Spurdaten, wie im letzten Abschnitt beschrieben, schon als aufbereitete Größen in Form der Datenstruktur vor, so dass der Selektionsalgorithmus sofort gestartet werden kann. Als erstes Selektionskriterium wird bei Kombination zweier Spuren verifiziert, ob beide Spuren entgegengesetzte Ladungen haben. Anschließend wird separat für beide Spuren ein Transversalimpuls oberhalb der genannten Schwelle gefordert. Die Selektion auf der Grundlage der invarianten Masse des Spurpaares erfordert den größten Rechenaufwand und wird mit Hinblick auf die möglichst geringe Laufzeit des Algorithmus zum Schluss durchgeführt.

Die Berechnung der invarianten Masse des Myon-Antimyon-Paares erfolgt gemäß

$$\begin{aligned}
 M_{\mu^+, \mu^-} &= \sqrt{(E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2 - (\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-})^2} \\
 &= \sqrt{m_{\mu^+}^2 + m_{\mu^-}^2 + 2(E_{\mu^+}E_{\mu^-} - \vec{p}_{\mu^+}\vec{p}_{\mu^-})}.
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Aus der Forderung nach einer oberen Grenze $\Delta_{J/\Psi}$ für die Differenz zwischen der invarianten Masse des Myon-Antimyon-Paares und der theoretischen Masse des J/Ψ -Mesons resultiert die Selektion:

$$|M_{\mu^+, \mu^-} - m_{J/\Psi}| < \Delta_{J/\Psi}.
 \tag{5.5}$$

Die Berechnung von Ungleichung 5.5 kann durch geschicktes Umstellen vereinfacht werden. Insbesondere kann in der Datenaufbereitung und Selektion der Gebrauch von Wurzeln vermieden

Selektionsalgorithmus für J/Ψ-Ereignisse

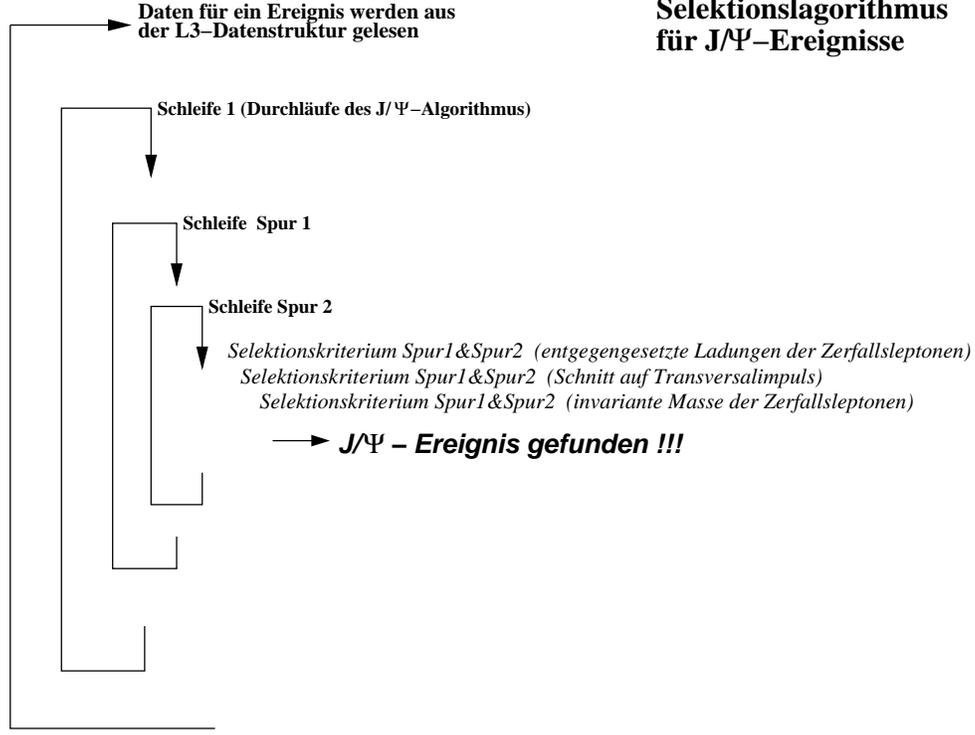


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung des spurbasierten Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ-Ereignissen. Vergleiche Erläuterungen im Text.

werden, was letztlich zu einer schnelleren Ausführung des Algorithmus beiträgt. Durch anschließendes Quadrieren wird die Wurzel aus Gleichung 5.4 eliminiert:

$$M_{\mu^+, \mu^-}^2 \leq (m_{J/\Psi} + \Delta_{J/\Psi})^2 \quad (5.6)$$

$$\wedge \quad M_{\mu^+, \mu^-}^2 \geq (m_{J/\Psi} - \Delta_{J/\Psi})^2. \quad (5.7)$$

Einsetzen von 5.4 in 5.6 und 5.7 und anschließendes Umstellen liefert:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\geq E_{\mu^+} E_{\mu^-} - \vec{p}_{\mu^+} \vec{p}_{\mu^-} \\ \wedge \quad \Delta_2 &\leq E_{\mu^+} E_{\mu^-} - \vec{p}_{\mu^+} \vec{p}_{\mu^-} \end{aligned} \quad (5.8)$$

mit

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} \cdot \left((m_{J/\Psi} + \Delta_{J/\Psi})^2 - m_{\mu^+}^2 - m_{\mu^-}^2 \right) \quad (5.9)$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{2} \cdot \left((m_{J/\Psi} - \Delta_{J/\Psi})^2 - m_{\mu^+}^2 - m_{\mu^-}^2 \right). \quad (5.10)$$

Alle Größen, die in den beiden Relationen 5.9 und 5.10 vorkommen, sind Konstanten und werden für die Initialisierung einmalig berechnet. Für die Berechnung der Energien von Myon und Antimyon wäre wiederum jeweils die Berechnung einer Wurzelfunktion erforderlich. Aus diesem Grund werden die beiden Gleichungen 5.8 entsprechend umgestellt und quadriert:

$$\begin{aligned} (\Delta_1 + \vec{p}_{\mu^+} \vec{p}_{\mu^-})^2 &\geq E_{\mu^+}^2 E_{\mu^-}^2 \\ (\Delta_2 + \vec{p}_{\mu^+} \vec{p}_{\mu^-})^2 &\leq E_{\mu^+}^2 E_{\mu^-}^2. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Für den Fall, dass alle Selektionkriterien erfüllt sind, wird davon ausgegangen, dass ein J/Ψ -Zerfall gefunden wurde.

5.4 Laufzeitanalysen am Beispiel des J/Ψ -Trigeralgorithmus

In diesem Abschnitt werden die Laufzeitanalysen vorgestellt, die sowohl mit der FTT-Triggersimulation L3Velo auf einem konventionellen PC-System als auch auf dem PPC-System durchgeführt wurden. Dabei wurde der im letzten Abschnitt beschriebene Trigeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Mesonen benutzt. Bei den Ergebnissen die im Rahmen der Laufzeittests verwendet werden, handelt es sich um solche, die von der ersten Stufe des H1-Triggersystems akzeptiert wurden, wobei die Validierungen durch die folgenden Triggerstufen (L2, L3) jedoch nicht berücksichtigt wurden. Eine solche Art von Ereignissen wird in einem sogenannten *Transparent Run* registriert. Während dieser Datennahmepériode haben alle Triggerstufen, mit Ausnahme der ersten, keinen Einfluß auf die Triggerentscheidung. Daher befinden sich unter den selektierten Ereignissen neben den J/Ψ -Ereignissen noch viele Untergrundereignisse. Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Laufzeitanalysen wird ein Transparent Run aus dem Jahre 1999 verwendet. Die in diesem Datensample enthaltenen Ereignisse besitzen unterschiedlich hohe Spurmultiplicitäten. Dies bedeutet für die zu untersuchenden J/Ψ -Ereignisse, dass diese mit einer entsprechend höheren Spurmultiplicität (> 2 Spuren) auftreten können, wodurch die Ereignissignatur nicht unbedingt der im letzten Abschnitt beschriebenen entsprechen muss.

