

Inbetriebnahme der
dritten Stufe des schnellen Spurtriggers
für das H1-Experiment

Diplomarbeit am
Lehrstuhl für Experimentelle Physik V
der Universität Dortmund

vorgelegt von
Andreas W. Jung

September 2004

pdf-Version: ~anjung/public/diplom.pdf

Zusammenfassung

Der Umbau des HERA-Speicherringes führte zu einer gesteigerten Datenrate. Die Daten der Ereignisse müssen vom H1-Experiment weiterhin effizient verarbeitet werden können. Für diesen Zweck wurde von der H1-Kollaboration ein schneller Spurtrigger (FTT) für das H1-Experiment entwickelt.

Der FTT ist in der Lage, Teilchenspuren präzise zu rekonstruieren und anhand der rekonstruierten Spurparameter Triggerentscheidungen zu treffen. Dafür ist der FTT als mehrstufiges Triggersystem innerhalb des H1-Triggersystems ausgelegt. Der FTT bestimmt auf der ersten Triggerstufe (L1) aus den Signalen ausgewählter Drahtlagen der zentralen Spurkammern Treffer und berechnet aus diesen auf der zweiten Triggerstufe (L2) präzise dreidimensionale Spuren. Diese werden an die dritte Triggerstufe (L3) des FTT gesendet. Dort werden aus den L2-Spurdaten invariante Massen der Spuren berechnet und basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Selektionen eine L3-Triggerentscheidung gefällt. Damit ist der FTT ein geeignetes Instrument, um Signaturen exklusiver Endzustände auf frühen Triggerstufen effizient zu selektieren und die Rate weiter zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Serienmodell der Empfängerkarte der dritten Triggerstufe getestet und in das System integriert. Weiterhin wurde die Echtzeit-Kontrolle der Auslese des FTT über eine graphische Benutzeroberfläche durch spezielle Programme ermöglicht. Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit verschiedenen Datensätzen ausgeführt, welche die Betriebsfähigkeit des L3-Systems zeigen. Nach Abschluss dieser Arbeit kann mit der Integration der dritten Triggerstufe in das H1-Triggersystem begonnen werden.

Abstract

The upgrade of the HERA storage ring led to an increased data rate. The event data has to be handled efficiently by the H1 Experiment. For this purpose a Fast Track Trigger (FTT) was developed by the H1 Collaboration.

The FTT is able to reconstruct charged particle tracks and its parameters to calculate trigger decisions within several trigger levels based on these quantities. On the first level (L1) the signals of special wire layers within the central drift chambers are used to perform the hit finding. Based on the hits a track segment linking is performed. The second level (L2) of the FTT is able to reconstruct precise three dimensional track parameters starting with a refined track segment search. These track parameters are send to the third level (L3) of the FTT where invariant masses are calculated and a search for particle resonances starts. With the L3 decision it is possible to reach the requested rate reduction.

The scope of this diploma thesis was the L3 system. The work contains the integration and testing of the new receiver card for the L3 system. This L3 system was tested with a variety of data samples to show the functionality of the L3 system. All of these tests show the expected results. Furthermore the real time readout control of the graphical user interface was developed with special programs. With the end of this diploma thesis the work for integrating the L3 systems into the H1 online trigger system can start.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung der Arbeit	3
2. Die kinematischen Variablen der $e^{\pm}p$-Streuung	5
2.1. Die Produktion von J/ψ -Vektormesonen	7
3. Der HERA-Speicherring und das H1-Experiment am DESY	10
3.1. Der H1-Detektor	12
3.1.1. Das zentrale Spurkammersystem	15
3.2. Das H1-Triggersystem	17
4. Der schnelle Spurtrigger	19
4.1. Konzept und technische Realisierung	19
4.2. Erste Triggerstufe des FTT	21
4.3. Zweite Triggerstufe des FTT	23
4.4. Simulation	27
5. Die dritte Triggerstufe des schnellen Spurtriggers	30
5.1. Die technische Realisierung	31
5.2. Die L3-Empfängerkarte	35
5.3. Software des L3-Systems	38
6. Systemverhalten des L3-Systems	42
6.1. Verarbeitung eingehender Daten in L3	42
6.1.1. Interner L3-Systemtest	44
6.2. Datentransfer von L2 nach L3	46
6.3. Datenaufbereitung in L3	50
6.4. Leistungsverhalten des L3 Systems	52
6.4.1. Untersuchung vorselektierter J/ψ -Ereignisse	56
6.4.2. Das L3-Zeitverhalten	60
7. Zusammenfassung	64
A. Die graphische Benutzeroberfläche	66
A.1. Auslesekontrolle	67
A.2. L2-L3 Datentransfertest mit dem GUI	71
B. Bitmuster und Befehlssätze	73
Abkürzungsverzeichnis	75
Literaturverzeichnis	80

Danksagung

85

1. Einleitung

Die Frage nach der Beschaffenheit der uns umgebenden Welt beschäftigte schon die alten Griechen und ist unter anderem in Form des Höhlengleichnisses von Platon [1] bis heute konserviert. Um ein tieferes Verständnis der Realität zu erlangen, wurden im Laufe der Zeit komplizierte philosophische Modelle geschaffen. Eine Möglichkeit die tieferliegenden Strukturen unserer Erfahrung der Welt zu ergründen, basiert auf der logischen Analyse der Sprache. Die Sprache ist das Ebenbild der Erfahrung der uns umgebenden Welt und Sinnbild der geistigen Realität: „Die Gesamtheit der wahren Gedanken sind ein Bild der Welt“¹. Das Ergebnis dieser Analyse ist die Erkenntnis, dass einfache atomare Tatsachen auf einfache elementare (atomare) Sätze abgebildet werden.

So dachte sich noch der junge Wittgenstein im *Tractatus logico-philosophicus* [2] den Zusammenhang zwischen Wirklichkeit und Sprache. Dieser von Wittgenstein mitbegründete logische Atomismus wirkte maßgeblich auf die Entwicklung des logischen Positivismus ein, welcher alle Terme einer präzisen Wissenschaftssprache letztendlich auf das Erfassen von Sinnesdaten zurückführt.

Dieses Erfassen ist durch den technologischen Fortschritt und die damit zur Verfügung stehenden Hilfsmittel wesentlich präziser aber auch aufwendiger geworden. Das Erfassen – Messen – von Phänomenen und deren Interpretation ist Aufgabe der experimentellen Teilchenphysik geworden und hat die Wissenschaftler vor neue Herausforderungen gestellt. Auf der Suche nach den elementaren Bausteinen der Materie werden immer größere Versuchsaufbauten (Detektoren) erstellt, um die wirklich elementaren Bausteine aufzuspüren. Die mit hochenergetischen Teilchen durchgeführten Streuexperimente haben zum Verständnis des Aufbaus der Materie einen großen Anteil geleistet.

Bereits in den fünfziger Jahren hat Hofstadter [3] bei Elektron-Proton-Streuexperimenten (*ep*-Streuung) Abweichungen von der elastischen Streurate entdeckt. Der Begriff elastisch bedeutet in diesem Fall die Streuung an strukturlosen Objekten, so dass diese Messung nur den Schluß zuließ, dass das Proton nicht punktförmig ist. In den späten sechziger Jahren wurde am SLAC² ein 20 GeV *e*-Beschleuniger errichtet. Dort durchgeführte Streuexperimente brachen erstmals die Protonstruktur auf. Der zugrunde liegende Prozess wurde und wird als tiefinelastische Streuung am Proton bezeichnet. Überraschenderweise folgte die gemessene Streurate der Vorhersage von Rutherford für die Streuung an punktförmigen Teilchen [4, 5]. Mit weiterer Erhöhung der Energie der Elektronen ergab die Analyse der Messungen, dass das Proton aus punktförmigen Konstituenten besteht [6]. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Partonmodell, nach dem das Proton aus punktförmigen freien Partonen aufgebaut ist, entwickelt [7].

Erst dann wurde erkannt, dass die Partonen identisch mit den Quarks waren. Diese hatte Gell-Man mittels gruppentheoretischer Annahmen bereits 1964 eingeführt, um den Aufbau der Materie aus wenigen elementaren Teilchen zu erklären [8].

Basierend auf dem nun verfügbaren Quark-Partonmodell und den experimentellen Ergebnissen konnten weitergehende Theorien entwickelt werden, die eine theoretische Vorher-

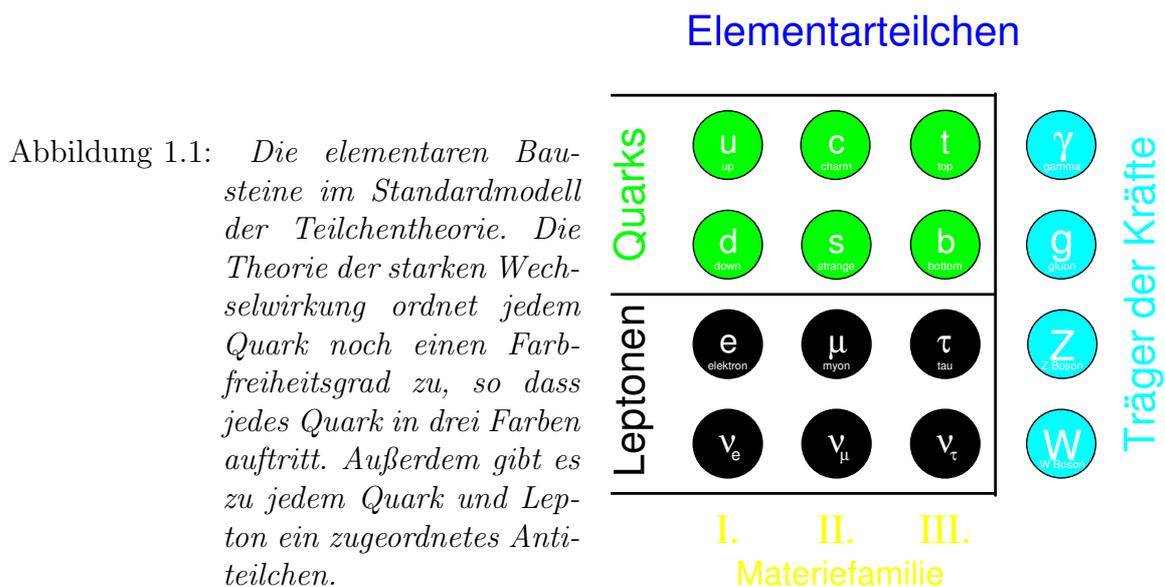
¹Wittgenstein *Tractatus logico-philosophicus* (TLP) Satz 3.01, siehe [2].

²Stanford Linear Accelerator Center, Kalifornien (USA)

sage für ein neues, bisher nicht beobachtetes, Quark enthielten, das *charm*-Quark. Die experimentelle Entdeckung des gebundenen J/ψ -Zustandes, welcher aus einem c - und einem Anti- c -Quark besteht, war die Bestätigung der theoretischen Vorhersage. Dieser Erfolg hat das Quark-Partonmodell mit seinen Erweiterungen bestätigt und bildete das Fundament für die Quantenchromodynamik, welche einer der Grundpfeiler des Standardmodells ist.

Im Standardmodell erfolgt die Einordnung der Elementarteilchen in drei Generationen – I., II. und III. – grob nach ihrer Masse³ (I. leicht, II. mittelschwer, III. schwer). In diesem Sinne gelten *bottom*- und *top*-Quark mit Massen von $m_b \approx 4,4 \text{ GeV}$ und $m_t \approx 180 \text{ GeV}$ als schwer. Das *charm*-Quark mit einer Masse von $m_c \approx 1,3 \text{ GeV}$ gehört zusammen mit dem *strange*-Quark, welches eine Masse von $m_s \approx 0,12 \text{ GeV}$ besitzt, zu den mittelschweren Quarks. Das *up*- und *down*-Quark mit Massen von einigen MeV sind im Vergleich zu den vier anderen Quarks sehr leicht [16].

Da die Massen der *strange*-, *up*-, und *down*-Quarks um Größenordnungen unter der Masse des *charm*-Quarks liegen, wird dieses häufig auch zu den schweren Quarks gezählt. Eine besondere Beobachtung ist, dass die gesamte stabile uns umgebende Materie aus der ersten Familie aufgebaut ist. In Abbildung 1.1 sind die üblichen Bezeichnungen der sechs Quarks und sechs Leptonen gezeigt. Zu jedem dieser zwölf genannten Elementarteilchen gibt es noch je ein Antiteilchen.



In den bisher experimentell zugänglichen Längenskalen gibt es drei fundamentale Wechselwirkungen: die starke, schwache und die elektromagnetische; die vierte fundamentale Kraft, die Gravitation, spielt in der Regel bei den Experimenten der Teilchenphysik keine Rolle. Die drei Kräfte werden theoretisch innerhalb von Quantenfeldtheorien durch den Austausch von Eichbosonen beschrieben. Diese sind in Abbildung 1.1 ebenfalls gezeigt. Das masselose Photon (γ -Boson) ist Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung und wird zwischen geladenen Teilchen ausgetauscht. Die schwache Wechselwirkung wird von dem neutralen Z^0 -Boson und den geladenen W^\pm -Bosonen übermittelt; diese

³Die im weiteren Verlauf der Arbeit angegebenen Massen sind in natürliche Einheiten, in denen $\hbar = c = 1$ ist, umgerechnet.

besitzen Masse. Mittlerweile ist es gelungen, die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung in einer vereinheitlichten Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zu beschreiben [9, 10, 11]. Die starke Wechselwirkung als dritte fundamentale Kraft wird durch die Gluonen vermittelt. Eine Eigenschaft der starken Wechselwirkung ist, dass keine freien Quarks beobachtet werden, sondern nur durch die Gluonen gebundene Quarkzustände. Diese aus Quarks zusammengesetzten und der starken Wechselwirkung unterliegenden Zustände nennt man Hadronen. Das bekannteste Hadron ist das Proton, das in einem stark vereinfachten Modell aus zwei *up*- und einem *down*-Quark besteht. Die Einordnung der Elementarteilchen in zwei Gruppen – Quarks und Leptonen – beruht darauf, dass Quarks stark wechselwirken, Leptonen nicht.

In den früheren Fixed-Target Experimenten⁴ und am Speicherring HERA⁵ wurden mit Hilfe der elektroschwach wechselwirkenden Sondenteilchen (Z, W^\pm, γ) Messungen der Impulsverteilungen der im Nukleon befindlichen Quarks durchgeführt. Weitere Messungen haben ergeben, dass die Quarks im Mittel ungefähr die Hälfte des Nukleonimpulses⁶ tragen. Der restliche Impuls des Nukleons muss also von Objekten im Nukleon getragen werden, welche nicht elektromagnetisch oder schwach wechselwirken. Dies war ein erster Hinweis auf die Gluonen, welche bei PETRA⁷ entdeckt wurden [12].

1.1. Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit wurde am H1-Experiment des HERA-Speicherringes durchgeführt. Der HERA-Speicherring wurde in den Jahren 2000 und 2001 umgebaut, um die Zahl der Wechselwirkungen zu erhöhen. Aufgrund dieser gesteigerten Luminosität ist die Notwendigkeit gegeben, die im Triggersystem⁸ anfallende Ereignisrate auch weiterhin intelligent zu reduzieren. Dabei sucht das Triggersystem nur nach *bestimmten*, physikalisch interessanten Ereignissen. Die Ereignisse mit hohen Viererimpulsüberträgen Q^2 oder Transversalimpulsen sind durch geringe Raten und eindeutige Signaturen gekennzeichnet, so dass diese Ereignisse bereits von einfachen Triggern erkannt und ohne weitere Ratenreduktion gesichert werden können. Im niedrigen Q^2 - und p_t -Bereich ist die Situation grundlegend anders. Die Ereignisrate nimmt hier aufgrund des Q^{-4} -Verhaltens des totalen Wirkungsquerschnitts extrem zu.