5.4.1 Laufzeitverhalten

Zunächst wird das Laufzeitverhalten des im letzten Abschnitt vorgestellten Selektionsalgorithmus näher untersucht. Die Suche nach dem Zerfall $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ist ausschließlich durch das Abarbeiten der beiden inneren Schleifen durchgeführt (vgl. Abbildung 5.7). Aus diesem Grund erwartet man ein Zeitverhalten, das quadratisch von der Anzahl der Spuren im Ereignis abhängt. Es gilt:

$$t_{J/\Psi- Algo} \sim \frac{1}{2} \cdot n_{spur} \cdot (n_{spur} - 1) \sim \mathcal{O}(n_{spur}^2). \quad (5.12)$$

Tests zur Bestimmung des Laufzeitverhaltens, die auf dem PC-System mit Hilfe von L3Velo und auf dem PPC-System durchgeführt worden sind, bestätigen diese Erwartung, wie man anhand der beiden Laufzeitdiagramme in Abbildung 5.8 erkennen kann. Das obere Diagramm zeigt das Laufzeitverhalten des Selektionsalgorithmus auf dem PPC-System. Hierbei wurde die gemessene Laufzeit (y -Achse) in Abhängigkeit von der Spurmultiplicität (x -Achse) der zu untersuchenden Ereignisse aufgetragen. Man kann dem Diagramm entnehmen, dass die gemessenen Laufzeiten im μ s-Bereich liegen. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, ist die Zeitauflösung des PPC-System ausreichend, um die Laufzeit des Selektionsalgorithmus zu erfassen. Dies ist wiederum beim konventionellen PC-System nicht der Fall, da hier die User-CPU-Zeit nur mit einer Auflösung von 10 ms bestimmt werden kann. Um dies zu kompensieren und die Laufzeit des Selektionsalgorithmus auf dem PC-System erfassen zu können, wurde der Algorithmus für jedes zu untersuchende Ereignis 5000 Mal ausgeführt. Im unteren Diagramm ist die mit PC-System gemessene Laufzeit gegen die Anzahl der Spuren aufgetragen. Beide Diagramme in Abbildung 5.8 zeigen deutlich die quadratische Abhängigkeit der Laufzeit von der Anzahl der Spuren der zu untersuchenden Ereignisse bis hin zu höchsten Spurmultiplicitäten, bei denen allerdings die Messung statistisch limitiert ist.

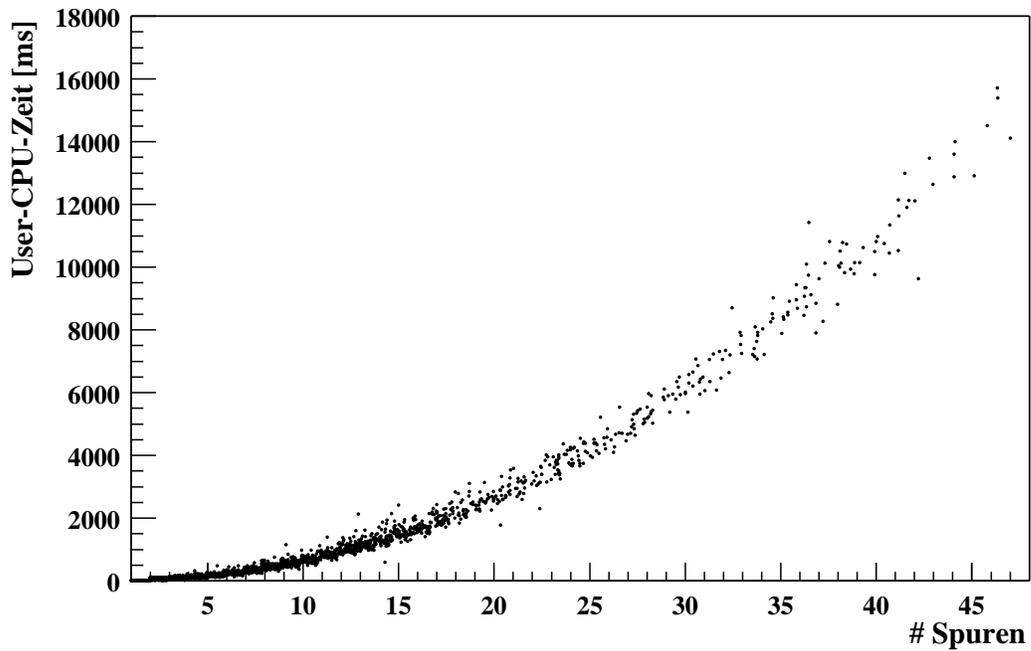
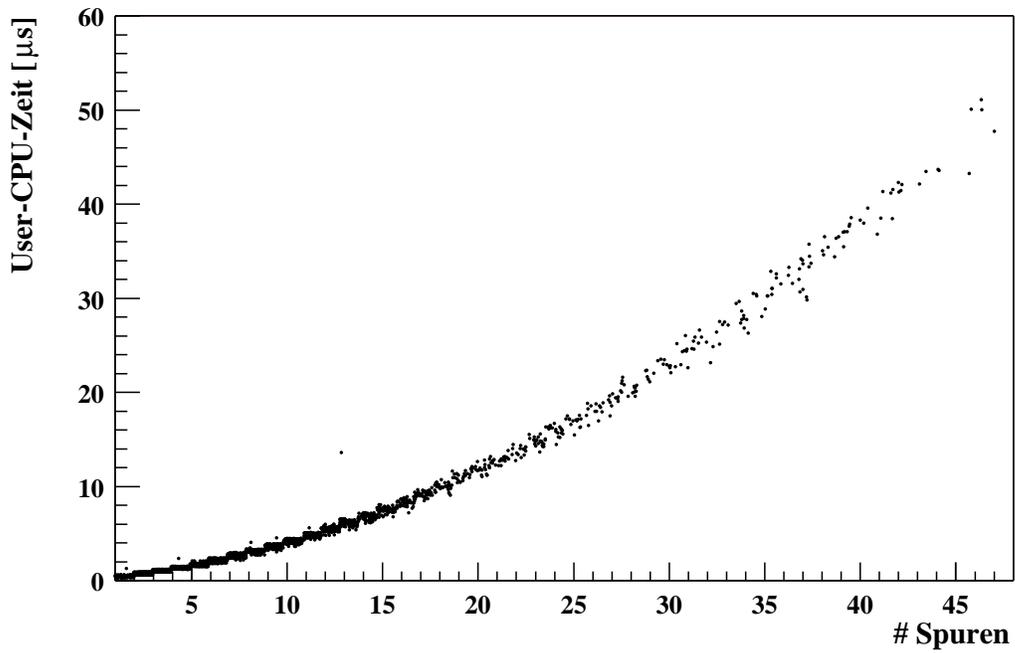


Abbildung 5.8: Laufzeitverhalten für den Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Ereignissen. Diagramm oben: Gemessene Laufzeit (PPC-System) in Abhängigkeit von der Anzahl der Spuren. Diagramm unten: Gemessene Laufzeit (konventionelles PC-System) in Abhängigkeit von der Anzahl der Spuren. Für jedes Ereignis wurde der Selektionsalgorithmus 5000 Mal durchlaufen.

In Abbildung 5.9 sind die Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von den Laufzeitmessungen², die mit L3Velo auf dem konventionellen PC-System bestimmt wurden, unter Variation der Algorithmen durchläufe n ($n = 100, 200, 500, 5000$) aufgetragen. Man erkennt, dass die Zahl der Ereignisse aufgrund der statistischen Zusammensetzung des Eingangsdatensamples für hohe Laufzeiten abnehmen. Hohe Laufzeitmittelwerte entsprechen Ereignissen mit hoher Spurmultiplicität, kleine denen mit niedrigen Spurmultiplicitäten.

Entgegen der Erwartung ist insbesondere bei einer hohen Anzahl von Algorithmen durchläufen die Abnahme der Zahl der Ereignisse für hohe Laufzeiten nicht kontinuierlich. Die Messergebnisse zeigen, dass sich gerade bei einer höheren Anzahl von Algorithmusiterationen n ($n > 500$) die Zahl der Ereignisse für hohe Laufzeiten eine diskrete Peakstruktur ausbildet (siehe Abbildung 5.9 c-d). Bei geringeren Algorithmen durchläufen kann diese Peakstruktur infolge der geringen Zeitaufösung nicht beobachtet werden. Es ist zu vermuten, dass die Laufzeitmittelwerte für jede Spurmultiplicität um einen Mittelwert statistisch verteilt sind. Dazu sind in Abbildung 5.9 e exemplarisch für 500 Algorithmen durchläufe die Laufzeitmittelwerte und Spurmultiplicitäten in Abhängigkeit von der Ereigniszahl in einem Diagramm aufgetragen. Man erkennt, dass die diskrete Peakstruktur mit der Spurmultiplicität korreliert ist. Jeder einzelnen Spurmultiplicität kann eine eigene Verteilung von Ereigniseinträgen zugeordnet werden. Die diskreten Verteilungen der gemittelten Laufzeiten für jede Spurmultiplicität basieren auf der Tatsache, dass der Selektionsalgorithmus (siehe 5.7) bei verschiedenen Ereignissen mit gleicher Spurmultiplicität in nahezu gleichen Laufzeiten die gleiche Anzahl von Schleifendurchläufen iteriert.

Ähnlich verhält es sich bei den entsprechenden Laufzeitmessungen mit dem PPC-System. Hierbei sind infolge der hohen Zeitaufösung (40 ns) die verteilten Peakstrukturen extrem schmal (siehe Abbildung 5.10) und somit stärker diskretisiert, so dass sich daher nahezu jeder einzelnen Spurmultiplicität ein eigener Peak zuordnen lässt.

Um herauszufinden, wie die gemessenen Laufzeiten bei wiederholter Messung statistisch streuen, wird die oben beschriebene Laufzeitmessung auf beiden Computersystemen für jedes Ereignis aus dem verwendeten Datensample 10 Mal hintereinander durchgeführt. Aus den 10 gemessenen Laufzeiten t_i ($i = 1..10$) wird der Laufzeitmittelwert $\langle t_i \rangle$ berechnet. Man erwartet im günstigsten Fall, dass die einzelnen Laufzeiten nicht stark vom Mittelwert abweichen. Man geht davon aus, dass eine Erhöhung der Anzahl der Algorithmen durchläufe pro untersuchtem Ereignis zu einer Verbesserung der Zeitaufösung führen wird. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass mit einer größeren Zahl von Algorithmusiterationen ebenso die Zeit ansteigt, innerhalb der die beschriebenen Laufzeittests durchgeführt werden. Das Ziel ist daher eine möglichst hohe Zeitaufösung bei einer akzeptablen Zeit zur Durchführung der beschriebenen Laufzeittests. In den Diagrammen der Abbildung 5.11 ist die Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von der Größe $\frac{t_i - \langle t_i \rangle}{n \cdot \langle t_i \rangle}$ für n Algorithmen durchläufe ($n = 100, 200, 500, 5000$) für beide Computersysteme aufgetragen. In der Abbildung 5.11(a-d) sind die Laufzeitmessungen dargestellt, die mit der Simulation L3Velo auf dem konventionellen PC-System durchgeführt wurden. Man erkennt deutlich, dass die Streuung der Laufzeiten mit der Anzahl der Algorithmen durchläufe erwartungsgemäß abnimmt. Während man in Diagramm (a) bei 100 Algorithmen durchläufen eine Streuung der Laufzeiten im Prozentbereich abschätzt, lässt sich letztere für eine große Anzahl von Algorithmen durchläufen ($n = 5000$, siehe Abbildung 5.11(d)) mit etwa 0,01 Promille abschätzen. Betrachtet man hierzu die Zeiten, die der Selektionsalgorithmus bei einer bestimmten Anzahl von Algorithmusiterationen zur Ausführung benötigte (vgl. Tabelle 5.2), so wird klar, dass das Verhältnis von

²Jede Laufzeitmessung umfasst 10 einzelne Laufzeitmessungen für jedes Ereignis. Aus den 10 bestimmten Laufzeiten wird ein Mittelwert gebildet und zusammen mit der zugehörigen Spurmultiplicität in einem Diagramm aufgetragen.

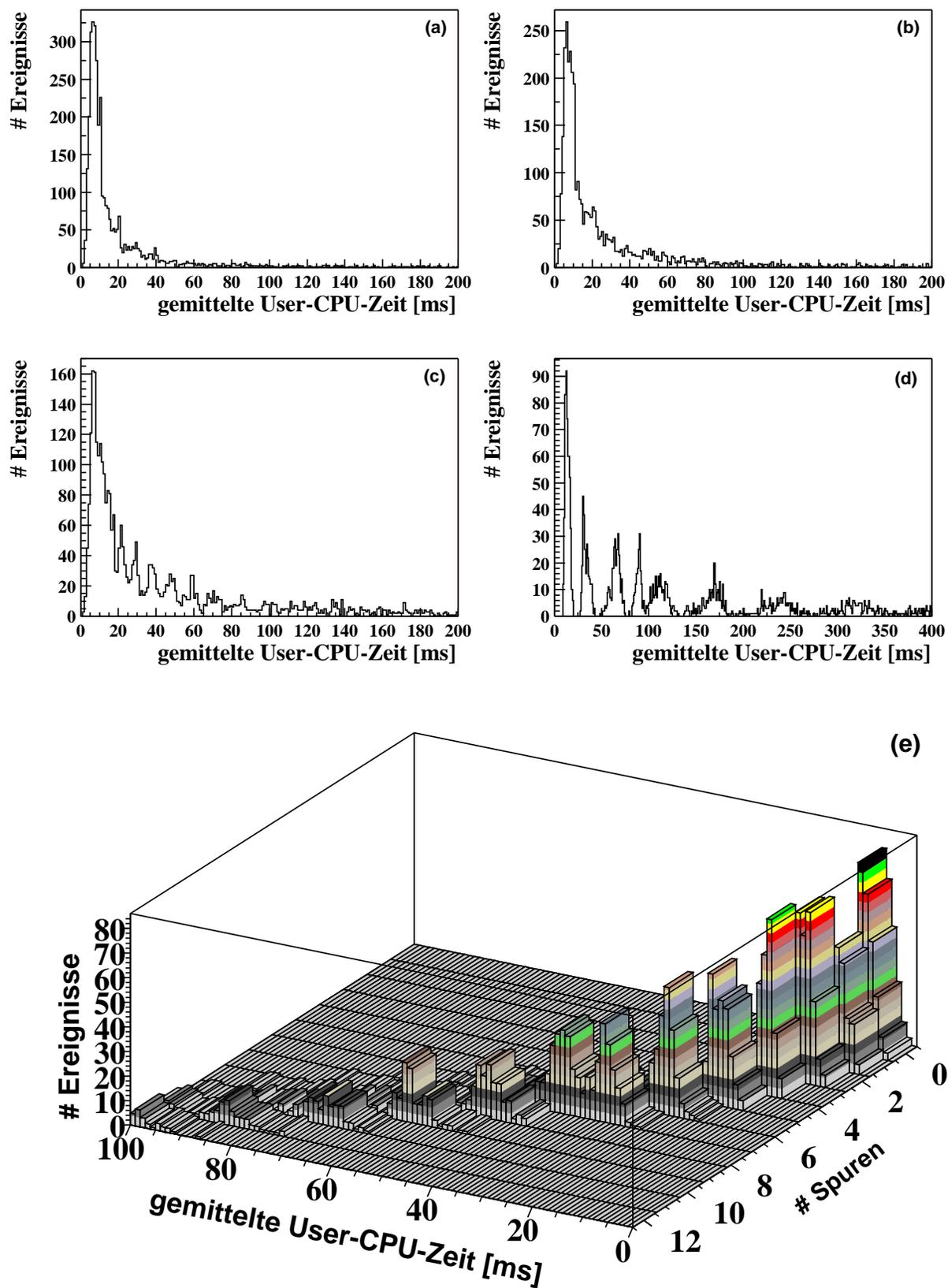


Abbildung 5.9: (a-d): Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von den mit L3Velo bestimmten Laufzeitmittelwerte für 100, 200, 500 und 5000 Algorithmusdurchläufe. (e): Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von der Spurmultiplicität und der mit L3Velo bestimmten Laufzeitmittelwerte.