Die interessanten Phänomene der Physik der schweren Quarks ereignen sich deshalb bei niedrigen Viererimpulsüberträgen ($Q^2 \approx 0$) mit einer höheren Rate als bei hohen Viererimpulsüberträgen. In diesem Bereich finden aber auch andere *ep*-Ereignisse mit wesentlich höherer Rate statt. Im bestehenden Triggersystem kann die Produktion von schweren Quarks lediglich inklusiv gesucht werden. Das Ziel ist deshalb ein selektiver Trigger für exklusive Endzustände auf frühen Triggerstufen.

Für diesen Zweck wurde von der H1-Kollaboration ein schneller Spurtrigger entwickelt. Dieser verarbeitet die Signale ausgewählter Drähte der zentralen Spurkammern in einem mehrstufigen System. So werden innerhalb der ersten Triggerstufe bereits Spuren gefun-

⁴Stark beschleunigte Teilchen werden dazu auf ein *feststehendes Ziel* gelenkt.

⁵**H**adron **E**lektron **R**ing **A**nlage, HERA siehe Abschnitt 3.

⁶Nukleonen sind die Kernbausteine der Atome, die geladenen Protonen und neutralen Neutronen.

⁷**P**ositron **E**lektron **T**andem **R**ing **A**nlage, PETRA siehe Abschnitt 3.

⁸Trigger dienen dem Erkennen von gesuchten Ereignissen anhand ausgezeichneter Ereignismerkmale.

den und die jeweiligen Spurparameter zur Erzeugung einer Triggerentscheidung genutzt. Die zweite Triggerstufe liefert wesentlich präzisere Spurparameter, die dreidimensionalen Spuren zugeordnet und an die dritte Triggerstufe gesendet werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der dritten Triggerstufe des schnellen Spurtriggers, diese wird exklusive Endzustände anhand der Spursignatur und der invarianten Massenkombination passender Spuren eines Ereignisses finden. Damit steht dem H1-Triggersystem ein selektiver Trigger noch während der Auslese der Daten zur Verfügung.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Integration der neu entwickelten Serienversion der Empfängerkarte in das L3-System. Um diese Integration zu testen, wurden bestehende Testmöglichkeiten angepasst, die den Datentransfer im L3-System überprüfen. Der Datentransfer in das L3-System vom L2-System ausgehend, wird mit einem im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Test untersucht. Der Datentransfer vom L2-System ist eine der Voraussetzungen für die Integration des L3-Systems in das FTT-System. Außerdem wurde die dritte Triggerstufe mit unterschiedlichen Datensätzen getestet und die Ergebnisse in Relation zu den Offline-Algorithmen und Parametern gesetzt, sowie erweiterte Zeitstudien durchgeführt. Mit diesen Tests wurde die Betriebsfähigkeit der Hardware des L3-Systems mit dem Serienmodell der Empfängerkarte gezeigt.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

Zunächst werden im **2. KAPITEL** die der ep -Streuung zugrunde liegende Kinematik und die im Experiment gemessenen Variablen eingeführt. Dort wird auch eine kurze Einführung des J/ψ -Vektormesons und seiner Charakteristika gegeben.

Anschließend wird im **3. KAPITEL** der HERA-Speicherring und das H1-Experiment in der HERA-II Konfiguration genauer beschrieben. Dieses Kapitel ist in eine Beschreibung des zentralen Detektorbereichs und eine detailliertere des für diese Arbeit wichtigen Detektorsubsystems eingeteilt. Anschließend wird eine Erläuterung des H1-Triggersystems gegeben.

Auf das Konzept des schnellen Spurtriggers, der durch die Erhöhung der Luminosität und den gestiegenen Anforderungen an das H1-Triggersystem notwendig geworden ist, wird im **4. KAPITEL** eingegangen.

Die dritte Triggerstufe ist ein Teilsystem des schnellen Spurtriggers und wird im **5. KAPITEL** ausführlich behandelt. Die in die dritte Triggerstufe zu integrierende Empfängerkarte und deren Programmierung bilden den Schwerpunkt des **5. KAPITELS**.

Die fehlerfreie Integration der Empfängerkarte in die L3-Hardware und die Ergebnisse von zwei Datentransfertests werden im **6. KAPITEL** vorgestellt. Das Systemverhalten von L3 wurde mit einem vorselektierten J/ψ -Datensatz und einer nicht selektierten Datennahme vom Juni 2004 untersucht. Die Ergebnisse der untersuchten Ereignisse, welche durch das L3-System verarbeitet worden sind, werden ebenfalls im **6. KAPITEL** diskutiert. Dabei werden insbesondere die Rekonstruktion von invarianten Massen durch die dritte Triggerstufe und das Zeitverhalten untersucht.

In **ANHANG A** wird die graphische Benutzeroberfläche des schnellen Spurtriggers vorgestellt. Die Arbeit an dieser Benutzeroberfläche umfasst die Entwicklung von neuen Routinen auf den Power-PCs des schnellen Spurtriggers, die im Wesentlichen die vereinfachte Kontrolle der Auslese des schnellen Spurtriggers über die Benutzeroberfläche ermöglichen. Der **ANHANG B** dient der Darstellung von technischen Details, die in Form von kommentierten Tabellen gegeben werden.

2. Die kinematischen Variablen der $e^\pm p$ -Streuung

Zur Messung und Bestimmung der inneren statischen und dynamischen Struktur der Nukleonen, können elektromagnetisch oder schwach wechselwirkende Sondenteilchen genutzt werden. Die elektroschwache Wechselwirkung ist theoretisch und experimentell sehr gut verstanden und daher ein geeignetes Instrument zur Untersuchung der inneren Struktur der Nukleonen. In früheren Experimenten wurde die Struktur eines beobachteten Objektes durch einen Formfaktor berechnet, welcher zum Beispiel die Ladungsverteilung des Objektes beschreibt. Das ermöglichte eine "einfache" anschauliche Interpretation der Ergebnisse. Die fouriertransformierte Funktion eines experimentell bestimmten Formfaktors gibt die Größe im Breitsystem¹, sowie mögliche Hinweise auf eine Substruktur des untersuchten Objektes wieder. So entspricht ein konstanter Formfaktor der Ladungsverteilung einer δ -Funktion, welche in guter Näherung ein punktförmiges Objekt (z.B. Elektron) beschreibt. In der tiefinelastischen ep -Streuung müssen die Formfaktoren durch Strukturfunktionen ersetzt werden.

In tiefinelastischer Streuung kann das Boson direkt an einem Quark aus dem Nukleon gestreut werden. Dabei wird zwischen dem geladenen und dem neutralen Bosonaustausch unterschieden. Der Austausch eines geladenen W^\pm -Bosons läßt im Endzustand ein Elektron-Neutrino zurück, das nicht direkt zu detektieren ist. In der neutralen Wechselwirkung mit dem Proton, durch Austausch von γ - oder Z^0 -Boson, beinhaltet der Endzustand auch das gestreute nachweisbare Elektron. Die Abbildung 2.1 zeigt die entsprechenden

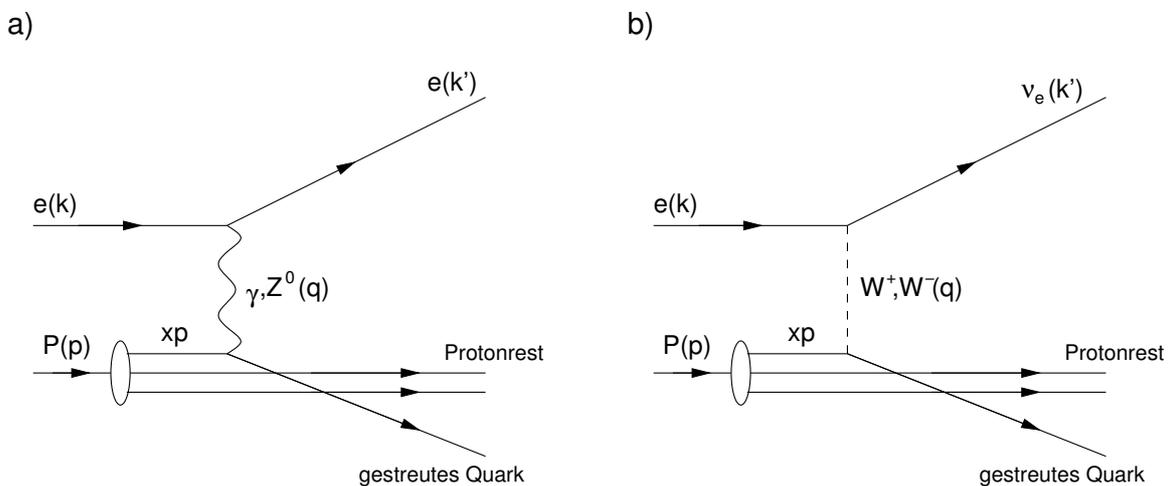


Abbildung 2.1.: *Feynman-Graphen in führender Ordnung a) für den neutralen Strom mit Bosonaustausch von γ und Z^0 -Teilchen und b) für den geladenen Strom mit den ausgetauschten W^\pm -Bosonen.*

Feynman-Diagramme, in denen das einlaufende Proton P den Gesamtviererimpuls \mathbf{p} und das gestreute Quark des Protons den fraktionellen Viererimpulsanteil $x \cdot \mathbf{p}$ tragen. Das

¹Wird auch *brick wall* System genannt. Dieses ist so gewählt, dass keine Energie auf das Proton übertragen wird, es gilt $\mathbf{p} = -\mathbf{p}$.

einlaufende Elektron trägt den Viererimpuls \mathbf{k} und das ausgetauschte Boson den Viererimpulsübertrag \mathbf{q} ; die auslaufenden Teilchen sind jeweils mit den gestrichenen Variablen versehen.

In der ep -Streuung bei HERA ist der Prozess mit einem wechselwirkenden masselosen Photon bevorzugt, da die W^\pm - und Z^0 -Bosonen über eine große Masse ($M_{Z^0} \approx 91 \text{ GeV}$ und $M_{W^\pm} \approx 80 \text{ GeV}$) verfügen, welche den Wirkungsquerschnitt unterdrückt². Die ep -Streuung ist durch drei lorentzinvariante Variablen vollständig beschrieben. Üblicherweise sind das die drei unabhängigen Größen x, y, Q^2 . Die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} ist durch die Strahlenergie eines Beschleunigers fest vorgegeben. Der Viererimpulsübertrag Q^2 ist gegeben durch:

$$Q^2 := -q^2 = -(\mathbf{k} - \mathbf{k}')^2. \quad (2.1)$$

Die Schwerpunktsenergie bei HERA von 320 GeV folgt aus der Wurzel der Mandelstamvariable:

$$s := (\mathbf{k} + \mathbf{p})^2. \quad (2.2)$$

Die dimensionslose Skalenvariable Björken x beschreibt im Quark-Parton Modell den vom gestreuten Quark getragenen Impulsbruchteil des Protons:

$$x := \frac{Q^2}{2(\mathbf{p} \cdot \mathbf{q})}, \text{ im Intervall } 0 < x < 1. \quad (2.3)$$

Wobei der elastische Grenzfall für gegen eins gehende Werte von x gegeben ist. Die zweite Skalenvariable ist y und gibt den relativen Energieverlust des Elektrons im Ruhesystem des Protons an. y ist damit ein Maß für die Inelastizität einer Streuung und folgendermaßen gegeben:

$$y := \frac{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{q})}{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{k})}, \text{ im Intervall } 0 < y < 1. \quad (2.4)$$

Mit diesen Definitionen und unter Vernachlässigung der Ruhemassen kann das Quadrat des Viererimpulsübertrages ausgedrückt werden als:

$$Q^2 = sxy. \quad (2.5)$$

Ein geeigneter Detektor ermöglicht es, die oben beschriebenen Streuprozesse zu beobachten, wobei das hochauflösende virtuelle Photon (γ^*) eine ‘‘Blitzlichtaufnahme‘‘ des Protons machen kann. Der Begriff virtuell bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Photon nicht auf seiner Massenschale, definiert durch $q^2 = 0$, liegt und damit einen Viererimpulsübertrag $Q^2 \neq 0$ besitzt; Q^2 ist damit ein Maß für die Virtualität des Prozesses. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse der an den Nukleonen durchgeführten Streuexperimente ist es zweckmäßig, ein Bezugssystem zu wählen, in dem sich die Nukleonen extrem schnell bewegen: das Infinite Momentum Bezugssystem³. In diesem Bezugssystem sind deshalb die transversalen Relativimpulse der Partonen (Quarks) im Vergleich zu den Longitudinalimpulsen vernachlässigbar klein, so dass Aufnahmen der longitudinalen Struktur des Protons durchgeführt werden können. Die Dauer der γ^*p -Wechselwirkung ist dabei wesentlich kürzer, als die Lebensdauer eines beobachteten Zustandes.

²Der Propagator-Term der durch den Austausch eines Bosons der Masse M verursachten Steuamplitude lautet $(q^2 + M^2)^{-1}$. Die Streuamplitude geht quadratisch in den Wirkungsquerschnitt ein.

³Infinite Momentum Frame

Die Streuexperimente werden anhand des Viererimpulsübertrages Q^2 für den neutralen Strom in zwei kinematische Bereiche eingeteilt. Die hier gegebenen Werte sind für die Kollisionsexperimente des HERA-Speicherringes gültig:

- Die Prozesse, die einen Viererimpulsübertrag $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$ aufweisen, werden im allgemeinen als *tiefinelastische Streuung* (*deep inelastic scattering, DIS*) bezeichnet.
- Der Grenzbereich der gegen Null gehenden Impulsüberträge Q^2 . Das ausgetauschte Photon ist quasi-reell und der zugehörige Prozess wird *Photoproduktion* genannt. Dieser Bereich wird mit $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ definiert.

Die Kinematik der ep -Streuung läßt sich durch den Nachweis des gestreuten Elektrons im Detektor vollständig rekonstruieren. Dafür muss die Energie E' und der Polarwinkel $\vartheta_{e'}$ des gestreuten Elektrons bestimmt werden. Dieser Streuwinkel $\vartheta_{e'}$ ist bezüglich der Richtung des Protonenstrahls definiert⁴. Aus den Messungen werden die beiden folgenden unabhängigen Größen

$$Q_e^2 = 4 \cdot E_e E_e' \cdot \cos^2(\vartheta_{e'}/2) \quad (2.6)$$

und

$$y_e = 1 - \frac{E_e'}{E_e} \cdot \sin(\vartheta_{e'}/2) \quad (2.7)$$

bestimmt. In den beiden genannten kinematischen Bereichen wird die Struktur des Protons untersucht. Dabei ist es auch durch die Messung von bestimmten Endzuständen möglich auf die innere Struktur des Protons zu schließen. Der Inhalt des Protons bestehend aus den *up*- und *down*-Quarks wurde bereits gut vermessen [13], von Interesse ist jetzt der Inhalt des Protons an schweren Quarks und Gluonen. Für die Messung des schweren Quark- bzw. Gluoninhaltes des Protons kann unter anderem der Nachweis von exklusiven Endzuständen genutzt werden. Ein möglicher interessanter Endzustand in ep -Streuungen ist dabei das J/ψ -Vektormeson, welches aus einem c - und einem Anti- c -Quark besteht.

2.1. Die Produktion von J/ψ -Vektormesonen

Das J/ψ -Vektormeson wurde 1974 fast gleichzeitig in zwei verschiedenen Experimenten beobachtet, daraus resultiert der doppelte Name. Am BNL⁵ wurde es in hadronischen Wechselwirkungen nachgewiesen [14]; am SLAC als Resonanz im totalen e^+e^- -Wirkungsquerschnitt [15]. Das J/ψ -Vektormeson charakterisiert durch die Quantenzahlen⁶ $J^{PC} = 1^{--}$ ist ein Charmonium-Zustand und besteht aus einem c -Quark und einem Anti- c -Quark ($c\bar{c}$). Die invariante Masse liegt bei $3096,87 \pm 0,04 \text{ MeV}$ [16]. Die Zerfallsbreite von 87 keV ist im Vergleich zu anderen hadronischen Zerfallsbreiten, die in der Größenordnung 20 bis 200 MeV liegen, sehr klein.

Das J/ψ -Vektormeson zerfällt zu etwa 12 % in zwei Leptonen, nämlich in ein e^+e^- - bzw.

⁴Das Koordinatensystem wird in Abschnitt 3.1 eingeführt.

⁵Brookhaven National Laboratory

⁶Gesamtdrehimpuls J , Parität P und Ladungskonjugation C

in ein $\mu^+\mu^-$ -Paar. Die restlichen Zerfälle sind hadronischer Natur [16]. Der Zerfallskanal in zwei Leptonen ist für das H1-Experiment aufgrund der Zwei-Spur-Signatur interessant. Diese läßt sich im Detektor gut identifizieren. Aufgrund der großen Masse des Mutterteilchens besitzen die Zerfallsleptonen einen relativ großen Transversalimpuls, so dass eine klare Spursignatur in den zentralen Spurräumen nachweisbar ist. In Abbildung 2.2 ist die Ereignissignatur des Zerfalls eines in Photoproduktion erzeugten J/ψ -Mesons in zwei Myonen gezeigt. Die Spuren der geladenen Myonen in den verschiedenen Detektorsystemen sind gut zu erkennen.

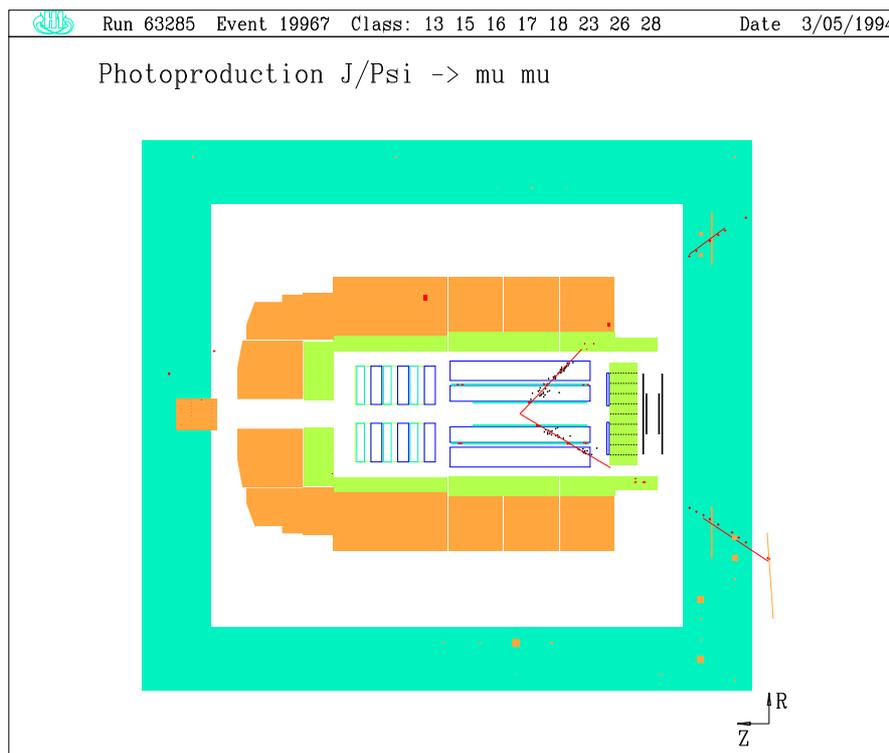


Abbildung 2.2.: Der Zerfall eines in Photoproduktion erzeugten J/ψ -Zustandes in zwei entgegengesetzt geladene Myonen [17].

Die Erzeugung wird in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Dabei sind die dominanten Bereiche die inelastische und die diffraktive Produktion. Die inelastische Produktion ist wiederum dominiert durch die Streuung des Photons an einem Parton des Protons. Dieser Prozess wird als Photon-Gluon-Fusion bezeichnet. Das Gluon unterliegt nicht der elektroschwachen Wechselwirkung, es kann aber mit dem quasi-reelen Photon ($Q^2 \approx 0$) über eine Quark-Antiquarkschleife wechselwirken. In Abbildung 2.3 a) ist ein schematischer Feynman-Graph für die Photon-Gluon-Fusion gezeigt. Das einlaufende Elektron e und Proton P tragen jeweils den in Klammern angegebenen Viererimpuls, wohingegen die auslaufenden Teilchen den jeweils mit gestrichelten Variablen gekennzeichneten Viererimpuls tragen. Der durch das virtuelle Photon γ^* übertragene Viererimpuls ist mit q markiert. Der auslaufende Protonrest ist durch X gekennzeichnet.

Die diffraktive Produktion, das heißt die Wechselwirkung des Photons als Hadron mit dem ganzen Proton, kann in unterschiedlicher Weise erfolgen und ist in Abbildung 2.3 b) stark vereinfacht skizziert. Das sind elastische Prozesse in denen das Proton intakt

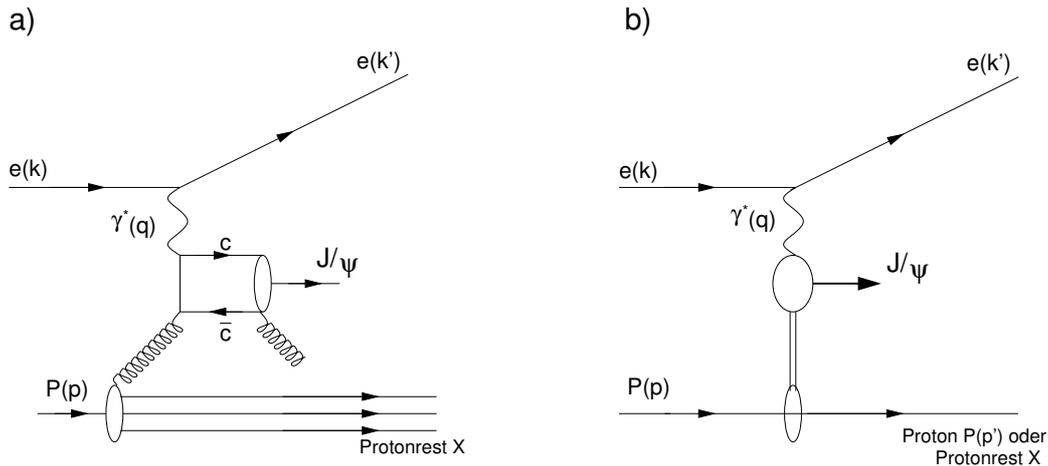


Abbildung 2.3.: Erzeugung eines a) Quark-Antiquarkpaares durch Photon-Gluon-Fusion, unter Abstrahlung eines Gluons entsteht der gebundene J/ψ -Zustand. b) zeigt eine stark vereinfachte Skizze der diffraktiven J/ψ -Produktion bei der das Proton im Endzustand weiter existiert oder dissoziiert worden ist. Die Viererimpulse der Teilchen sind in Klammern bezeichnet, die Viererimpulse der auslaufenden Teilchen sind gestrichen.

bleibt und protodissoziative Prozesse in denen das Proton in einen angeregten Zustand überführt wird. In beiden Fällen ist der Endzustand gut nachzuweisen, da außer den Zerfallsteilchen des J/ψ -Mesons entweder keine weiteren Spuren (Photoproduktion) oder nur das gestreute Elektron im zentralen Detektorbereich nachgewiesen werden, sofern der angeregte Protonzustand nicht zu große Massen besitzt.

Sowohl in den inelastischen als auch in den diffraktiven Prozessen ist die Entstehung des gebundenen J/ψ -Zustandes aus dem produzierten $c\bar{c}$ -Paar ein komplizierter Vorgang. Die wesentlichen Modellunsicherheiten in der inelastischen Produktion liegen in der Entstehung des gebundenen J/ψ -Zustandes aus dem $c\bar{c}$ -Paar. Dahingegen resultiert die Unsicherheit in der diffraktiven Produktion aus der Wechselwirkung des J/ψ -Zustandes mit dem Proton.

Zur Realisierung einer Messung der Gluondichte des Protons und auch zur Überprüfung der theoretischen Modelle, welche die Entstehung des J/ψ -Mesons erklären, ist es notwendig möglichst viele inelastische J/ψ -Ereignisse zu messen. Dadurch werden hohe Anforderungen an das Triggersystem eines Detektors gestellt, worauf in Abschnitt 3.2 und Kapitel 5 genauer eingegangen wird.

3. Der HERA-Speicherring und das H1-Experiment am DESY

Das DESY¹ in Hamburg ist eines der größten Zentren für Teilchen- und Synchrotronstrahlungsphysik der Welt. In Abbildung 3.1 sind die bestehenden großen Beschleunigerstrukturen und einige Experimentierhallen gezeigt. Der große HERA²-Speicherring hat einen Umfang von etwa 6,4 km. Am HERA-Speicherring werden Elektronen oder Positro-

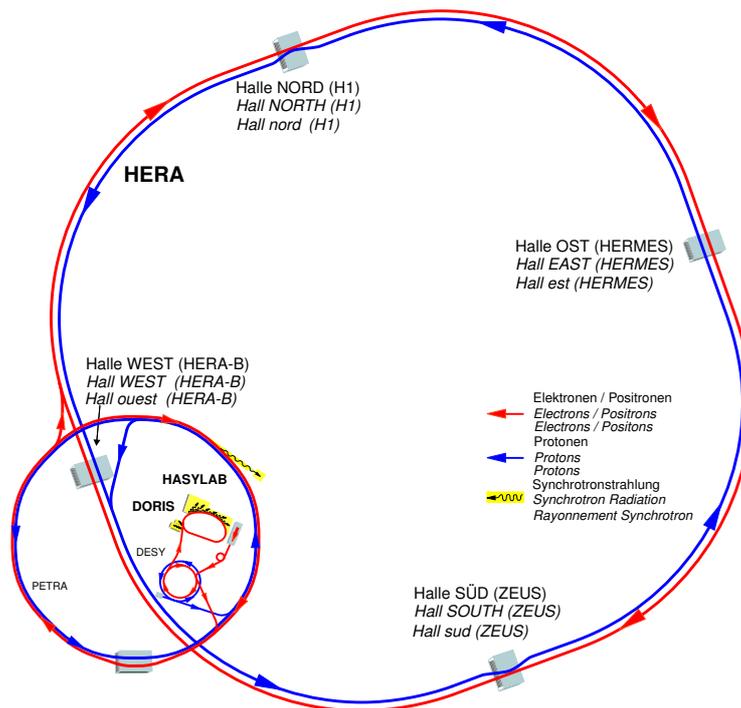


Abbildung 3.1.: Die bestehenden Beschleunigerstrukturen bei DESY, gezeigt sind unter anderem die großen HERA-Ringe und die kleinen Vorbeschleuniger PETRA und DESY. Weiterhin sind die HERA-Experimentierhallen mit den dort befindlichen Experimente eingezeichnet [17].

nen³, sowie Protonen in entgegengesetzter Richtung beschleunigt und zur Wechselwirkung gebracht. Das ist in dieser Form einzigartig. Der Beschleuniger arbeitet asymmetrisch, dabei werden die Elektronen auf eine Energie von 27,5 GeV beschleunigt und die Protonen auf 920 GeV. Die Teilchen werden dabei in Paketen (*Bunchen*) im HERA-Ring gespeichert. Die Beschleunigung dieser Strahlpakete wird mit einer umfangreichen komplexen Beschleunigerstruktur durchgeführt. Diese umfasst unter anderem die in Abbildung 3.1 gezeigten DESY- und PETRA-Vorbeschleuniger.

Der HERA-Speicherring verfügt über vier Experimentierhallen (Nord, West, Süd und

¹Deutsches Elektronen Synchrotron

²Hadron Elektron Ring Anlage

³Im folgenden wird diese Unterscheidung zwischen Elektron und Positron (Anti-Elektron) unterlassen und lediglich der Begriff Elektron benutzt.

Ost), wobei zur Zeit in drei Hallen Experimente durchgeführt werden. In Halle Ost wird das Experiment HERMES betrieben. Dort wird nur der Elektronenstrahl genutzt und auf polarisierte Gastargets gelenkt, um die Spinstruktur⁴ der Nukleonen zu untersuchen. Bis zum Ende der Datennahme im Jahr 2002 wurde in Halle West das HERA-B Experiment zur Untersuchung der Eigenschaften von schweren Mesonen genutzt. Dazu wurde der Protonenstrahl mit Drahttargets aus verschiedenen Materialien zur Wechselwirkung gebracht und die Reaktionsprodukte mit einem komplexen Spektrometer vermessen. In den Hallen Süd und Nord werden die Kollisionsexperimente ZEUS und H1, welches im folgenden Kapitel 3.1 beschrieben wird, zur Untersuchung der Protonstruktur und anderer Phänomene betrieben. In diesen Experimenten kreuzen sich die beiden umlaufenden Strahlpakete alle 96 ns (*Bunchcrossing*), dadurch ergibt sich eine Wechselwirkungsrate von etwa 10,4 MHz.

Zur Messung von Ereignissen mit kleinen Wirkungsquerschnitten zu denen die Ereignisse der schweren Quark-Physik gehören, das sind zum Beispiel die in Abschnitt 2.1 erläuterten J/ψ -Prozesse, ist es notwendig, die Zahl der Wechselwirkungen zu erhöhen. Deshalb wurden in den Jahren 2000 & 2001 umfangreiche Umbaumaßnahmen durchgeführt [18, 19]. Diese betrafen sowohl den HERA-Ring, als auch den H1-Detektor. Die beobachtbare Anzahl von Wechselwirkungen kann mit der instantanen Luminosität \mathcal{L} gemessen werden, diese ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Ereignisrate R und dem Wirkungsquerschnitt σ :

$$R = \sigma \cdot \mathcal{L}. \quad (3.1)$$

Zur Erhöhung der Ereignisrate bleibt nur die Möglichkeit, die Luminosität zu erhöhen, da der Wirkungsquerschnitt eines Prozesses gegeben ist. Für die Luminosität gilt vereinfacht folgende Abhängigkeit:

$$\mathcal{L} \sim \frac{1}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (3.2)$$

Die mit σ_x und σ_y bezeichneten (gaußförmigen) Abweichungen der Strahlteilchen von der Strahlmitte sind zur Erhöhung der Luminosität verringert worden.

Damit eine verbesserte Fokussierung der Teilchenstrahlen am Wechselwirkungspunkt möglich ist, wurden supraleitende Magneten eingebaut. In Abbildung 3.2 sind die zum HERA-Ring gehörigen neuen Magnetstrukturen GO (Vorwärtsrichtung) [17] und GG (Rückwärtsrichtung) [16] zu erkennen, diese reichen weit in den H1-Detektor hinein und erforderten weitere Anpassungen und Modifikationen bestehender Detektorsubsysteme. Der Strahlquerschnitt $\sigma_x \times \sigma_y$ betrug während der HERA-I Phase etwa $192 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ und konnte in der HERA-II Phase nach den Umbaumaßnahmen auf etwa $112 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ verringert werden [20]. Die Luminosität ist durch die Umbaumaßnahmen um etwa einen Faktor vier gesteigert worden.

⁴Der Spin bezeichnet eine quantenmechanische Größe mit der der Eigendrehimpuls eines Teilchen beschrieben werden kann.