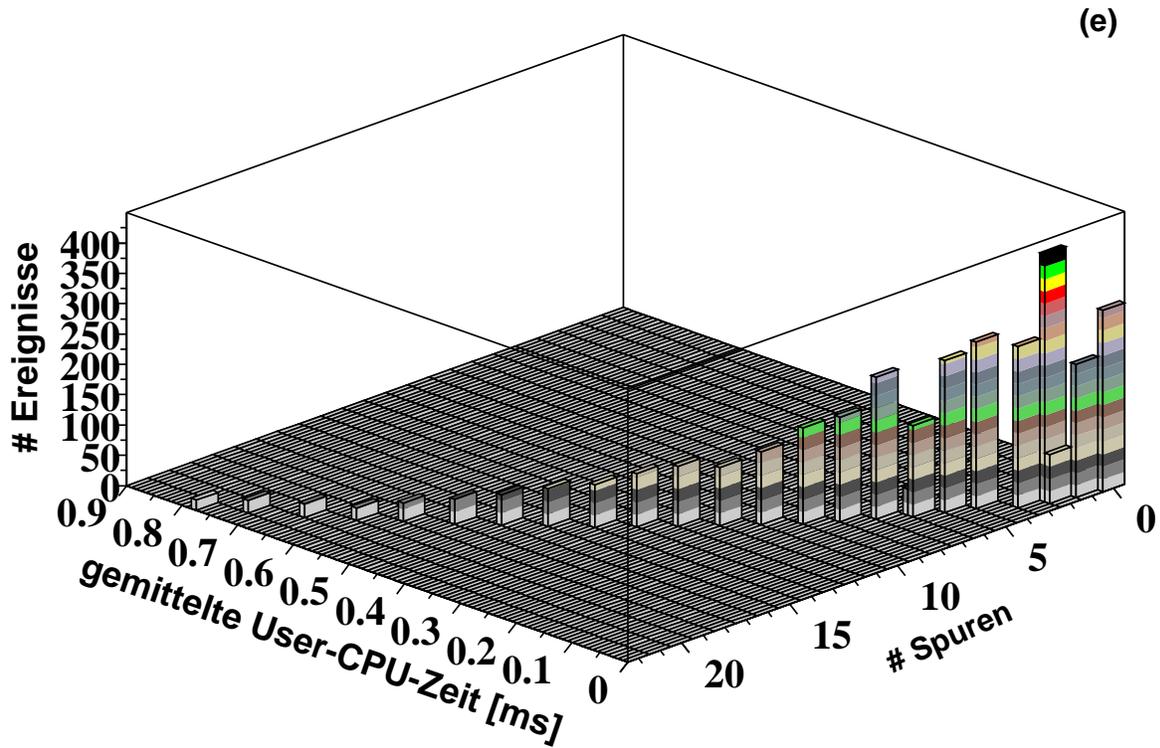
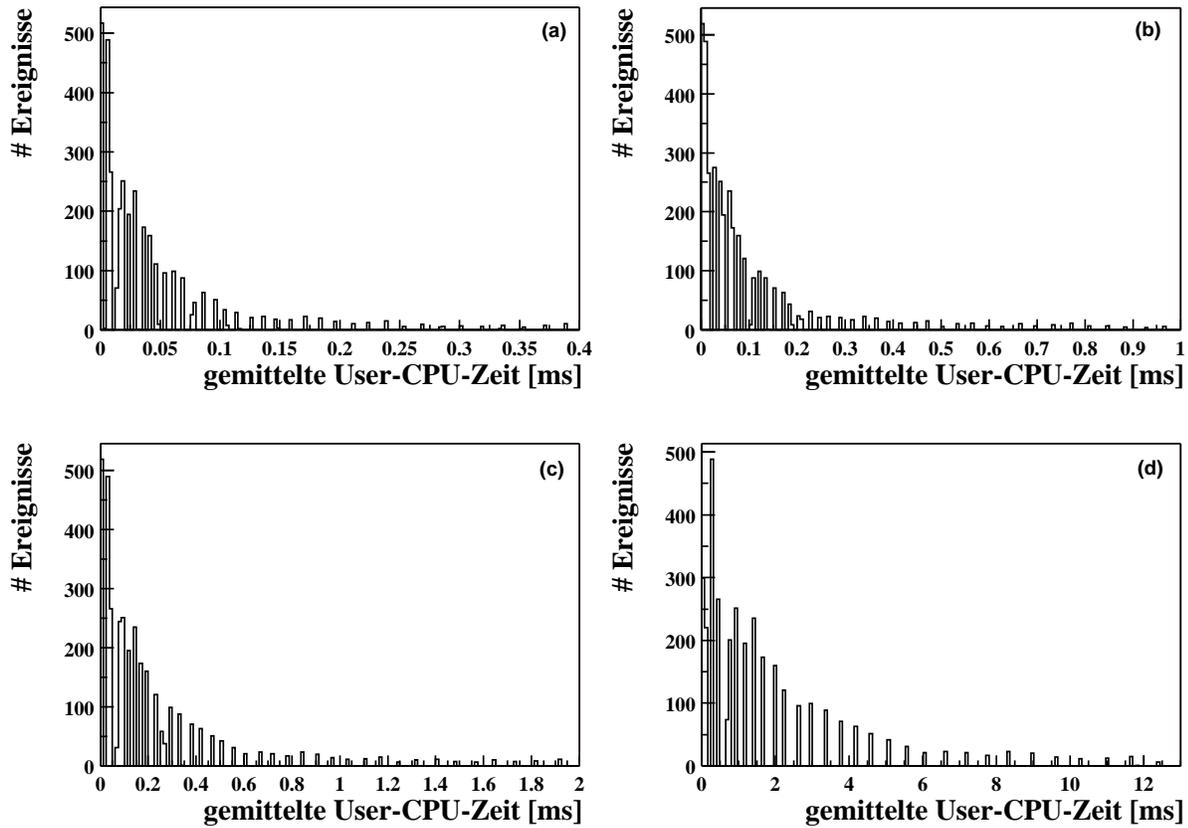


Abbildung 5.10: (a-d): Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von den durch das PPC-System bestimmten Laufzeitmittelwerte für 100, 200, 500 und 5000 Algorithmusdurchläufe aufgetragen. (e): Zahl der Ereignisse in Abhängigkeit von der Spurmultiplicität und der auf dem PPC-System bestimmten Laufzeitmittelwerte.

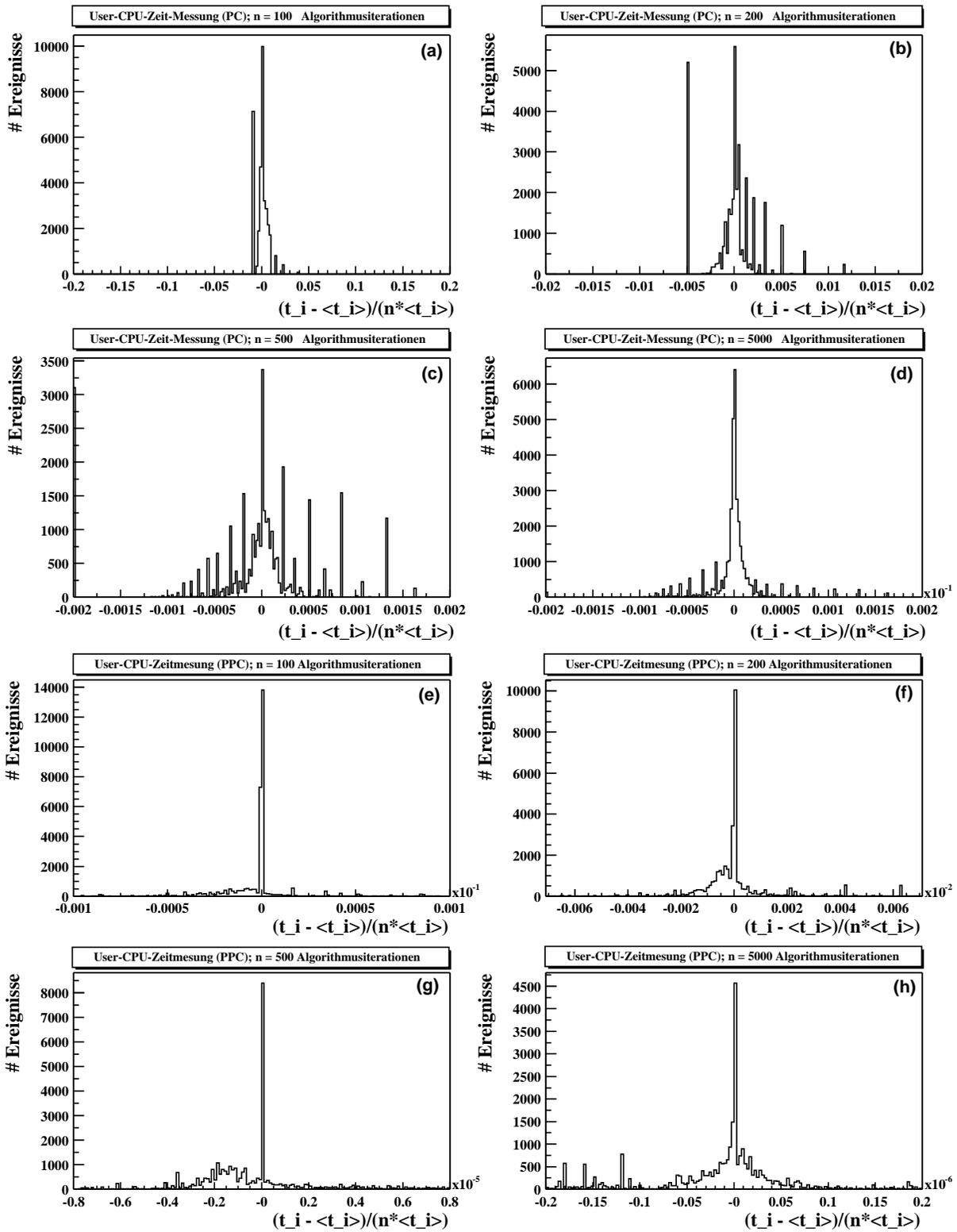


Abbildung 5.11: (a-d): Verteilung der nominellen Zeitdifferenzen $\frac{t_i - \langle t_i \rangle}{n \cdot \langle t_i \rangle}$ für PC-System (e-h): PPC-System. Vergleiche Erläuterungen im Text.

Algorithmusdurchläufe n	Zeitauflösung	Rechenzeit
100	ca. 1 – 3%	2 Minuten
200	ca. < 1%	4 Minuten
500	ca. < 0.01%	ca. 10 Minuten
5000	ca. < 0.001%	ca. 65 Minuten

Tabelle 5.2: *Vergleich: Algorithmusdurchläufe, Zeitauflösung und Rechenzeiten für das PC-System. Vergleiche Erläuterungen im Text und siehe Abbildung 5.11!*

Zeitauflösung zur Rechenzeit entscheidend ist. Man erkennt, dass 500 Algorithmusdurchläufe für den praktischen Betrieb und daher für vernünftige Geschwindigkeitsoptimierung der Laufzeit von FTT-L3-Triggeralgorithmen geeignet sind. Hierbei wird bei den Laufzeitmessung eine Zeitauflösung kleiner als 0,01% erzielt, wobei für eine Laufzeitmessung mit L3Velo bei dieser Anzahl von Algorithmusdurchläufen unter Benutzung des o. g. Datensamples ca. 10 Minuten benötigt.