3.1. Der H1-Detektor

Beim Aufbau des Detektors [21, 22] wurde darauf geachtet, möglichst den kompletten Raumwinkelbereich abzudecken. Dadurch wird die Rekonstruktion der Ereigniskinematik und die Identifikation der in den ep -Streuungen produzierten Teilchen erleichtert. Die Asymmetrie in der Energie der umlaufenden Teilchenstrahlen spiegelt sich auch im Aufbau des Detektors wieder, deshalb ist der Detektor in Richtung der (auslaufenden) Protonen wesentlich aufwendiger instrumentiert.

Zur Beschreibung der Signaturen der detektierten Teilchen wird ein Koordinatensystem mit Ursprung im Wechselwirkungspunkt vereinbart. Dieses ist mit positiver z -Achse in Richtung des auslaufenden Protonenstrahls definiert. Auf den Mittelpunkt des Ringes zeigt die positive x -Achse, die y -Achse zeigt einem rechtshändigen Koordinatensystem entsprechend nach oben. In diesem Koordinatensystem sind darüber hinaus noch zwei Winkel von Bedeutung. Der Azimutalwinkel φ wird von der x -Achse aufwärts gezählt, wohingegen der Polarwinkel ϑ relativ zur Protonenstrahlrichtung gemessen wird. Zur besseren Orientierung werden zwei Projektionen benutzt, orthogonal zur z -Achse ($r\varphi$ - Ebene) und entlang der z -Achse (rz - Ebene).

Der zentrale Bereich des H1-Detektors in der HERA-II Konfiguration ist in Abbildung 3.2 in der Seitenansicht gezeigt, die markierten Komponenten werden im folgenden Text näher beschrieben. Eine umfassende Beschreibung des H1-Detektors kann in [21, 22] gefunden werden.

Der einlaufende Protonenstrahl wird mit dem entgegengesetzt einlaufenden Elektronenstrahl im Wechselwirkungspunkt [1] zur Wechselwirkung gebracht. Dafür werden die Strahlpakete der Elektronen von den Strahlmagneten in Rückwärtsrichtung [16] und Vorwärtsrichtung [17] auf ihrer Bahn gehalten.

Das elliptische Strahlrohr wird zunächst von Spurdetektoren umgeben, die im Wesentlichen aus Silizium gefertigt sind. Der zentrale Silizium Spurdetektor (CST⁵) [2] umgibt dabei den Wechselwirkungspunkt im Bereich von $30^\circ \leq \vartheta \leq 150^\circ$. Der Detektor hat eine Auflösung von $\sigma_{r\varphi} = 12 \mu\text{m}$ in der $r\varphi$ -Ebene und $\sigma_{rz} = 22 \mu\text{m}$ in der rz -Ebene [28]. Mit diesem Detektor wird der gemeinsame Ursprungsort (Vertex) von zwei oder mehr Teilchenspuren im Detektor vermessen. Zusätzlich kann der CST zur Bestimmung von Sekundärvertices genutzt werden. Es existieren zwei weitere Siliziumdetektoren: In Vorwärtsrichtung ist dies der FST⁶ [4], der einen Winkelbereich von $8^\circ \leq \vartheta \leq 16^\circ$ abdeckt [29]. Der BST⁷ [3] unterstützt die Identifikation des gestreuten Elektrons unter großen Polarwinkeln, das bedeutet innerhalb einer Akzeptanz von $162^\circ \leq \vartheta \leq 176^\circ$ [30].

In radialer Richtung schließt sich an die Siliziumdetektoren das zentrale Spurkammersystem an, dessen Hauptbestandteil die zentralen Jetkammern [7] und [8] sind. Diese sind für die vorliegende Arbeit von Bedeutung, deshalb wird im nächsten Abschnitt 3.1.1 eine detaillierte Beschreibung des zentralen Spurkammersystems gegeben. Der FTD⁸ [9] mit einer Polarwinkelakzeptanz von $7^\circ < \vartheta < 25^\circ$ [23] ist ein weiteres Spurkammersystem in Vorwärtsrichtung. Mit diesen Systemen ist die Bestimmung der Spuren von geladenen Teilchen möglich.

⁵Central Silicon Tracker

⁶Forward Silicon Tracker

⁷Backward Silicon Tracker

⁸Forward Tracking Detector

XX	Detektorkomponente	Abkürzung
1	Wechselwirkungspunkt	Interaction Point (IP)
2	zentraler Siliziumdetektor	Central Silicon Tracker (CST)
3	rückwärtiger Siliziumdetektor	Backward Silicon Tracker (BST)
4	vorwärtiger Siliziumdetektor	Forward Silicon Tracker (FST)
5	innere Proportionalkammer	Central Inner Proportional Chamber 2000 (CIP2000)
6	äußere Proportionalkammer	Central Outer Proportional Chamber (COP)
7	zentrale Jetkammer 1	Central Jet Chamber 1 (CJC1)
8	zentrale Jetkammer 2	Central Jet Chamber 2 (CJC2)
9	vorwärtige Spurkammer	Forward Tracking Detector (FTD)
10	rückwärtige Proportionalkammer	Backward Proportional Chamber (BPC)
11	Flüssig-Argon Kryostat	Liquid Argon Kryostat (LAr-Kryostat)
12	Flüssig-Argon Kalorimeter (elektromagnetisch)	Liquid Argon Calorimeter, elm. (LAr elm.)
13	Flüssig-Argon Kalorimeter (hadronisch)	Liquid Argon Calorimeter, hadr. (LAr hadr.)
14	Spaghetti-Kalorimeter (elektromagnetisch)	Spaghetti Calorimeter, elm. (SpaCal elm.)
15	Spaghetti-Kalorimeter (hadronisch)	Spaghetti Calorimeter, hadr. (SpaCal hadr.)
16	supraleitender Magnet (Rückwärtsrtg.)	(GG)
17	supraleitender Magnet (Vorwärtsrtg.)	(GO)
18	supraleitende Spule	–
19	zentrales Myonsystem	Central Myon System (CMS)
20	Myon-Toroid Magnet	–
21	vorwärtiges Myonsystem	Forward Myon System (FMS)

Tabelle 3.1.: *Aufschlüsselung der Detektorkomponenten nach den in Abbildung 3.2 gezeigten Ziffern.*

An die zentralen Spurkammersysteme schließt sich das Flüssig-Argon-Kalorimeter (LAr-Kalorimeter⁹ an [24]. Das Kalorimeter deckt einen Winkelbereich von $4^\circ < \vartheta < 154^\circ$ ab und ist als *Sampling*-Kalorimeter konzipiert. Als aktives Nachweismaterial zwischen den Absorbermaterialien des Kalorimeters wird flüssiges Argon genutzt. Im elektromagnetischen Teil des Kalorimeters [12] werden Absorberplatten aus Blei, mit einer Tiefe von 20 bis 30 Strahlungslängen, genutzt. Im hadronischen Teil des Kalorimeters [13] wird hingegen Edelstahl als Absorbermaterial genutzt. Die Tiefe des Kalorimeters liegt bei 5 bis 8 hadronischen Wechselwirkungslängen. Das gesamte Kalorimeter wird durch einen Flüssig-Argon-Kryostaten [11] gekühlt.

Das wesentliche Subsystem des Detektors in Rückwärtsrichtung ist das Spaghetti-Kalorimeter (SpaCal¹⁰), es besteht aus einem elektromagnetischen [14] und einem hadronischen Teil [15]. Die Bezeichnung SpaCal leitet sich aufgrund des Aufbaus aus aktiven szintillierenden Fasern, welche im Absorbermaterial Blei eingebettet sind, ab [25]. Die Akzeptanz liegt zwischen $155^\circ < \vartheta < 175^\circ$ und schließt die Lücke, welche vom Flüssig-Argon Kalorimeter in Rückwärtsrichtung nicht abgedeckt wird. Weiterhin befindet sich in Richtung des auslaufenden Elektrons die rückwärtige Proportionalkammer (BPC¹¹) [10], diese unterstützt die Identifikation des in das SpaCal gestreuten Elektrons.

Zur Bestimmung der Ladung und des Impulses wird mit Hilfe einer supraleitenden Spule [18] ein parallel zur z-Achse gerichtetes Magnetfeld von $B = 1,15$ T erzeugt. Diese Spule umgibt alle bis jetzt beschriebenen Detektorsubsysteme, damit ist die Menge des passiven Materials zwischen dem Wechselwirkungspunkt und den Kalorimetern minimal. Dadurch kann die Energie der in den Wechselwirkungen erzeugten Teilchen und ihrer Zerfallsprodukte wesentlich besser rekonstruiert werden.

Das Myonsystem besteht aus dem Vorwärts-Myon-Spektrometer [21], welches Spuren von Myonen durch mehrere Driftkammerlagen in einem Winkelbereich von $3^\circ < \vartheta < 17^\circ$

⁹Liquid Argon Kalorimeter

¹⁰Spaghetti Calorimeter

¹¹Backward Proportional Chamber

nachweist. Der zur Impulsbestimmung der Myonen benötigte Toroid-Magnet ist mit [20] gekennzeichnet. Das instrumentierte Eisen [19] bildet das zentrale Myonsystem und besteht aus so genannten Streamerröhren die einen quadratischen Querschnitt mit einem innenliegenden Draht aufweisen. Die Bauweise ist einer Spurkammer ähnlich, das eingeschlossene Volumen wird ebenfalls mit einem ionisierbaren Gas gefüllt. Das zentrale Myonsystem weist Myonen in einem Winkelbereich von $4^\circ < \vartheta < 171^\circ$ nach.

3.1.1. Das zentrale Spurkammersystem

Der Hauptbestandteil des zentralen Spurkammersystems des H1-Detektors sind die Jetkammern CJC1¹² und CJC2. Im folgenden wird der Aufbau dieser beiden Spurkammern genauer beschrieben, da der schnelle Spurtrigger ausgewählte Drahtlagen dieser Spurkammern nutzt [26, 27]. Das technische Konzept des schnellen Spurtriggers wird in Kapitel 4 erläutert, zunächst wird in diesem Abschnitt das zentrale Spurkammersystem beschrieben.

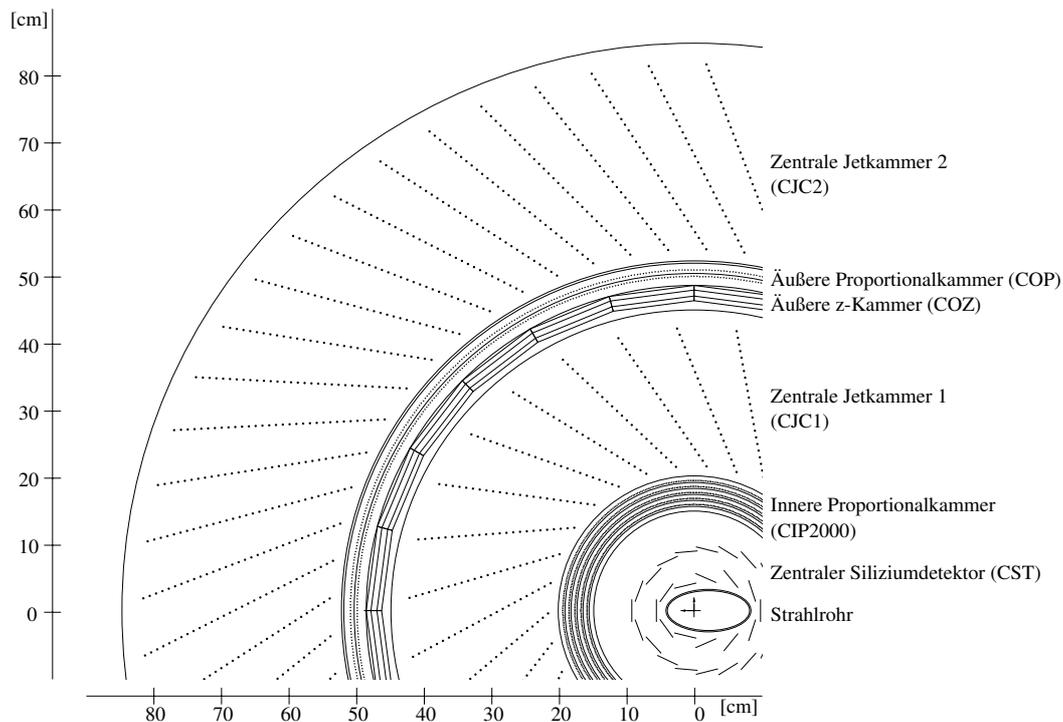


Abbildung 3.3.: Schnitt durch das zentrale Spurkammersystem des H1-Experimentes in der xy -Ebene, das elliptische Strahlrohr befindet sich in der Mitte [17]. Konzentrisch angeordnet sind die Spursysteme deren Funktion im Text erklärt wird.

In Abbildung 3.3 ist ein Querschnitt des zentralen Spurkammersystems in der $r\varphi$ -Ebene gezeigt. Die Signaldrähte der zentralen Spurkammern sind parallel zur Strahlachse (z -Achse) gespannt. Die CJC1 ist in 30 Segmente mit je 24 Signaldrähten und die CJC2 in 60 Segmente mit je 32 Signaldrähten unterteilt. Die Segmente werden in azimuthaler

¹²Central Jet Chamber 1

Richtung durch zwei Ebenen von Kathodendrähte und in radialer Richtung durch Felddrähte begrenzt.

Zur Messung des Transversalimpulses wird durch die äußere Magnetspule ein Magnetfeld erzeugt, das die Spurkammern nahezu homogen durchsetzt. Die Segmente sind in radialer Richtung um 30° geneigt. Sofern die Teilchenspuren von der Strahlachse mit hohem Impuls ausgehen, ist die Driftrichtung der Elektronen fast senkrecht zu diesen Spuren. Dadurch wird eine verbesserte Spurauflösung ermöglicht. Ein Signal für die Auslese entsteht durch die Propagation eines geladenen Teilchens in den Spurkammern. Das Kammergasgemisch $Ar - CO_2 - CH_4$ wird von geladenen Teilchen ionisiert. Die entstandenen Drift-Elektronen wandern innerhalb einer spezifischen maximalen Driftzeit von etwa $1 \mu s$ zu den Signaldrähten und erzeugen ein auszulesendes Signal. Dieses Signal liegt an den beiden Enden des Signaldrahtes an. Aus diesem Signal kann mit einer Methode der Ladungsteilung eine z-Bestimmung durchgeführt werden. Die Ortsauflösung beträgt $\sigma_{r\varphi} = 170 \mu m$ in der $r\varphi$ -Ebene und $\sigma_z = 4 \text{ cm}$ in z [32]. Die Messung des Transversalimpulses läßt sich bis auf $\sigma_{p_t}/p_t^2 = 0,01 \text{ GeV}^{-1}$ durchführen [32].

Das zentrale Spurkammersystem enthält noch einige weitere Komponenten, diese sind zwischen dem CST und der CJC1 bzw. zwischen CJC1 und CJC2 angeordnet, wie in Abbildung 3.3 gezeigt. Das CIP2000-System¹³ [31] befindet sich zwischen CST und CJC1. Unmittelbar nach der CJC1 folgt die äußere z-Kammer (COZ¹⁴) und die äußere Proportionalkammer (COP¹⁵) [6], sowie die CJC2. Die COZ verfügt als einzige Kammer über senkrecht zur Strahlachse gespannte Signaldrähte. Die rz -Ortsauflösung wird durch die Einbindung der COZ wesentlich verbessert, mit dieser läßt sich eine z-Auflösung von $\sigma_{rz} = 380 \mu m$ erreichen [22]. CIP2000 und COP sind aufgrund ihrer Konstruktion in der Lage nach einem Teilchendurchgang schnell ein Signal zur Bildung einer Triggerentscheidung zu senden. Damit eignen sich diese Kammern zur Erzeugung einer Triggerentscheidung. Diese betrifft die Selektion von Ereignissen und die Bestimmung der z-Koordinate des Wechselwirkungspunktes.

Die radiale Ausdehnung und die jeweilige Akzeptanz der Detektorkomponenten des zentralen Spurkammersystems sind in Tabelle 3.2 angegeben.

	radiale Position [mm]		z-Position [mm]		Akzeptanz in ϑ [°]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
<i>CST</i>	58	98	-178	178	30	150
<i>CIP2000</i>	150	200	-1100	1100	8	172
<i>CJC1</i>	203	451	-1125	1075	11	170
<i>COZ</i>	460	485	-1105	1055	25	156
<i>COP</i>	493	523	-1107	1065	25	156
<i>CJC2</i>	530	844	-1125	1075	26	154

Tabelle 3.2.: Die radialen Positionen der einzelnen Subkomponenten und Akzeptanzen im Polarwinkelbereich ϑ des inneren Spurkammersystems sind angegeben. Die Position relativ zum nominellen Wechselwirkungspunkt ist mit der z-Position gegeben.

¹³Central Inner Proportional Chamber 2000 [5], diese vereinigt die in der HERA-I Phase benutzte CIP und CIZ in einem System.

¹⁴Central Outer z-Chamber

¹⁵Central Outer Proportional Chamber

3.2. Das H1-Triggersystem

Die Elektronen- und Protonenstrahlpakete passieren den Wechselwirkungspunkt des H1-Detektors mit einer Frequenz von etwa 10,4 MHz. Die Daten der Wechselwirkungen können von der H1-Datennahme nur mit 10 Hz dauerhaft gesichert werden. Das Auslesesystem kann also nicht alle Detektordaten für jede Strahlkreuzung verarbeiten, so dass im Nachhinein interessante Ereignisse selektiert werden könnten. Stattdessen werden aus der Rate der ep -Ereignisse die interessantesten physikalischen Ereignisse im laufenden Betrieb selektiert und Untergrundereignisse nach Möglichkeit effizient verworfen.

Diese effiziente Datenreduktion wird vom H1-Triggersystem [21, 33] in einem mehrstufigen Prozess, an dessen Ende die Daten mit 10 Hz gespeichert werden können, ausgeführt. Das Triggersystem muss dabei zwischen den seltenen interessanten Ereignissen und den Untergrundereignissen differenzieren können. Diese bestehen im Wesentlichen aus der von den Elektronen emittierten Synchrotronstrahlung, sowie den durch schlechte Vakuumbedingungen eintretenden Strahl-Restgas Ereignissen. Außerdem können die Teilchen durch das Verlassen des Strahlorbits mit dem Strahlrohr wechselwirken.

Das vierstufige Triggersystem ist in Abbildung 3.4 zusammen mit den wichtigsten Laufwegen von Triggersignalen und Daten im System gezeigt. Die drei ersten Triggerstufen arbeiten synchron zu den im Abstand¹⁶ von 96 ns stattfindenden Strahlkreuzungen. Dafür werden die Detektordaten kontinuierlich in einen Ringspeicher (Datenpipeline) geschrieben, diese Datenpipelines laufen synchron mit der ersten Triggerstufe.

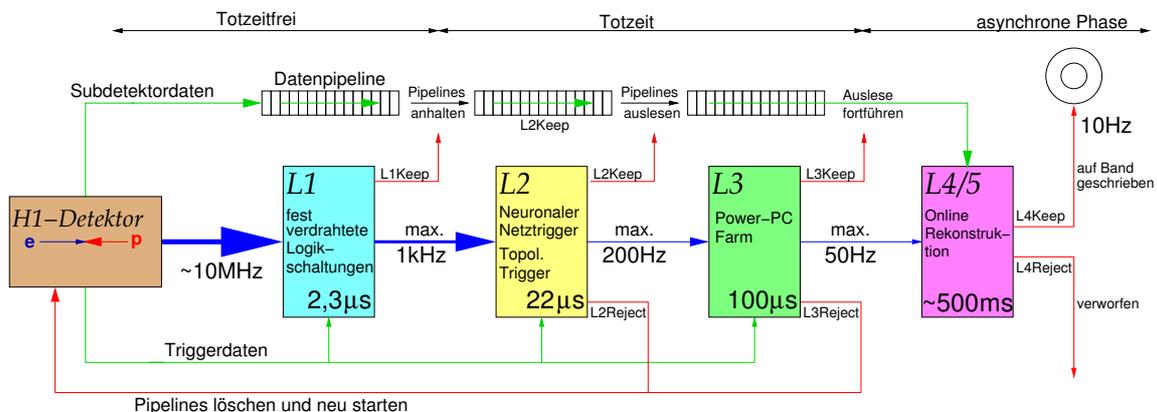


Abbildung 3.4.: Das H1-Triggersystem mit den vier Triggerstufen. Von diesen arbeiten L1, L2 und L3 synchron zur HERA-Uhr, lediglich die erste Stufe arbeitet dabei totzeitfrei. Der komplette Prozess ist im Text genauer beschrieben. (Skizze nach [53])

Die jeweiligen Triggersysteme der ERSTEN TRIGGERSTUFE bilden innerhalb von $2,3 \mu\text{s}$ eine eigene Triggerentscheidung. Sofern ein Ereignis von einem Triggersystem erkannt und damit als interessant bewertet ist, wird ein so genanntes Triggererelement (TE¹⁷) an die Zentrale Triggerlogik (CTL¹⁸) gesendet. Die Ereignisrate wird in der ersten Triggerstufe mittels logischer Kombination von 256 Triggererelementen zu 128 Subtriggern auf

¹⁶Dieses Zeitintervall wird auch als *HERA-Clock* bezeichnet.

¹⁷Ein Triggererelement ist ein Bit mit der Bedeutung *Falsch* oder *Wahr*.

¹⁸Central Trigger Logic

eine L1-Ausgangsrate von etwa 1 kHz reduziert. Sobald eine positive Triggerentscheidung (L1Keep) für einen Subtrigger vorliegt, wird die Datenpipeline angehalten und die Triggerdaten an die zweite Triggerstufe übertragen. Damit beginnt die Totzeit des Detektors.

Eine positive Entscheidung der ZWEITEN TRIGGERSTUFE (L2Keep) wird nach einer Latenzzeit von $22 \mu\text{s}$ generiert, falls die L1-Entscheidung durch die Kombination von Signalen der Subdetektoren verifiziert worden ist. Um die Verifizierung durchzuführen, werden topologische Korrelationen¹⁹ [34] und Techniken wie neuronale Netze²⁰ [35] benutzt. Wird das Ereignis validiert, kommt es zu einem L2Keep. Die Datenpipelines werden daraufhin angehalten und die Datenauslese des Detektors beginnt. Sofern die Subtrigger des L2-Systems die L1-Entscheidung validiert haben, werden die Triggerdaten an die dritte Triggerstufe gesendet.

Die DRITTE TRIGGERSTUFE wird zur Zeit in das bestehende H1-Triggersystem integriert. Diese Triggerstufe wird bis jetzt ausgelassen, somit wird keine weitere Datenreduktion erreicht. Die Eingangsrate der vierten Triggerstufe liegt bei 50 Hz, so dass aufgrund der höheren Datenrate in der HERA-II Phase Daten verworfen werden müssen.

Die Eingangsrate der dritten Triggerstufe wird bei etwa 200 Hz liegen. Eine Ratenreduktion auf etwa 50 Hz lässt sich durch die höhere Selektivität der dritten Triggerstufe erreichen. Für die Selektion von exklusiven physikalischen Endzuständen stehen $100 \mu\text{s}$ zur Verfügung, danach ist eine L3-Triggerentscheidung (L3Reject) zu fällen. Das L3-System und die dort eingesetzte Prozessorfarm zur Ereignisselektion wird detailliert in Kapitel 5 beschrieben. Die Daten aus den Pipelines werden anschließend zur vollen Ereignisrekonstruktion an das L4/5-System gesendet.

Die VIERTE TRIGGERSTUFE der HERA-II Phase ist aus dem L4- und L5-System der HERA-I Phase zusammengesetzt. Dieses neue L4/5-System besteht aus einer Linux-Prozessorfarm. Mit Hilfe dieser Farm wird die abschließende Ereignisrekonstruktion innerhalb von etwa 500 ms ausgeführt. Die L4/5-Ausgangsrate von 10 Hz lässt eine dauerhafte Speicherung der Daten zu, welche pro Ereignis eine Größe zwischen 100 und 150 kByte besitzen.

Gelingt es nicht die Eingangsrate der vierten Triggerstufe auf 50 Hz zu beschränken, muss die Rate der einzelnen Subtriggersysteme reduziert werden. Dies erfolgt mit Berücksichtigung eines so genannten Triggerkonzeptes. Dort wird definiert, welche Ereignisse physikalisch interessant sind, deren Rate sollte damit auf keinen Fall reduziert werden. Die Reduzierung der einzelnen Subtrigger deren Rate zu hoch ist, wird mit einem festen Parameter (*Prescale*-Faktor) durchgeführt. Durch diesen Faktor verwirft das Triggersystem jedes n-te physikalische Ereignis, um die maximale Eingangsrate von L4/5 einzuhalten.

¹⁹Auch L2TT genannt.

²⁰Dieser L2-Trigger wird auch L2NN genannt.

4. Der schnelle Spurtrigger

Die Prozesse der schweren Quarkphysik ereignen sich zu einem großen Anteil im niedrigen Q^2 -Bereich, der durch hohe Untergrundraten gekennzeichnet ist. Dieser Untergrund besteht, wie bereits ausgeführt, nicht nur aus unerwünschten Ereignissen, sondern auch aus ep -Ereignissen. Ohne verbesserten Trigger wird ein hoher Anteil der gesuchten interessanten Ereignisse durch *Prescale*-Faktoren verworfen, da die L4/5 Eingangsrate des H1-Triggersystems begrenzt ist. Aus diesen Gründen wurde von der H1-Kollaboration ein Konzept für einen schnellen Spurtrigger (FTT¹) [26, 27, 36] entwickelt. Dieser ermöglicht eine höhere Selektivität auf frühen Triggerstufen, so dass möglichst alle gesuchten physikalisch interessanten Ereignisse gesichert werden können. Außerdem wird die, zu kleinen Impulsquadraten hin zunehmende, Anzahl von Untergrundereignissen wirkungsvoller verworfen.

Zunächst wird die technische Realisierung und Funktionsweise der ersten beiden Triggerstufen des FTT, sowie deren Simulation vorgestellt. Die dritte Triggerstufe (L3) des FTT ist der Schwerpunkt dieser Arbeit, deshalb wird auf die Hardware und Software der dritten Triggerstufe in einem gesonderten Kapitel 5 eingegangen.

4.1. Konzept und technische Realisierung

Der schnelle Spurtrigger verwendet die Daten ausgewählter Drahtlagen der zentralen Jetkammern (CJC1 und CJC2). In Abbildung 4.1 ist ein Ausschnitt der $r\varphi$ -Ebene der zentralen Spurkammern gezeigt, die verwendeten vier Triggerlagen sind durch dick gestrichelte Linien hervorgehoben. Eine Triggerlage besteht dabei aus den radial zusammengefassten Triggerzellen, welche jeweils aus drei Drähten bestehen. Den drei Triggerlagen in der ersten Spurkammer sind damit 30 Triggerzellen zugeordnet. Aufgrund des größeren Radius sind der in der zweiten Spurkammer befindlichen Triggerlage 60 Triggerzellen zugeordnet. Simulationen haben gezeigt, dass die getroffene Auswahl der genutzten Drähte mit vertretbarem technischen und finanziellen Aufwand zu realisieren ist [26, 27]. Mit den Daten dieser ausgewählten Drähte soll der FTT Entscheidungen fällen können, die auf Informationen von bis zu 48 Spuren basieren. Damit sind 98 % der physikalisch interessanten Ereignisse erfaßt [36]. Die Spuren werden ab einem minimalen Transversalimpuls von $p_t = 100 \text{ MeV}$ vom FTT rekonstruiert. Die geometrische Akzeptanz des schnellen Spurtriggers entspricht der Akzeptanz der CJC1 von $25^\circ < \vartheta < 155^\circ$.

In Abbildung 4.2 ist das umfangreiche Hardwarekonzept für die Realisierung des ausgeführten FTT-Konzeptes dargestellt. Im gesamten FTT-System kommen programmierbare Logikbausteine (FPGAs²) zum Einsatz. Ein FPGA ermöglicht eine hohe Flexibilität der Programmierung. Elektronische Karten mit integrierten FPGAs finden deshalb in immer größerem Maßstab ihre Anwendung in der Hochenergie-Physik. Der FPGA besteht aus Eingangs-/Ausgangsblöcken, die den Rand des Chips bilden und den konfigurierbaren

¹Fast Track Trigger

²Field Programmable Gate Arrays

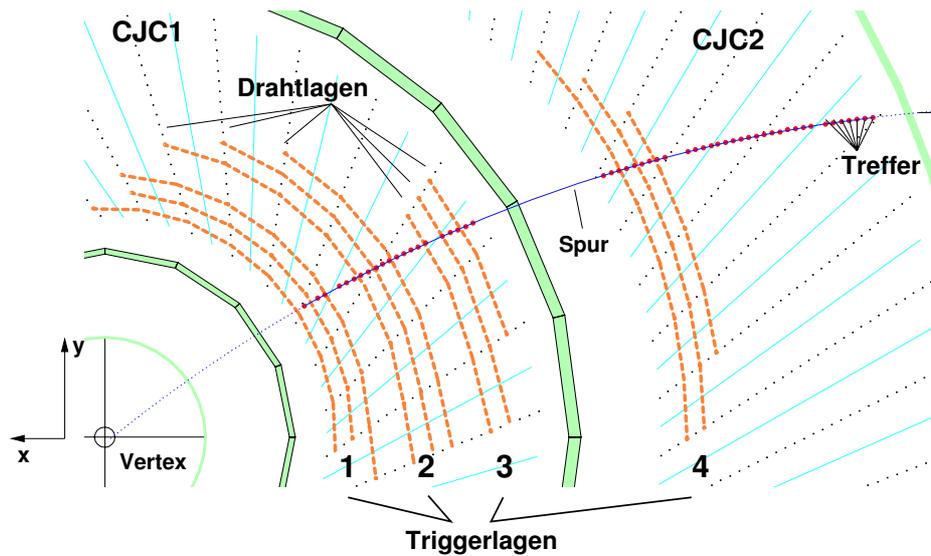


Abbildung 4.1.: Der FTT benutzt vier Triggerlagen in der CJC1 und CJC2. Jeweils drei Drähte der Drahtlagen – erkennbar an den dick gestrichelten Linien – bilden eine Triggerzelle, die wiederum radial zu vier Triggerlagen zusammengefaßt sind. (Skizze nach [45])

Logikbausteinen die in Form einer Matrix im Inneren des Chips liegen. Die Logikbausteine sind für den Austausch von Signalen miteinander verschaltet, dies beeinträchtigt jedoch nicht die Flexibilität der Programmierung. Diese Bausteine ermöglichen eine parallele Datenverarbeitung, welche die notwendigen Rechenschritte im Vergleich zu gewöhnlichen Chips minimiert. Weitere Details zu FPGAs und deren Programmierung können in [37] gefunden werden.

Der FTT ist in drei Teile unterteilt, das sind die erste, zweite und dritte Triggerstufe mit ihrem jeweiligen speziellen Hardwarekonzept. Im Folgenden werden die elektronischen Komponenten der ersten (L1) und zweiten Triggerstufe (L2) erläutert.

Zum Datenaustausch zwischen den einzelnen Subsystemen wird eine LVDS-Verbindung³ mit Übertragungsraten von bis zu 600 MByte/s genutzt. Zur Versendung von Daten und Systemnachrichten im gesamten FTT-System, wurde ein spezielles Nachrichtensystem⁴ entwickelt [38]. Darüberhinaus ist mit den versendeten Nachrichten auch die Steuerung von Prozessen möglich.