In Abbildung 5.11(e-h) sind die entsprechenden Laufzeitmessungen für das PPC-System gezeigt. Die hierbei ermittelten Zeitaufösungen sind im Vergleich zu den Ergebnissen des konventionellen PC-Systems erwartungsgemäß höher. Dies resultiert aus der wesentlich höheren Zeitauflösung des PPC-Systems (40 ns, vgl. Kapitel 5.1) gegenüber der des PC-Systems (10 ms).

5.4.2 Laufzeitkorrelation

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob eine Korrelation zwischen den mit der FTT-Simulation L3Velo auf dem PC-System gemessenen Laufzeiten und den Laufzeiten, in denen Triggeralgorithmen auf dem PPC-System zur Selektion von Physikereignissen eingesetzt werden, existiert. Erst hierdurch ist es möglich, die Laufzeiten der auf dem PPC-System verwendeten Triggeralgorithmen mit Hilfe von L3Velo schon im Vorfeld auf dem PC-System zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird der in Kapitel 5.7 beschriebene Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Mesonen als Referenzalgorithmus verwendet und sowohl auf dem PC-System innerhalb L3Velo als auch auf dem PPC-System jeweils 5000 Mal für jedes Ereignis ausgeführt. Die beiden gemessenen Laufzeiten werden in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Wie man anhand Abbildung 5.12 sieht, liegen die gefundenen Messpunkte in guter Näherung auf einer Geraden, deren Steigung gleich dem gesuchten Korrelationsfaktor ist. Nach Durchführung einer linearen Regression ergibt sich für den Umrechnungsfaktor m der Wert:

$$m = 22,12 \pm 0,04. \quad (5.13)$$

Mit Hilfe dieses Umrechnungsfaktors m kann durch Gebrauch der Triggersimulation L3Velo die Laufzeit auf einem konventionellen PC-System im voraus ermittelt werden, die ein Triggeralgorithmus auf dem PPC-System benötigen wird. Das Wissen um diese Laufzeit erlaubt die Entscheidung darüber, ob der zu untersuchende Triggeralgorithmus die Zeitvorgabe von 100 μ s (vgl. Kapitel 3) erfüllt oder in seinem Laufzeitverhalten optimiert werden muss.

5.5 Ausblick

Im folgenden sollen die zukünftigen Aufgaben beschrieben werden, die sich an diese Arbeit anschließen.

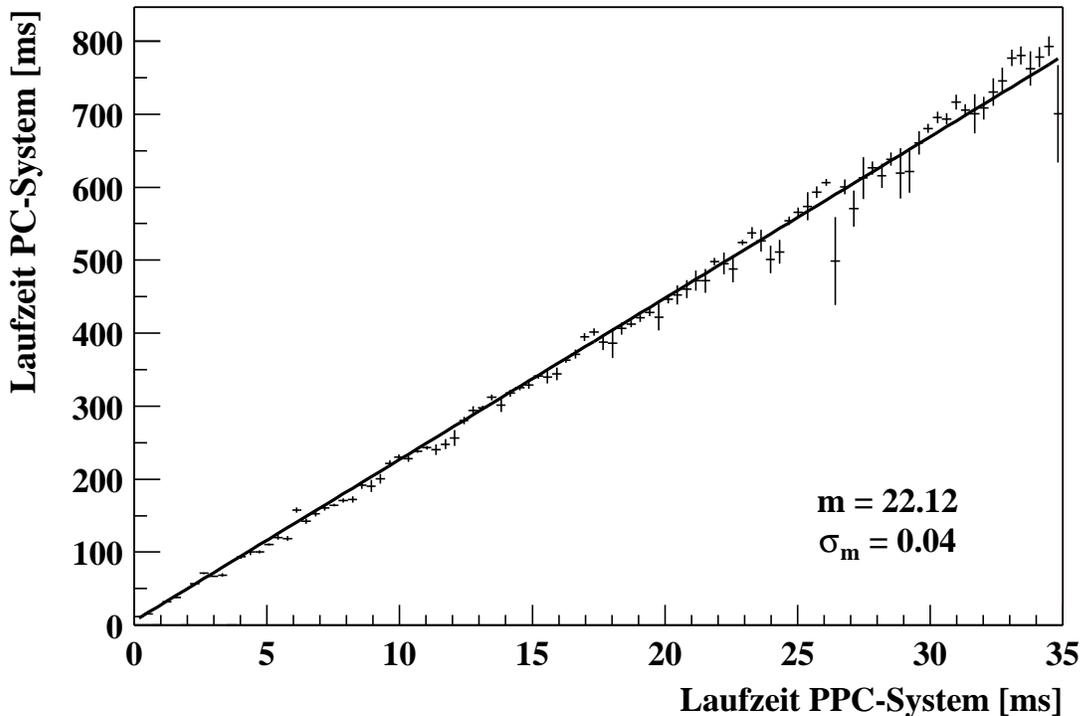


Abbildung 5.12: *Lineare Korrelation zwischen den beiden Laufzeiten, die jeweils auf dem konventionellen PC-System mit Hilfe von L3-Velo und auf dem PPC-System gemessen wurden. Für die Laufzeitmessung auf beiden Computersystemen wurde der Selektionsalgorithmus pro Ereignis 5000 Mal durchlaufen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden ist gleich dem Umrechnungsfaktor zwischen den gemessenen Laufzeiten beider Computersysteme.*

Die im letzten Abschnitt beschriebene Korrelation zwischen den Laufzeiten, die der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Selektionsalgorithmus (siehe Kapitel 5.3) jeweils auf dem Hardware-system der dritten Stufe des FTTs und dem konventionellen PC-System zur Ausführung benötigt, läßt sich mit Hilfe eines weiteren Triggeralgorithmus überprüfen. Hierzu bietet sich beispielsweise der Algorithmus zur Selektion von D^* -Mesonen [48] an, wodurch die Reproduzierbarkeit des Korrelationsfaktor nachgewiesen werden kann.

Eine andere Aufgabe besteht darin, die Ausführung von Triggeralgorithmen unter der L3Velo zu beschleunigen. Dies wird dadurch möglich, wenn die Triggeralgorithmen unter CINT zur Laufzeit der H1-Simulation nicht interpretiert sondern compiliert werden, wozu entsprechende Modifikationen notwendig sind.

Schließlich ist es für den praktischen Gebrauch der Simulation L3Velo erforderlich, dass diese, ausgestattet mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche, in die H1-Simulation eingebunden wird.

Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Simulation insbesondere von Triggeralgorithmen, die auf der dritten Stufe des Fast Track Triggers (FTT) zur spurbasierten Selektion von Elektron-Proton-Streuereignissen eingesetzt werden. Auf einem kommerziellen PC-System implementiert, soll die Simulation auf Triggeralgorithmen zurückgreifen können, die entweder während der Datennahme des H1-Experiments tatsächlich zum Einsatz kommen und in einer speziellen Datenbank abgespeichert sind oder die neu entwickelt wurden. In beiden Fällen soll der betreffende Algorithmus innerhalb der Triggersimulation L3Velo ausführbar sein. Hierzu wird ein spezieller Interpreter verwendet, durch dessen Gebrauch die zu untersuchenden Triggeralgorithmen “online” in die H1-Software integriert werden können, um eine Verwendung innerhalb einer vollständigen Simulation des Fast Track Triggers zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde L3Velo insbesondere für Laufzeittests von FTT-L3-Algorithmen entwickelt. Die Laufzeit, in der die auf der dritten Stufe verwendeten Algorithmen zu einer Triggerentscheidung gelangen, soll unterhalb einer Latenzzeit von $100\ \mu\text{s}$ sein. Mit Hilfe der Triggersimulation, L3Velo, soll das Laufzeitverhalten eines zu untersuchenden Triggeralgorithmus möglichst genau bestimmt werden, um im Vorfeld entscheiden zu können, ob der betreffende Algorithmus optimiert werden muss.

Zur Kalibration wurde ein Triggeralgorithmus zur Selektion von J/Ψ -Vektormesonen verwendet. Er dient als Referenzalgorithmus, um die Korrelation zwischen Laufzeiten auf dem PC-System, das zur Simulation verwendet wird, und der eigentlichen L3-Hardware (PPC-Boards) zu bestimmen. Verschiedene Methoden zur Bestimmung des Laufzeitverhaltens wurden ausgetestet und miteinander verglichen.

Außerdem konnte eine eindeutige Korrelation zwischen den Zeitmessungen im Rahmen der L3-Velo-Simulation und den realen Laufzeiten der in die L3-Hardware implementierten Algorithmen bestimmt werden. Der ermittelte Umrechnungsfaktor zwischen den Laufzeiten beider Systeme beträgt $22,12 \pm 0,04$. Damit steht mit der Entwicklung von L3Velo ein Programm für die Geschwindigkeitsoptimierung von zukünftigen L3-Algorithmen zur Verfügung. Die Untersuchungen zeigen, dass die Zeitaufösung der Simulation L3Velo für zukünftige Laufzeitoptimierungen ausreichend ist.