Jedem versendeten Datenwort und jeder Systemnachricht wird dabei ein definierter Kopf zugeordnet. In diesem Kopf wird das Ziel des Wortes festgelegt, welches damit jede Karte und jeden programmierbaren Baustein innerhalb des FTT erreichen kann. Alle programmierbaren Bausteine verfügen in ihrer Programmierung über so genannte Wegetabellen⁵. Anhand dieser Tabelle werden die aus verschiedenen Quellen kommenden Daten an die, im Datenkopf verlangte, elektronische Komponente weitergeleitet. Die Datenworte werden dabei nicht nur zwischen verschiedenen elektronische Karten, sondern auch innerhalb von Karten den gewünschten Zielen zugeordnet.

³Low Voltage Differential Signaling

⁴Die in Anhang A vorgestellte Auslesekontrolle wird mit Hilfe dieses Nachrichtensystems ermöglicht.

⁵Auch der Versand von Spursegmenten wird dort aufgeschlüsselt. Eine Datenwegetabelle kann deshalb leicht 500 Einträge enthalten.

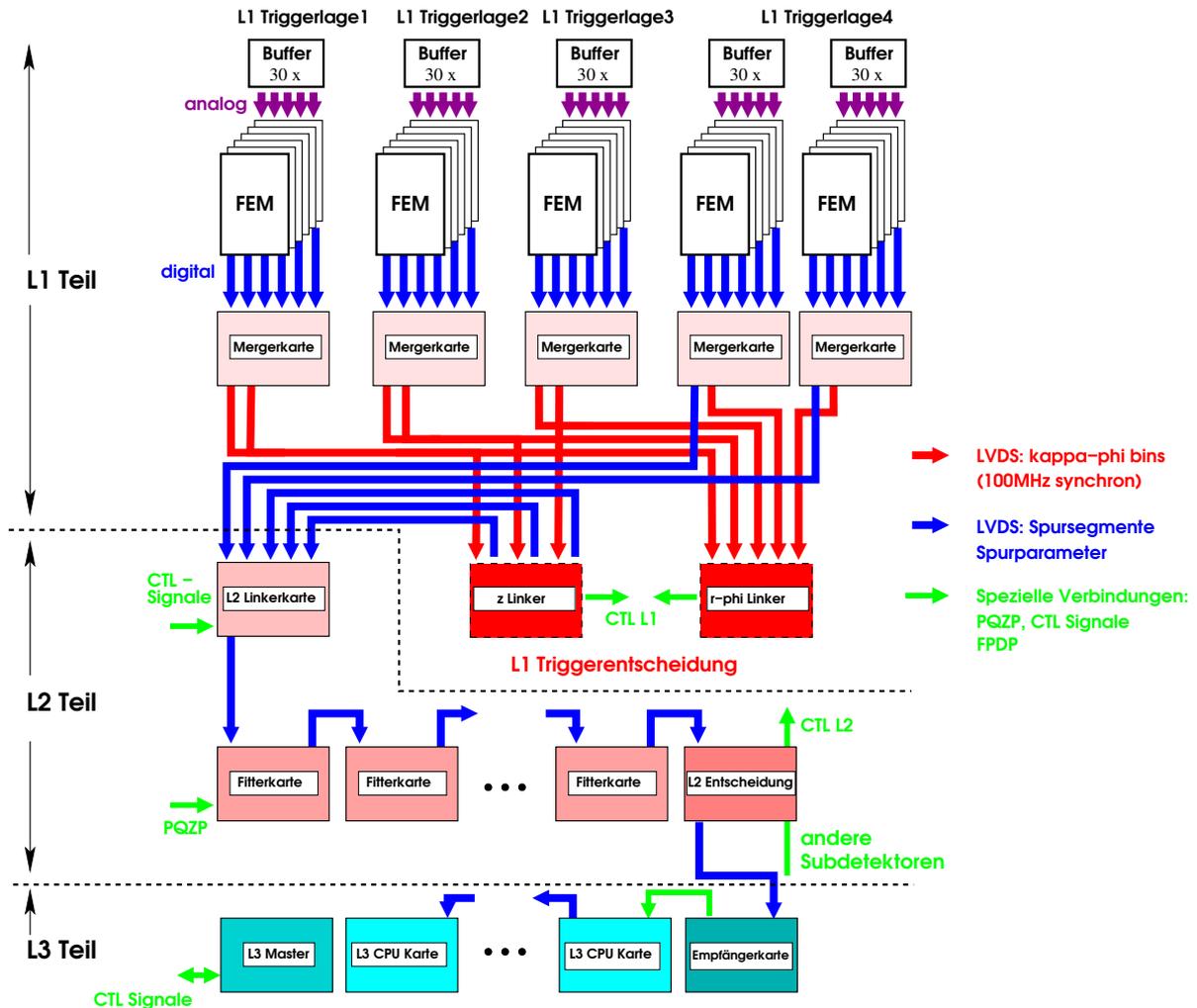


Abbildung 4.2.: Die technische Realisierung des FTT. Das mehrstufige Triggersystem FTT und die umfangreiche Hardware wird im Text beschrieben. Auf die technische Realisierung der dritten Triggerstufe wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen. (Skizze nach [45])

4.2. Erste Triggerstufe des FTT

Die eingehenden analogen Signale der ausgewählten Drahtlagen der CJC1 und CJC2 werden von 30 Front End Modulen (FEM) für den FTT aufbereitet. Auf den FEMs sind für die notwendige Digitalisierung FADCs⁶ integriert. Die FADCs digitalisieren die analogen Signale von fünf benachbarten Triggerzellen einer Triggerlage. Zur Treffersuche kommt der Qt -Algorithmus zum Einsatz, der den Zeitpunkt t eines Signals oberhalb einer Rauschschwelle bestimmt. Treffer sind durch einen raschen Anstieg der Signalhöhe, die der auf dem Draht deponierten Ladung Q proportional ist, charakterisiert. Dieser Algorithmus erreicht eine Präzision von etwa 0,5 ns und wird innerhalb von $0,2 \mu\text{s}$ mit Hilfe von FPGAs ausgeführt. Aus den Ergebnissen des Qt -Algorithmus für beide Drahtenden kann außerdem eine z-Position mit einer Genauigkeit von 6 cm angegeben werden [36].

⁶Flash Analog Digital Converter

Für jede der vier Triggerlagen wird dann einzeln mit grober Granularität nach Spursegmenten gesucht. Ein gültiges Spursegment wird durch eine 3-Treffer Kombination innerhalb einer Triggerzelle gebildet. Die in die FPGAs integrierten Schieberegister sind mit den Trefferinformationen gefüllt. In Abbildung 4.3 sind die Schieberegister für eine Triggerzelle mit drei Drähten gezeigt.

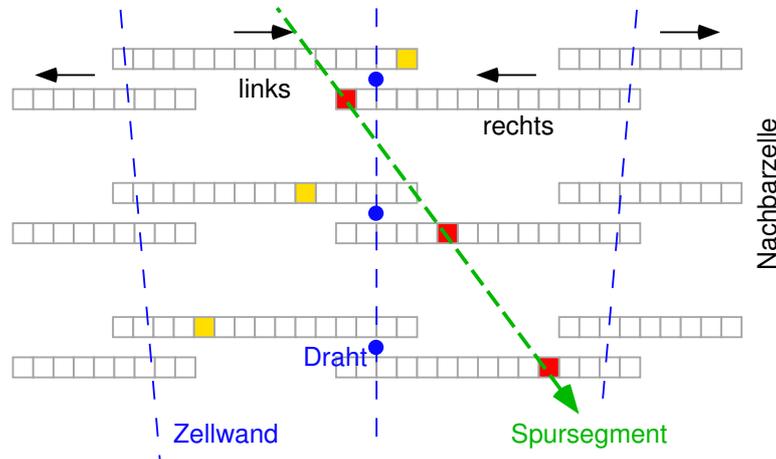


Abbildung 4.3.: Für eine Triggerzelle werden zwei Schieberegister angelegt, da a priori nicht entschieden werden kann auf welcher Seite das ionisierende Teilchen den Signaldraht passiert hat. Diese Mehrdeutigkeit wird erst beim Linkingprozess innerhalb der ersten Triggerstufe gelöst. Die Position eines Treffers (in rot bzw. gelb markiert) in den Schieberegistern ist äquivalent zum Abstand des Teilchens vom Signaldraht. Durch den kontinuierlichen Vorschub des Registers mit 12,5 ns entsteht ein Abbild des Spursegmentes. Die Treffer werden an den äußeren Rändern eingefüllt und bewegen sich in Pfeilrichtung (schwarz) im Schieberegister fort. Ein Spursegment (grüner Pfeil in senkrechter Richtung) wird durch drei Treffer, die eine Gerade bilden, definiert.

Auf diesem Niveau ist nicht bekannt, an welcher Seite des Drahtes die Spur vorbeigegangen ist. Deshalb müssen zwei Schieberegister für jeden Draht einer Triggerzelle angelegt sein. Die Ambiguitäten werden erst auf dem Niveau des Verbindens (*Linken*) der gefundenen Spursegmente über mehrere Triggerlagen hinweg aufgelöst. Die Zeitinformation ist durch die kontinuierliche Digitalisierung mit 80 MHz gegeben, dieses führt zu einem Abstand zwischen zwei Einträgen in den Schieberegistern von 12,5 ns. Das entstandene Bitmuster in den Schieberegistern enthält deshalb die zum Spursegment des geladenen Teilchens gehörigen Driftzeiten.

Den Spursegmenten werden durch den Abgleich mit im voraus berechneten gültigen Spursegmentmustern Parameter wie die Spurkrümmung κ und der Azimutalwinkel φ zugeordnet. Für den Musterabgleich sind bis zu 2000 im voraus berechnete gültige Spursegmentmuster (*Masken*) nötig. Aufgrund der geringen Latenzzeit der ersten Triggerstufe werden jeweils vier benachbarte Triggerzellen mit einer logischen *or*-Operation verknüpft. Daraus ergibt sich eine effektive Frequenz von 20 MHz, so dass die Anzahl der abzugleichenden Muster deutlich sinkt. Zur schnellen Mustererkennung eignen sich besonders gut

CAMs⁷, diese sind ebenfalls in den FPGAs integriert. Ein CAM arbeitet dem Prinzip des herkömmlichen RAM⁸ entgegengesetzt: Er vergleicht das eingehende Muster und gibt die Adresse des erkannten Musters, sofern vorhanden, zurück. Mit dieser Adresse kann nun weitergearbeitet werden, da zu jedem gültigen Muster ein korrespondierender $(\kappa - \varphi)$ -Wert gehört.

Die Daten der Spursegmente werden auf den Mergerkarten gesammelt und an die L1-Linker Karte (MPB⁹) [43] gesendet. Aufgabe der L1-Linker Karte ist die Versendung der L1-Triggerentscheidung an die zentrale Triggerlogik und die Suche nach gültigen Spuren. Im Falle einer positiven Triggerentscheidung wird die verfeinerte Analyse der zweiten Triggerstufe ausgelöst. Der gültige Spurkandidat der Spursegmente wird durch das sogenannte Linking gebildet. Das Verbinden der Spursegmente verläuft analog dem auf der zweiten Triggerstufe durchgeführten Linking, deshalb wird der Prozess dort erläutert. Innerhalb der Latenzzeit der ersten Triggerstufe von $2,1 \mu\text{s}$ kann eine Triggerentscheidung basierend auf Transversalimpulsen und Spurmultiplicitäten gefällt werden. Die möglichen Triggerelemente der ersten Stufe sind in Tabelle 4.1 angegeben.

L1 TE	Bedingung	L1 TE	Bedingung
0	FTT t_0	16 – 17	Anzahl Spuren über 1,8 GeV
1 – 3	Anzahl Spuren über 100 MeV	18	gültiges Spursegment
4 – 5	Anzahl Spuren über 125 MeV	19 – 21	Ladung Q_{tot} (kodierte)
6 – 7	Anzahl Spuren über 166 MeV	22 – 24	verschiedene back-to-back Topologien
8 – 9	Anzahl Spuren über 250 MeV	25 – 26	verschiedene Jet Topologien
10 – 11	Anzahl Spuren über 400 MeV	27 – 28	E_t Schwellen
12 – 13	Anzahl Spuren über 600 MeV	29 – 30	p_t Schwellen
14 – 15	Anzahl Spuren über 900 MeV	31	V_{ap} Schwelle

Tabelle 4.1.: Mögliche Triggerelemente (TE) der ersten Triggerstufe des FTT, die einer globalen Triggerentscheidung zur Verfügung stehen.

4.3. Zweite Triggerstufe des FTT

Auf der zweiten Triggerstufe wird die mit einer Frequenz von 80 MHz gespeicherte Information aus den Datenpipelines verwendet, um unter erneuter Nutzung der Hardware der ersten Triggerstufe eine feinere Spursegmentsuche auszuführen. Hierzu wird die Information aus den Schieberegistern mit bis zu 100.000 vorberechneten Masken (pro Zelle) verglichen, damit läßt sich eine um etwa einen Faktor 10 gesteigerte Auflösung in der Spurkrümmung κ und dem Azimuthwinkel φ erreichen. Die verfeinerten Spursegmente werden in ein 40×640 Einträge großes $(\kappa - \varphi)$ -Histogramm eingetragen, damit wird die Suche nach gültigen Spurkandidaten ausgeführt. Eine Spur gilt als gefunden, wenn

⁷Content Adressable Memorys

⁸Random Adressable Memory

⁹Diese genannten Karten und die Fitterkarte sind vom gleichen Grundtyp. Genutzt wird hier das Multi Purpose Board (MPB), diese Vielweckkarten sind von der Firma Super Computing Systems (www.scs.ch) speziell für den FTT entwickelt worden.

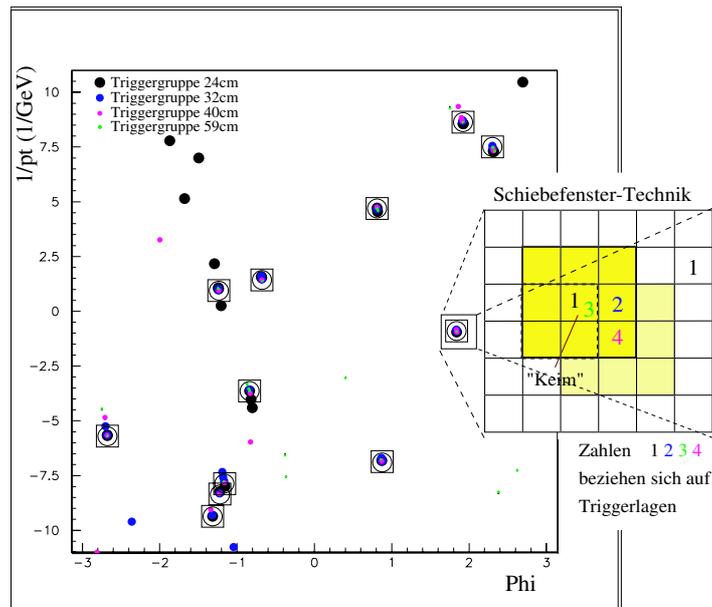


Abbildung 4.4.: Funktionsweise des Verbindens (Linken) von Spursegmenten in L2, für jede Triggerlage wird ein $(\kappa - \varphi)$ -Histogramm mit den Werten der gefundenen Spursegmente angelegt. Das Zusammenfügen der Segmente (Linken) zu gültigen Spuren wird mit Hilfe eines Suchfensters durchgeführt. Mindestens zwei Einträge an etwa der gleichen Position im Histogramm kennzeichnen eine Spur als gefunden, [39].

mindestens Einträge aus zwei Triggerlagen mit (nahezu) gleichen κ - und φ -Werten existieren. Zur Berücksichtigung von Migrationseffekten werden die Nachbarn der Spursegmente durch ein (3×3) Fenster miteinbezogen. In Abbildung 4.4 sind die Spursegmente der einzelnen Triggerlagen durch unterschiedlich große ausgefüllte Kreise gekennzeichnet. Die zusammengefügte Spursegmente sind mit einem Ring eingekreist, zum Vergleich sind die Spuren der vollständigen Rekonstruktion (Kasten) gleichfalls gezeigt.

Die Information der verbundenen Spursegmente wird zusammen mit der z -Information einem Anpassungsalgorithmus¹⁰ zugeführt. Für diese Anpassungsprozedur werden die Fiterkarten¹¹ (siehe in Abbildung 4.2: L2 Teil) genutzt. Diese Karten sind in der Lage mit Hilfe von 24 digitalen Signal Prozessoren (DSP¹²) bis zu 48 Spurfits auszuführen [39]. Der nichtiterative Anpassungsalgorithmus berechnet verfeinerte Spurparameter durch die Anpassung eines Kreissegmentes. Damit stehen sehr präzise Parameter dreidimensionaler Spuren zur Verfügung.

Zunächst werden die Koordinaten κ und φ mit einer Anpassung in der $r\varphi$ -Ebene bestimmt. Die Annahme dabei ist, dass die Spur ihren Ursprung im über eine Datennahme gemittelten Vertex hat. Diese Annahme ist berechtigt, da sich die Strahlachsen zwischen den Datennahmen nicht wesentlich ändern. Eine weitere Anpassung wird unter Benutzung der z -Positionen des Vertex in der rz -Ebene ausgeführt. Für die Bestimmung der z -Position des Vertex können zwei verschiedene Subsysteme verwendet werden. Eine ist

¹⁰Hier wird ein nichtiterativer Kreisfitalgorithmus nach Karimäki [44] genutzt.

¹¹Auch diese Karten sind vom Typ MPB.

¹²Digital Signal Processor

der vom z-Vertextrigger [40] übermittelte Wert, eine andere bestände darin, den vom FTT bestimmten Wert des z-Vertex [41] zu benutzen.

Damit stehen für die anschließende Analyse auf L3 die Parameter von dreidimensionalen Spuren zur Verfügung. Ein vereinfachtes Abbild einer Spur in der xy -Ebene ist in Abbildung 4.5 skizziert. Die Spuren werden mit den fünf Parametern einer Helix beschrieben.

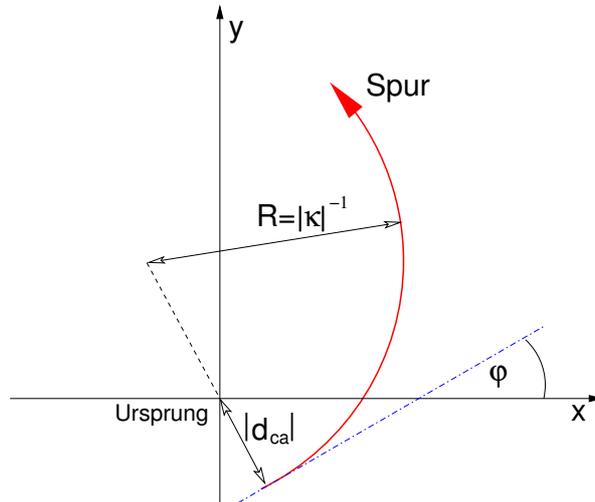


Abbildung 4.5.: Definition der Spurparameter κ , φ und d_{ca} einer dreidimensionalen Spur projiziert in die xy -Ebene.

- Die Spurkrümmung κ stellt ein Maß für den Transversalimpuls einer Spur dar und ist folgendermaßen definiert:

$$\kappa[\text{m}^{-1}] = -Q \cdot 0,29979 \cdot B[\text{T}] \cdot \frac{1}{p_t[\text{GeV}]} \quad (4.1)$$

Q bezeichnet die Ladung des Teilchens einer Spur. Um den mit p_t bezeichneten Transversalimpuls zu messen, wird ein Magnetfeld mit Feldstärke B angelegt. Der Zahlenfaktor resultiert aus der Messung des Transversalimpulses p_t in Einheiten von GeV.

- Der Abstand d_{ca} ¹³ ist die Größe, welche den geringsten Abstand des Kreises zum Ursprung kennzeichnet, siehe auch Abbildung 4.5.
- Der Azimuthalwinkel φ wird zwischen der x-Achse des H1-Koordinatensystems und der Tangente an den Kreis im Punkte des geringsten Abstandes d_{ca} , wie in Abbildung 4.5 gezeigt, definiert.
- Der Polarwinkel ϑ ist der Winkel zwischen der Tangente an den Kreis im Punkt des geringsten Abstandes d_{ca} und der z-Achse.
- Die Koordinate z_0 ist der Abstand auf der z-Achse zwischen dem Koordinatenursprung und dem Punkt des geringsten Abstandes d_{ca} .

¹³distance of closest approach, Abstand der geringsten Entfernung.

Die Ergebnisse der Kreisanpassung werden zur Erstellung einer L2-Triggerentscheidung an die L2-Entscheider Karte geleitet. Die Entscheidung setzt sich aus den in Tabelle 4.2 definierten Triggerelementen zusammen.

L2 TE	Bedingung	L2 TE	Bedingung
0 – 2	Anzahl Spuren über 100 MeV	16 – 18	verschiedene back-to-back Topologien
3 – 4	Anzahl Spuren über 200 MeV	19 – 22	verschiedene Jettopologien
5 – 6	Anzahl Spuren über 400 MeV	23	einzelne Hemisphäre
7 – 8	Anzahl Spuren über 900 MeV	24 – 25	E_t Schwellen
9 – 10	Anzahl Spuren über 2 GeV	26 – 27	p_t Schwellen
11 – 12	Anzahl Spuren über 5 GeV	28	V_{ap} Schwelle
13 – 15	Ladung Q_{tot} (kodiert)	29 – 31	nicht belegt

Tabelle 4.2.: Mögliche Triggerelemente (TE) der zweiten Triggerstufe des FTT, die einer globalen Triggerentscheidung zur Verfügung stehen.

Die Übertragung dieser Spurparameter an die dritte Triggerstufe kann in unterschiedlichen Formaten erfolgen. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes zur Berechnung trigonometrischer Funktionen wird nicht der Winkel φ , sondern eine Linearkombination der Funktionen $\sin(\varphi)$ und $\cos(\varphi)$ übertragen. Diese Linearkombination wird mit φ^* bezeichnet und steht in annähernd linearem Zusammenhang mit dem Azimuthalwinkel φ , wie in Abbildung 4.6 zu erkennen. Die Konstruktion dieser Variable wird ausführlich in 6.3 erklärt.

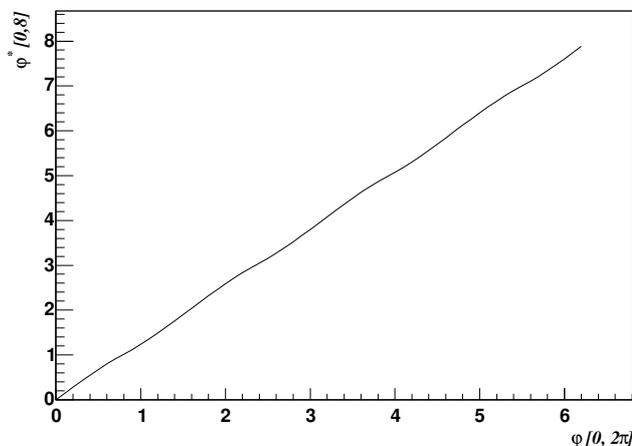


Abbildung 4.6.: Der Zusammenhang zwischen φ und φ^* ist in guter Näherung linear.

Die oben genannten Spurparameter können in Form eines kompakten Datenwortes, bestehend aus $(\kappa, \varphi^*, \cot(\vartheta))$, versendet werden. Damit wird Übertragungszeit gespart. Die Variable φ^* wird in L2 bestimmt und enthält in kodierter Form die Winkelfunktionen. Innerhalb von L3 wird φ^* wieder in die Winkelfunktionen $\sin(\varphi)$ und $\cos(\varphi)$ zurückberechnet. Das kostet Rechenzeit, die aufgrund der Latenzzeit der dritten Triggerstufe nicht mehr für Selektionsalgorithmen zur Verfügung steht. Die andere Möglichkeit besteht im direkten Versand der Winkelfunktionen $\sin(\varphi)$ und $\cos(\varphi)$. Dadurch steigt die Übertragungszeit, es wird jedoch Rechenzeit gespart, da φ^* nicht auf L2 berechnet und auf L3 wieder in die Winkelfunktionen zurückberechnet werden muss. Aus diesen beiden

Möglichkeiten muss diejenige gewählt werden, die insgesamt weniger Zeit kostet und hinreichend stabil und präzise arbeitet. Die Entscheidung wird erst im laufenden Betrieb des gesamten FTT-Systems getroffen, das L3-System ist in der Lage beide Datenformate zu verarbeiten.

Im Falle einer positiven Triggerentscheidung (L2Keep) werden die berechneten Spurparameter mit der LVDS-Verbindung an die dritte Stufe des schnellen Spurtriggers übermittelt. Der Umgang mit den im kompakten Datenformat übertragenen Spurparametern wird in Abschnitt 6.3 eingehend behandelt. Die dritte Triggerstufe nutzt diese Spurparameter zur Berechnung von Größen, die aus den Transversalimpulsen abgeleitet werden. Mit diesen sind die Selektionsalgorithmen in der Lage innerhalb von $100\ \mu\text{s}$ Signaturen exklusiver Endzustände zu erkennen.

Die zweite Triggerstufe befindet sich zur Zeit in der letzten Phase des Aufbaus, deshalb kann L3 nicht direkt mit den Spurdaten der zweiten Triggerstufe getestet werden. Alle Eingangsdaten für die dritte Triggerstufe werden mit der hardwarenahen Simulation (*FttEmu4*) verarbeitet, diese umfasst die erste und zweite Triggerstufe und ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.4. Simulation

Um das Hardwarekonzept des schnellen Spurtriggers zu entwickeln, wurden die erste und zweite Triggerstufe des FTT in eine hardwarenahe Simulation übersetzt. Das Programm *FttEmu4* wurde in C programmiert, dabei wurde auf die Modularität des Programmes geachtet [39, 45]. Damit das Programm eine modulare Struktur besitzt, ist es nötig eine Vielzahl von Datenbanken¹⁴ zu erzeugen und auch zu nutzen. Das (vereinfachte) Funktionsprinzip der Simulation ist in Abbildung 4.7 gezeigt. Prinzipiell werden Rohdaten (Drahttreffer) vom Simulationsprogramm verarbeitet. Die Rohdaten können sowohl direkt als Treffer in den zentralen Spurkammern (CJC-Treffer) verfügbar sein, oder aus den rekonstruierten CJC-Spuren zurückgerechnet werden. Der dann folgende Programmablauf folgt dem Prozessablauf in der Hardware (siehe Kapitel 4.2 und 4.3): Zuerst werden also Spursegmente aus der CJC-Trefferinformation gebildet. Danach werden die Spursegmente zu gültigen Spuren verbunden. Um diese Berechnungen durchzuführen, müssen der Simulation gültige Masken und Daten der Kalibrierung verfügbar gemacht werden. Die Schnittstelle für die in der Abbildung 4.7 angedeutete L3 Ereignisrekonstruktion ist in der Simulation implementiert, so dass Selektionsalgorithmen der Benutzergruppen eingefügt werden können. Das Ergebnis der prozessierten CJC-Treffer sind die Informationen der ersten und zweiten Triggerstufe, also zum Beispiel: Spuren, Triggerentscheidungen, Segmente und Treffer, wie sie der FTT im realen Betrieb bestimmen und errechnen würde.

Es gibt mehrere Möglichkeiten Daten mit *FttEmu* zu prozessieren, diese werden hier kurz erläutert:

TREFFERINFORMATION

Hier wird die reine Trefferinformation der CJC-Auslese benutzt. Dabei werden die CJC-Treffer, die auf den Triggerlagen des FTT liegen, in eine Eingangsbank (TT1H-

¹⁴Hierbei kommt das so genannte **B**ank **O**bject **S**ystem (BOS) zum Einsatz, dieses erlaubt die Verwaltung von strukturierten Datenbanken in *Fortran77*.

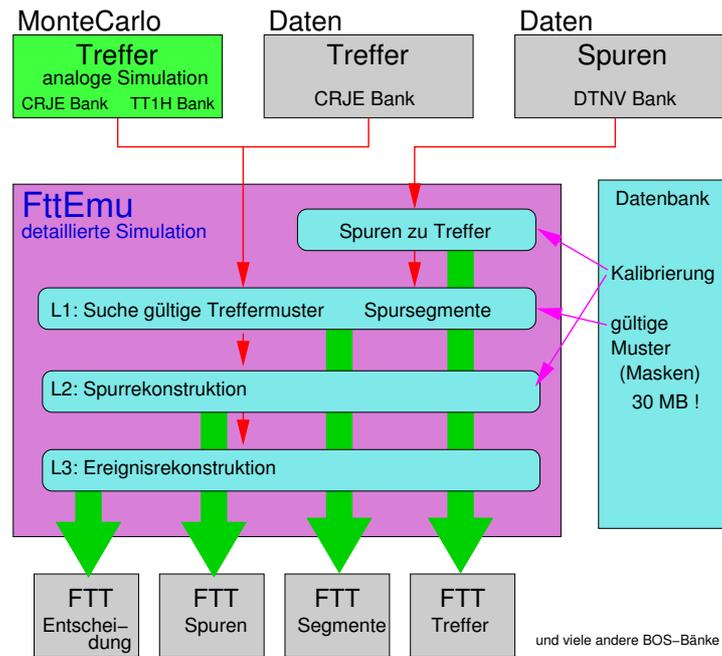


Abbildung 4.7.: Vereinfachtes Funktionsprinzip der Simulation des FTT. Die möglichen Eingangsdaten sind Treffer oder Spuren aus denen die Hits zurückberechnet werden. Die vollständige Hardwaresimulation des FTT stellt Ergebnisse (Segmente, Spuren, etc.) zur Verfügung, wie sie auch im Betrieb des FTT erzeugt werden. Die Ereignisanalyse der dritten Triggerstufe ist nicht implementiert. (Skizze nach [48])

Bank) der Simulation kopiert und dann, wie oben bereits beschrieben, behandelt. Der Kopiervorgang an sich ist schnell, jedoch sind die Trefferinformationen durch sehr große Datenmengen charakterisiert. Diese sind nicht auf schnellen Massenspeichermedien gesichert, sondern nur über langsame Bandroboter abgreifbar.

SPURINFORMATION

Es ist möglich aus den voll rekonstruierten Spurdaten (DTNV-Bank) die zugrunde liegenden Treffer zurückzurechnen. Die oben angesprochenen Nachteile kommen hier nicht zum Tragen, die Datengröße der Spurdaten ist wesentlich geringer und erlaubt einen schnelleren Datenzugriff. Hier werden die Einzeltreffer von der Simulation um $150\ \mu\text{m}$ verschmiert. Mit dieser Verschmierung wird eine ähnliche Auflösung, wie diejenige der zentralen Jetkammern erreicht, siehe hierzu Kapitel 3.1.1.

MONTECARLO INFORMATION

Die dritte und letzte Möglichkeit beinhaltet die für Analysen mit dem FTT nötige MonteCarlo Produktion von FTT-Größen. Hierbei kann entweder die Trefferinformation der CJC genutzt werden, sofern diese bei der Produktion gespeichert worden ist, oder die Berechnung der Treffer aus den Spuren.