Abkürzungsverzeichnis

BOS *Bank Object System*

Bei dem H1-Experiment verwendetes Datenformat. BOS erlaubt es, auch bei einer Programmierung mit *FORTRAN77* dynamische Datenstrukturen zu verwenden. Die Daten sind dabei in sogenannten Banken angeordnet.

BPC *Backward Proportional Chamber*

Proportionalkammer im rückwärtigen Bereich des H1-Detektors.

BST *Backward Silicon Tracker*

Silizium-Spurdetektor im rückwärtigen Bereich des H1-Detektors.

CAM *Content Addressable Memory*

Speicher, der die zu einem RAM inverse Funktionalität zeigt. Der Eingabewert wird als Datum interpretiert und die Adresse, an der dieser Wert gespeichert ist, ausgegeben.

CDAQ *Central Data Acquisition*

Am H1-Experiment verwendete Bezeichnung des zentralen Datenaufzeichnungssystem.

CIP *Central Inner Proportional Chamber*

Proportionalkammer im Zentralbereich des H1-Detektors nahe am Strahlrohr. Für die HERA-II-Datennahmeperiode ist hier die fünfplagige CIP2000 eingebaut.

CJC *Central Jet Chamber*

Zwei Drahtkammern (CJC1, CJC2) im Zentralbereich des H1-Detektors.

COP *Central Outer Proportional Chamber*

Proportionalkammer im Zentralbereich des H1-Detektors zwischen den beiden CJs.

COZ *Central Outer Z Chamber*

Für die Auflösung der z -Koordinate optimierte Drahtkammer im Zentralbereich des H1-Detektors.

cPCI *Compact PCI*

Aus dem in Arbeitsplatzrechnern gebräuchlichen PCI-Bus abgeleiteter Rückwandplatinenbus.

CPU *Central Processing Unit*

Kernstück eines Rechners, an dem Programme abgearbeitet werden.

CST *Central Silicon Tracker*

Silizium-Spurdetektor im Zentralbereich des H1-Detektors direkt am Strahlrohr.

CTL *Central Trigger Logic*

Zentrale Steuerung und Taktgeber des H1-Datennahmesystems.

DCA *Distance of Closest Approach*

Minimaler Abstand zwischen einer Teilchenspur und dem Ereignisursprung.

DCr ϕ *Drift Chamber r ϕ*

Auf CJC-Informationen basierendes Triggersystem, das Spuren in der r - ϕ -Ebene identifiziert.

DESY *Deutsches Elektronen-Synchrotron*

Forschungsinstitut der Helmholtz-Gesellschaft in Hamburg. Keimzelle war der dort angesiedelte Elektronensynchrotronring.

DGLAP *Dokshitzer, Gribov, Lipatov, Altarelli, Parisi*

Theoretische Physiker, die gekoppelte Evolutionsgleichungen zur Beschreibung der Protonstruktur im Rahmen der QCD entwickelt haben, die sogenannten DGLAP-Gleichungen.

DIS *Deep Inelastic Scattering*

Bezeichnet bei HERA tiefinelastische Lepton-Proton-Streuung mit einem Viererimpulsübertrag von $Q^2 \geq 1 \text{ GeV}^2$.

DSP *Digital Signal Processor*

Spezieller Prozessortyp, der für die schnelle Bearbeitung algebraischer Algorithmen optimiert ist.

DST *Data Summary Tape*

Zusammenfassung von Daten, welche die für die Analyse wichtigsten Detektorinformationen und Variablen, die durch die Rekonstruktion berechnet wurden, enthalten.

FADC *Flash Analog Digital Converter*

Schneller elektronischer Baustein, der Amplituden analoger Signale misst und in digitaler Form ausgibt. Die Zahl der Bits auf der Ausgangsseite ist dabei ein Maß für das Auflösungsvermögen des FADCs.

FEM *Front End Modul*

Bezeichnung für eine Elektronikarte, die bei der ersten Stufe des FTT zum Einsatz kommt. Durch ein FEM werden Spurkammersignale digitalisiert und Spursegmente in den CJs gesucht.

FPDP *Front Panel Data Port*

Bussystem zur parallelen Datenübertragung zwischen Karten in einem gemeinsamen Rückwandsystem. Ein fester Sender kann dabei mehrere Empfänger gleichzeitig mit den identischen Daten speisen.

FPGA *Field Programmable Gate Array*

Elektronikbaustein mit reprogrammierbaren Logikzellen, der in speziellen Programmiersprachen geschriebene Algorithmen mit hoher Geschwindigkeit ausführen kann.

FST *Forward Silicon Tracker*

Silizium-Spurdetektor im vorwärtigen Bereich des H1-Detektors.

FTD *Forward Tracking Detector*

Zusammenfassende Bezeichnung für Spurkammern in vorwärtigen Bereich des H1-Detektors.

FTT *Fast Track Trigger*

Schneller Spurtrigger des H1-Experiments.

HERA *Hadron-Elektron-Ringanlage*

Elektron-Proton-Speicherring am DESY. Durch Umbau des ursprünglichen Rings kann die Luminosität bei HERA-II etwa verfünffacht werden.

L1KEEP

Durch die CTL generierte Entscheidung, ein Ereignis über die erste Triggerstufe hinaus zu bearbeiten.

L2KEEP

Durch die CTL generierte Entscheidung, ein Ereignis über die zweite Triggerstufe hinaus zu bearbeiten.

L2REJECT

Durch die CTL generierte Entscheidung, ein Ereignis auf der zweiten Triggerstufe zu verwerfen.

L3KEEP

Durch die CTL generierte Entscheidung, ein Ereignis über die dritte Triggerstufe hinaus zu bearbeiten.

L3REJECT

Durch die CTL generierte Entscheidung, ein Ereignis auf der dritten Triggerstufe zu verwerfen.

LVDS *Low Voltage Differential Signal*

Differentieller Signalstandard.

MPB *Multi Purpose Board*

Von SCS entwickelte Elektronikarte, die in verschiedenen Bestückungs- und Programmiervarianten in der zweiten Stufe des FTTs zum Einsatz kommt. Sie bietet Steckplätze für maximal vier SCS-Aufsteckkarten, drei FPGAs und vier DSPs.

MVME *Motorola VME*

Prozessorkartenserie von Motorola, die eine Schnittstelle zu einer VME-Rückwandplatine haben.

NFS *Network File System*

Protokoll zum Bearbeiten von Dateien auf nicht-lokalen Festplatten über das Netzwerk. Hierbei muss nicht zwangsläufig die Datei vollständig übertragen werden.

PCI *Peripheral Component Interconnect*

Für Arbeitsplatzrechner entwickeltes Bus-System zur Anbindung von Peripheriegeräten an den Prozessor.

PIO *Parallel Input Output*

Zwei Signalleitungen des FPDP-Busses, deren Bedeutung und Übertragungsrichtung frei konfigurierbar sind. Die DPIO-Karten sind so aufgebaut, dass diese Signale PCI-Interrupts auslösen können.

PMC *PCI Mezzanine Card*

Standardisierter Formfaktor für PCI-Aufsteckkarten.

PowerPC *Performance Optimized With Enhanced RISC microprocessor architecture for Personal Computers*

Prozessorarchitektur von IBM/Motorola/Apple.

PPC *PowerPC*

Prozessorarchitektur von IBM/Motorola/Apple.

PQZP *Parallel Quickbus Zero-Suppression Processor*

Bussystem zur Übertragung von 16 Bits breiten Datenworten, der im H1-Experiment für den L2L3-Bus verwendet wird.

QCD *Quantenchromodynamik*

Eichtheorie zur Beschreibung der durch Gluonen zwischen Quarks übertragenen starken Wechselwirkung.

RAM *Random Access Memory*

Speicher, dessen Inhalt byteweise adressiert, beschrieben und ausgelesen werden kann.

RISC *Reduced Instruction Set Computer*

Bezeichnung für Prozessoren, die alle Befehle durch einen reduzierten Satz kurzer Instruktionen realisieren können.

R/O *Read Out*

Bei H1 gebräuchliche Bezeichnung für das Datenauslesesystem.

ROM *Read Only Memory*

Generell Speicher, der nur ausgelesen, nicht aber beschrieben werden kann. Spezielle ROM-Bauarten sehen allerdings ein komplettes oder blockweises Beschreiben vor.

SLAC *Stanford Linear Accelerator*

Linearbeschleuniger für Elektronen und Positronen am gleichnamigen Forschungsinstitut in Kalifornien.

ST *Subtrigger*

Logische Verknüpfung von TEs, die für jede Triggerstufe bestimmt werden und zur finalen Triggerentscheidung der jeweiligen Stufe herangezogen werden.

STC *Subsystem Trigger Controller*

Schnittstelle zwischen H1-Subsystemen und der CTL.

TE *Trigger Element*

Bitweise Informationen, in denen von den Triggersystemen bestimmte Ereignischarakteristika kodiert an die CTL gesendet werden.

TTL *Transistor Transistor Logic*

Digitale Logikstandard, bei dem eine logische 0 durch ein Potential von 0 V, eine logische 1 durch ein Potential von 5 V dargestellt wird.

TOF *Time of Flight*

Aus Szintillatoren aufgebautes Detektorsystem, das Flugzeiten von Teilchen entlang des Strahlrohrs oder vom Wechselwirkungspunkt aus misst. Dies stellt ein effektives System zur Untergrundunterdrückung dar.

VME *VERSAmodule Eurocard*

Standardisiertes Bussystem für Rückwandplatinen.

Literaturverzeichnis

- [1] PARTICLE DATA GROUP, K. HAGIWARA et al.,
Review Of Particle Physics, Phys. Rev. D **66** (2002) 010001.
- [2] J. D. BJORKEN AND E. A. PASCHOS,
Inelastic Electron Proton And Gamma Proton Scattering, And The Structure Of The Nucleon, Phys. Rev. **185** (1969) 1975.
- [3] M. GELL-MANN,
A Schematic Model Of Baryons And Mesons, Phys. Lett. **8** (1964) 214.
- [4] C. G. CALLAN AND D. J. GROSS,
High-Energy Electroproduction And The Constitution Of The Electric Current, Phys. Rev. Lett. **22** (1969) 156.
- [5] E. D. BLOOM et al.,
High-Energy Inelastic e P Scattering At 6-Degrees And 10-Degrees, Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 930.
- [6] H. W. KENDALL,
Deep inelastic scattering: Experiments on the proton and the observation, Rev. Mod. Phys. **63** (1991) 597.
- [7] D. J. GROSS AND F. WILCZEK,
Asymptotically Free Gauge Theories. I, Phys. Rev. D **8** (1973) 3633.
- [8] D. J. GROSS AND F. WILCZEK,
Ultraviolet Behavior Of Non-Abelian Gauge Theories, Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1343.
- [9] D. J. GROSS AND F. WILCZEK,
Asymptotically Free Gauge Theories. II, Phys. Rev. D **9** (1974) 980.
- [10] H1 COLLABORATION, C. ADLOFF et al.,
Deep-inelastic inclusive e p scattering at low x and a determination of $\alpha(s)$, Eur. Phys. J. C **21** (2001) 33 [arXiv:hep-ex/0012053].
- [11] H1 COLLABORATION, C. ADLOFF et al.,
Measurement of neutral and charged current cross sections in electron proton collisions at high Q^2 , Eur. Phys. J. C **19** (2001) 269 [arXiv:hep-ex/0012052].
- [12] H1 COLLABORATION, C. ADLOFF et al.,
Measurement of neutral and charged current cross-sections in positron proton collisions at large momentum transfer, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 609 [arXiv:hep-ex/9908059].

- [13] ZEUS COLLABORATION, J. BREITWEG et al.,
W production and the search for events with an isolated high-energy lepton and missing transverse momentum at HERA, Phys. Lett. B **471** (2000) 411 [arXiv:hep-ex/9907023].
- [14] ZEUS COLLABORATION, S. CHEKANOV et al.,
Measurement of the neutral current cross section and F2 structure function for deep inelastic e+ p scattering at HERA, Eur. Phys. J. C **21** (2001) 443 [arXiv:hep-ex/0105090].
- [15] BCDMS COLLABORATION, A. C. BENVENUTI et al.,
A High Statistics Measurement Of The Proton Structure Functions F(2) (X, Q²) And R From Deep Inelastic Muon Scattering At High Q², Phys. Lett. B **223** (1989) 485.
- [16] E665 COLLABORATION, M. R. ADAMS et al.,
Proton and deuteron structure functions in muon scattering at 470-GeV, Phys. Rev. D **54** (1996) 3006.
- [17] NEW MUON COLLABORATION (NMC), M. ARNEODO et al.,
Measurement of the proton and deuteron structure functions, F2(p) and F2(d), and of the ratio sigma(L)/sigma(T), Nucl. Phys. B **483** (1997) 3 [arXiv:hep-ph/9610231].
- [18] H1 COLLABORATION, C. ADLOFF et al.,
Elastic Photoproduction of J/Psi and Upsilon Mesons at HERA, Phys. Lett. B **483** (2000), 23.
- [19] H1 COLLABORATION, C. ADLOFF et al.,
Measurement of internal jet structure in dijet production in deep-inelastic scattering at HERA, Nucl. Phys. B **545** (1999) 3
- [20] G. HOFFSTAETTER,
Vortrag im HERA-Status Seminar, Zeuthen, Jan. 2002.
- [21] H1-COLLABORATION, I. ABT et al.,
The H1 Detector At Hera, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 310.
- [22] H1-COLLABORATION, I. ABT et al.,
The Tracking, calorimeter and muon detectors of the H1 experiment at HERA, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 348.
- [23] D. PITZL et al.,
The H1 silicon vertex detector, Nucl. Instrum. Meth. A **454** (2000) 334 [arXiv:hep-ex/0002044].
- [24] W. EICK et al.,
Development of the H1 Backward Silicon Strip Detector, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 81.
- [25] H. HENSCHEL AND R. LAHMANN,
The Backward Silicon Tracker of the H1 Experiment at Hera, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 93.
- [26] W. BRAUNSCHWEIG et al.,
A Forward Silicon Tracker for H1, DESY-PRC-99/01, H1-02/99-563 (H1 interner Bericht)

- [27] H1 COLLABORATION,
Proposal for an Upgrade of the H1 Forward Track Detector for HERA 2000, DESY PRC-98/06.
- [28] H1 CALORIMETER GROUP, B. ANDRIEU et al.,
The H1 liquid argon calorimeter system, Nucl. Instrum. Meth. A **336** (1993) 460.
- [29] H1 SPACAL GROUP, R.-D. APPUHN et al.,
The H1 Lead/Scintillating-Fibre Calorimeter, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997), 397.
- [30] H1 SPACAL GROUP, T. NICHOLLS et al.,
Performance of an Lead/Scintillating-Fibre Calorimeter for the H1 Detector, Nucl. Instrum. Meth. A **374** (1996), 149.
- [31] P. BIDDULPH et al.,
The H1 forward muon spectrometer, Nucl. Instrum. Meth. A **340** (1994) 304.
- [32] CH. WISSING,
Bestimmung der Charakteristika des Flugzeitsystems des H1-Detektors zur Messung des Strahluntergrundes, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1998).
- [33] CH. WISSING, A. BEGLARIAN, P. BIDDULPH, M. FLEISCHER,
The H1 ToF system in 1996 and 1997,
H1-01/98-533 (H1 interner Bericht).
- [34] M. CUJE et al.,
H1 High Luminosity Upgrade 2000 — CIP and Level 1 Vertex Trigger (1998),
H1-01/98-535 (H1 interner Bericht).
- [35] K. MÜLLER et al.,
Construction And Performance Of A Thin Cylindrical Multiwire Proportional Chamber With Cathode Pad Readout For The H1 Experiment, Nucl. Instrum. Meth. A **312** (1992) 457.
- [36] F. SAULI,
CERN 77-03 sowie *Principles of MWPC and Drift Chambers*, in T. FERBEL, *Experimental Techniques in High Energy Physics*.
- [37] S. EICHENBERGER et al.,
A Fast Pipelined Trigger For The H1 Experiment Based On Multiwire Proportional Chamber Signals, Nucl. Instrum. Meth. A **323** (1992) 532.
- [38] J. BECKER,
The Data Acquisition and Control System for a Fast Trigger at H1, Diplomarbeit, Universität Heidelberg (2000).
- [39] M. URBAN,
Ein schneller Trigger für H1 bei HERA, Diplomarbeit, Universität Heidelberg (2000).
- [40] E. ELSSEN,
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.

- [41] H1-BACKGROUND WORKING GROUP,
Further Report on the Beam-Induced Backgrounds in the H1-Detector,
H1-01/03-607 (H1 interner Bericht)
- [42] H. C. SCHULTZ-COULON, D. WEGENER, Skriptum zur Vorlesung
Teilchendetektoren, Kap. 12, <http://www.physik.uni-dortmund.de/e5/skript/detektoren/index.html> .
- [43] J. H. KÖHNE, D. DECKERT, D. SCHMIDT,
Simulation of the PQZP System for the L2 Triggers, H1-0297-514 (H1 interner Bericht).
- [44] J. C. BIZOT et al.,
Strategy Studies for the H1 Topological L2-Trigger (L2TT), H1-01/97-508 (H1 interner Bericht).
- [45] J. H. KÖHNE et al.,
Realization Of A Second Level Neural Network Trigger For The H1 Experiment At Hera,
Nucl. Instrum. Meth. A **389** (1997) 128.
- [46] T. KRÄMERKÄMPER,
Messung der Gluondichte im Photon und Entwicklung eines neuronalen Triggers, Dissertation,
Universität Dortmund (1998).
- [47] T. NICHOLLS et al.,
Concept, Design and Performance of the Second Level Triggers of the H1 Detector, IEEE
Trans. Nucl. Sci. **45** (1998), 810.
- [48] J. NAUMANN, *Entwicklung und Test der dritten H1-Triggerstufe*, Dissertation, Universität
Dortmund (2003)
- [49] A. J. CAMPBELL et al.,
*A RISC multiprocessor event Trigger for the data acquisition system of the H1 experiment
at HERA*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **39** (1992) 255.
- [50] H1 COLLABORATION,
Proposal to Merge Level-4 and Level-5 System of the H1-Experiment, DESY-PRC-99/03.
- [51] 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).
- [52] 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).
- [53] D. P. C. SANKEY,
Proposed QT Algorithm for Fast Track Trigger, Projektdokument, 1998 (H1 intern).
- [54] C. WISSING,
*Entwicklung eines Simulationsprogramms und Implementierung schneller Spurfitalgorithmen
für den neuen H1-Driftkammertrigger*, Dissertation, Universität Dortmund (2003).
- [55] ALTERA COPORATION,
Implementing High-Speed Search Applications with Altera CAM.

- [56] 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].
- [57] SUPER COMPUTING SYSTEMS,
H1 Second Level Fast Track Trigger – Design Description,
<http://www.scs.ch/ftt>
- [58] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, VMEBUS INTERNATIONAL TRADE ASSOCIATION,
Industry Pack Modules, ANSI/VITA 4-1995.
- [59] V. KARIMÄKI,
Effective Circle Fitting for Particle Trajectories, Nucl. Inst. Meth. A **305** (1991) 187.
- [60] N. E. BERGER,
Development of a z-vertex trigger based on drift chamber signals at H1, Diplomarbeit, ETH Zürich, Juni (2002) (ETHZ-IPP Internal Report 2002-04).
- [61] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, VMEBUS INTERNATIONAL TRADE ASSOCIATION,
Front Panel Data Port Specifications, ANSI/VITA 17-1998.
- [62] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.,
Versatile Backplane Bus: VMEbus, ANSI/IEEE Standard 1014-1987.
- [63] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.,
IEEE - Common Mezzanine Card Specification (CMC), P1386.1 Draft 2.0. (1995).
- [64] VITA STANDARDS ORGANIZATION,
Processor PMC Standards for Processor PCI Mezzanine Cards, VITA 32-199x, Draft 0.21 (1999).
- [65] MOTOROLA COMPUTER GROUP,
Datenblatt zum MVME2400,
<http://mcg.motorola.com/> .
- [66] WIND RIVER SYSTEMS, INC.,
Tornado User's Guide (Windows Version), 2.0, Edition I (1999)
<http://www.windriver.com>.
- [67] V. BLOBEL,
The BOS System, Fourth updated printing,
<http://www-h1.desy.de/icas/imanuals/> (H1 intern).
- [68] H1 MANUAL HOMEPAGE,
H1NDB Manual,
http://www-h1.desy.de/icas/imanuals/ndb_man.html (H1 intern).
- [69] J. MEYER et al.,
Guide to Simulation Program H1SIM, Hamburg (1991).

- [70] MASAHARU GOTO,
CINT Manual,
<http://root.cern.ch/root/Cint.html>
- [71] HRZ,
Tutorial: Programoptimierung,
Universität Marburg (1998),
<http://www.uni-marburg.de/hrz/sp/tutorial/tuning/tuning.html>
- [72] C. SPÄH,
Entwurf von HW/SW-Systeme, Proseminar, Universität Hamburg, Sommersemester (2002),
<http://tech-www.informatik.uni-hamburg.de/lehre/ss2002/hwsw-entwurf/vortraege/07-performance/referat>
- [73] CEI, Lehrstuhl Datenverarbeitungssysteme, Universität Dortmund,
<http://www-ds.e-technik.uni-dortmund.de/WEB-D/Forschung/schedule.shtml>
- [74] MOTOROLA INC. COMPUTER GROUP,
PPC Bug Firmware Package, User's Manual Part 1 & 2, PPCBUGA1/UM5 und PPCBUGA2/UM5, Edition 2001.
- [75] A. SCHÖNING,
ETH Zürich,
persönliche Mitteilungen
- [76] O. BEHRENDT,
Entwicklung von Algorithmen zur Identifikation von Vektormesononen-Ereignissen mit dem neuen H1-Spurtrigger, Diplomarbeit, Universität Dortmund (2002).
- [77] K. KRÜGER,
Photoproduction of J/Ψ Mesons at Medium and Low Elasticities at HERA, Dissertation, Universität Hamburg (2001).
- [78] S. MOHRDIECK,
Inelastische J/Ψ -Erzeugung in Elektroproduktion am H1-Experiment bei HERA, Dissertation, Universität Hamburg (2000).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all diejenigen bedanken, die durch ihre Unterstützung maßgeblich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zu allererst gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. D. Wegener für die interessante Aufgabenstellung der Arbeit. Er hat es mir ermöglicht, in einer großen internationalen Kollaboration am DESY zu arbeiten. Nur seinem häufigen Nachfragen nach dem Stand der Arbeit und seiner verständnisvollen Art ist es zu verdanken, dass sie zu einem glücklichen Ende gefunden hat.

Bei Herrn Prof. Dr. T. Weis bedanke ich mich für seine spontane Bereitschaft, das Amt des Zweitgutachters zu übernehmen.

Herrn Dr. H.-C. Schultz-Coulon möchte ich ganz besonders für die sorgfältige und kritische Korrektur des Manuskripts danken, wodurch die Arbeit an wertvollen Gedanken gewonnen hat. Insbesondere danke ich ihm dafür, dass er mir in seiner unverwechselhaften Art während der Phase des Zusammenschreibens den einen oder anderen nötigen Motivationsschub zukommen ließ.

Zu großem Dank für seine vorbildliche Betreuung bin ich Herrn O. Behrendt verpflichtet. Seine Geduld, sich meinen bohrenden Fragen zu stellen und mir mit Rat und Tat bei Problemen mit den Softwarepaketen ROOT und CINT zu helfen, haben einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geliefert. Bei ihm und den Herren Dr. Ch. Wissing und M.-O. Bönig muss sich der Leser wohl am meisten bedanken. Nur durch ihre intensive und sorgfältige Art des Korrekturlesens sowie die anschließenden konstruktiven Besprechungen der einzelnen Kapitel ist es mir gelungen, meine Gedanken und Überlegungen so zu ordnen, damit sie in der vorliegenden Arbeit mit der nötigen Struktur wiedergegeben werden.

Herrn Dr. J. Naumann danke ich für die vielen Antworten und Hilfestellungen zum Thema Power-PC. Von seinem Fachwissen konnte ich mehrfach profitieren. So mancher Fehler in meinem Programmcode wäre ohne seine Hilfe unentdeckt geblieben.

Die Mitglieder des Lehrstuhls Experimentelle Physik V zeigten sich jederzeit hilfsbereit und haben zur Freude an der Arbeit maßgeblich beigetragen. Neben den genannten Personen möchte ich an dieser Stelle Frau A. Vargas, Herrn Dr. R. Stamen, Herrn Dr. V. Lendermann und Herrn Dr. K. Wacker erwähnen. Die freundschaftliche Atmosphäre, der starke Zusammenhalt in der Gruppe und die gute Stimmung zeichnen den Lehrstuhl EV und seine Mitarbeiter aus.

Bei der Fast Track Trigger Gruppe bedanke ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und den nahezu wöchentlichen Erfahrungsaustausch zum FTT. Hierbei seien insbesondere Herr Dr. A. Schöning, Herr N. Berger, Herrn S. Baumgartner und Herrn R. Baldinger erwähnt.

Frau E. Lorenz danke ich für den reibungslosen Ablauf bei der Bearbeitung von Formularen und Anträgen jeglicher Art.

Bedanken möchte ich ebenso bei den Mitgliedern der TG 66. Die gemeinsamen Abende im Vogel bei Dart und kullinarischem Allerlei sorgten für die nötige Zerstreuung abseits der Physik. Hierbei seien insbesondere die Herren M. Symalla und Ch. van Eldik erwähnt.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Mutter, die mich während meines gesamten Studiums in jeder erdenklichen Hinsicht unterstützt und mir dadurch den Weg bis hierher ermöglicht hat. In den schwierigen Situationen des letzten Jahres hat sie maßgeblich dafür gesorgt, dass ich nicht den Boden unter den Füßen verloren habe. Für all das bin ich ihr zutiefst dankbar.

Schließlich möchte ich mich noch bei meiner Freundin Jana bedanken. Sie war mir insbesondere in der Phase des Zusammenschreibens in vielerlei Hinsicht eine wertvolle Hilfe.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Projektnummer 05 H1 1PEA/6 gefördert.