Dabei hat die Simulation den Nachteil, dass die Digitalisierungstechnik des FTT nicht direkt abgebildet werden kann, für MonteCarlo Ereignisse ist die analoge Information inzwischen verfügbar [46]. Die Standardauslese arbeitet mit einer Einzeltreffereffizienz zwischen 80% und 90%, wohingegen der FTT eine höhere Treffereffizienz zeigt [47]. Das Simulationspaket bildet die Grundlage für umfangreiche Tests der dritten Triggerstufe, die

für die Inbetriebnahme notwendig sind. Zum Verständnis dieser Tests wird im nächsten Kapitel eine ausführliche technische Einleitung der dritten Triggerstufe gegeben, auf die Ergebnisse der Tests wird unter anderem in Kapitel 6.4 eingegangen.

5. Die dritte Triggerstufe des schnellen Spurtriggers

In diesem Kapitel wird das für die dritte Triggerstufe (L3) entwickelte Hard- und Softwarerezept vorgestellt. Einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit zur Inbetriebnahme der dritten Triggerstufe bildet die neu entwickelte Empfängerkarte, die in Abschnitt 5.2 vorgestellt wird. Die Aufgabe dieser Karte ist der Datenempfang von der zweiten Triggerstufe (L2), sowie der Versand dieser Daten innerhalb von L3. Zur Kontrolle der Einbindung dieser Empfängerkarte, wurden umfangreiche Testmöglichkeiten geschaffen. Die Ergebnisse eines L3 internen Datentransfertests und eines Tests zum Empfang von L2-Testdaten werden am Ende dieses Kapitels diskutiert.

Das L3-System ist in der Lage exklusive Endzustände anhand ihrer Spursignaturen und den daraus berechneten invarianten Massen zu erkennen und benötigt dafür Daten der zweiten Triggerstufe. Die auf diesen Daten basierende L3-Triggerentscheidung wird an die zentrale Triggerlogik gesendet. Für die Übertragung der L2-Daten an die dritte Triggerstufe werden etwa $10 \mu\text{s}$ benötigt. Innerhalb einer gegebenen Zeit von etwa $90 \mu\text{s}$ müssen die von der zweiten Triggerstufe gesendeten Daten für die Selektionsalgorithmen aufbereitet werden und die jeweilige Selektion innerhalb des L3-Systems beendet sein. Damit ergibt sich eine Gesamtzeit von $100 \mu\text{s}$. Diese wird auch als Latenzzeit der dritten Triggerstufe bezeichnet und ist die maximale Dauer, die für die Bildung einer L3-Triggerentscheidung zur Verfügung steht.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, wird diese L3-Triggerentscheidung in der zentralen Triggerlogik mit der L2-Entscheidung kombiniert. Auf diese Weise wird die L4-Eingangsrate reduziert, da Untergrundereignisse und exklusive Endzustände bereits während der Datenauslese erkannt werden können.

Für die technische Realisierung der dritten Triggerstufe ergeben sich, aufgrund der kurzen Latenzzeit, hohe Anforderungen an die benutzte Hard- und Software. Das L3-System besteht aus bis zu 16 **Power-PC** Karten¹ (PPC-Karten). Auf jeder dieser PPC-Karten (Rechenkarten) läuft ein anderer Selektionsalgorithmus zur Selektion exklusiver Endzustände. Der modulare Aufbau der Software und die im L3-System verwendete Programmiersprache *C* ermöglichen die einfache Implementierung der Triggeralgorithmen. Bis jetzt existieren bereits Algorithmen zur Suche von J/ψ - und D^* -Mesonen. Bei positiver Entscheidung eines Selektionsalgorithmus wird ein L3-Triggerelement gesetzt.

Exemplarisch ist in Abbildung 5.1 das Ergebnis eines Suchalgorithmus für J/ψ -Ereignisse gezeigt, der das Prinzip eines L3-Selektionsalgorithmus simuliert hat. Die zugrunde liegenden Spurdaten der Datennahme des Jahres 2000 sind in Photoproduktion erzeugte J/ψ -Vektormesonen, die in zwei entgegengesetzt geladene Myonen zerfallen. Der Datensatz wurde mit der Simulation für die erste und zweite Triggerstufe des FTT *FttEmu4* zur Selektion vorbereitet. Das Ergebnis stellt eine Simulation des Selektionsvermögens des Algorithmus dar und basiert auf der Spurrekonstruktion der zweiten Triggerstufe. Die Auflösung des Selektionsalgorithmus wurde mit der Anpassung einer doppelten Gaußfunktion ermittelt und liegt bei $\sigma_{FTT} = 86 \text{ MeV}$. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der

¹Genutzt werden die Karten der MVME **Power-PC**-Serie (PPC) der Firma Motorola.

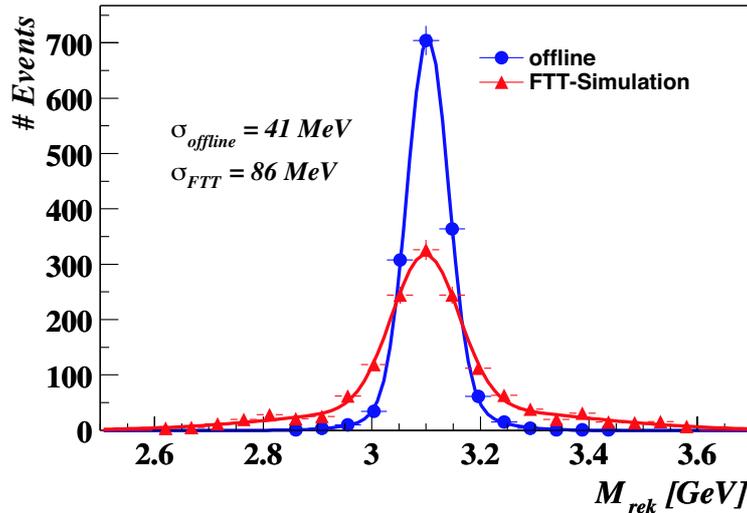


Abbildung 5.1.: Gezeigt ist die invariante Massenverteilung $M_{\mu\bar{\mu}}$ der J/ψ Kandidaten in der vollständigen Rekonstruktion (Offlinerekonstruktion) und das vom FTT rekonstruierte invariante Massenspektrum. Die resultierenden Auflösungen sind eingeblendet [49].

vollständigen Rekonstruktion in blau gezeigt. Die Auflösung der vollen Rekonstruktion ergibt sich zu $\sigma_{offline} = 41$ MeV. Die weiteren Details dieser Studie können in [49] nachgelesen werden.

In Kapitel 6.4 werden Tests zur Betriebsfähigkeit des L3-Systems vorgestellt, die unter anderem mit einem J/ψ -Datensatz durchgeführt wurden. Die Ereignisse sind ebenfalls in Photoproduktion erzeugte J/ψ -Vektormesonen. Aus den Untersuchungen resultiert das L3-Auflösungsvermögen, dieses wird mit den, oben kurz beschriebenen, Ergebnissen der FTT-Simulation verglichen.

5.1. Die technische Realisierung

Das in Abbildung 5.2 gezeigte L3-System besteht aus unterschiedlichen elektronischen Karten, die in einem VME-Crate² integriert werden. Der Vorteil eines VME-Crates ist die Integration mehrerer Elektronikarten in einem Crate die über eine gemeinsame genormte Schnittstelle (VME-Bus) angesprochen werden können [50, 51].

Die Komponenten des L3-Systems, die in Abbildung 5.2 zu erkennen sind, werden dem eingehenden Datenstrom entsprechend ausführlich beschrieben. Die Daten aller vom L2-System gefundenen Spuren werden mit der LVDS-Verbindung an die dritte Triggerstufe übertragen.

Diese Daten der zweiten Triggerstufe werden von einer Aufsteckkarte, die auf der Empfängerkarte angebracht ist, empfangen. Diese von der Firma SCS³ und der ETH Zürich für das L2-System entwickelte LVDS-Piggyback Karte dient dem Versand und Empfang von Daten im gesamten FTT-System. Das Hardware-Design und die Programmierung

²Einschubkasten für elektronische Karten nach dem Versa Module Eurocard Standard.

³Super Computing Systems, www.scs.ch

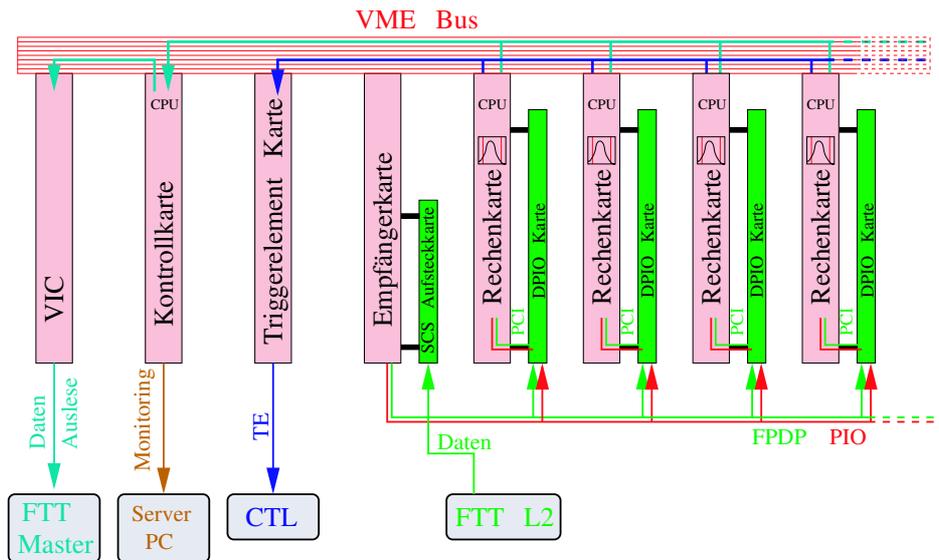


Abbildung 5.2.: Aufbau und Funktionalität der dritten Triggerstufe des FTT. Gezeigt sind die zum Betrieb notwendigen elektronischen Karten und die wichtigsten Signallaufwege [53].

der Empfängerkarte wurde an die im L2-System genutzte LVDS-Piggyback⁴ Karte angepasst, so dass der Empfang und anschließende Transfer von L2-Daten zur Empfängerkarte möglich sind. Wie im gesamten FTT-System werden auch im L3-System programmierbare FPGAs eingesetzt. Im FPGA der L3-PB Karte ist ein spezieller Speicher (Fifo⁵) implementiert. In diesem Fifo werden die eingehenden Daten zunächst zwischengespeichert, bevor sie an die Empfängerkarte weitergegeben werden.

Die Empfängerkarte wird in Abschnitt 5.2 ausführlich erläutert, ihre Aufgaben werden hier nur kurz skizziert. Diese Karte verfügt zur Aufnahme der L3-PB Karte über eine Steckleiste, wie in Abbildung 5.3 hervorgehoben. Zur Weiterverteilung der eingegangenen Daten innerhalb von L3 wird eine Punkt-zu-Multipunkt Übertragung genutzt, auch FPDP-Schnittstelle⁶ genannt [52]. Mit diesem Bus können pro Empfängerkarte acht Rechenkarten *gleichzeitig* über die aufgesteckten PMC-Karten⁷ mit Daten und Steuersignalen versorgt werden. Der FPDP-Bus ist zum Zeitpunkt der Konzeptentwicklung das einzige Bussystem gewesen, das die gleichzeitige Datenübertragung an alle angeschlossenen Empfänger ermöglichte⁸. Die Begrenzung auf acht Rechenkarten gewährleistet ein stabiles und vor allem *gleichzeitiges* Signal.

Die auf den FPDP-Bus gegebenen Daten werden von der DPIO-Karte⁹, die den PMC-Standard erfüllt, empfangen. Diese von der Firma VMetro [55] angebotene Karte war zum Zeitpunkt der Entwurfsentscheidung die einzige, welche den FPDP-Standard unterstützt

⁴Im folgenden mit L3-PB Karte bezeichnet.

⁵Diese Speicher arbeiten nach dem so genannten **F**irst in **F**irst out Prinzip.

⁶**F**ront **P**anel **D**ata **P**ort

⁷**P**CI **M**ezzanine **C**ards, erfüllen den PCI-Standard und schaffen eine Verbindung mit dem PCI-Bus (**P**eripheral **C**omponent **I**nterconnect-**B**us) des Prozessors.

⁸Der FPDP-Bus ist bis heute das einzige Bussystem, welches alle Anforderungen (z.B. Bandbreite) des L3-Systems erfüllt.

⁹**D**igital **P**arallel **I**nput **O**utput

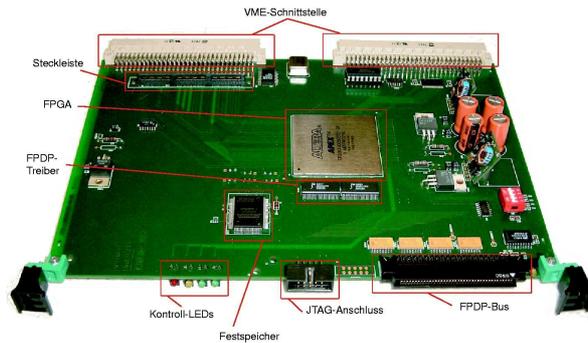


Abbildung 5.3.: Die Empfängerkarte für den Einbau im L3-System: Gut zu erkennen sind die verschiedenen Schnittstellen zum Datenempfang (Steckleiste zur Aufnahme der L3-PB Karte) und Versand (vordere breite Steckleiste, FPDP) innerhalb von L3. Zur Programmierung des Altera FPGA ist eine Schnittstelle (JTAG) an die Vorderkante durchgeführt.

hat und in Europa verfügbar gewesen ist. Der PMC-Stecker verbindet die Aufsteckkarte mit dem PCI-Bus der Rechenkarte und ist außerdem in der Lage Interrupts auf dem PCI-Bus zu erzeugen. Die letzte der acht Aufsteckkarten muss mit einer anderen Besetzung von Widerständen versehen werden, wodurch der FPDP-Bus elektrisch terminiert wird. In Abbildung 5.4 ist eine Power-PC Karte, wie sie im L3-System verwendet wird, gezeigt. Die schwarzen Steckleisten sind für die Aufnahme der DPIO-Aufsteckkarte vorgesehen

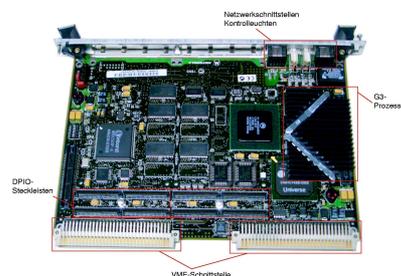


Abbildung 5.4.: Die im L3-System eingesetzte MVME2400 Karten von Motorola. Diese Karte stellt eine VME-Ausführung der Power-PC Architektur dar, darüberhinaus sind weitere Steckleisten zur Aufnahme von Aufsteckkarten angebracht.

hen, welche den Anschluss an den FPDP-Bus ermöglicht. Für die Rechenkarten kommen Power-PCs mit einer VME-Schnittstelle zum Einsatz, diese nutzen den 32 Bit breiten Adress- und Datenraum (A32/D32). Zur Zeit werden im L3-System MVME2400 Motorola Power-PC Karten eingesetzt [57], kurz vor Abschluss dieser Arbeit stand der neue Kartentyp MVME5500 [58] für erste Untersuchungen zur Verfügung. Die wichtigsten technischen Spezifikationen der beiden Kartentypen sind in der folgenden Liste gegeben:

MVME2400:

- MPC750 (32 bit) Power-PC G3-Prozessor mit 450 MHz
- 32 MB Arbeitsspeicher (66 MHz SDRAM ECC Module)
- 10/100 Mb/s Ethernet Netzwerkschnittstelle

MVME5500:

- MPC7455 (64 bit) Power-PC G4-Prozessor mit 1 GHz
- 512 MB Arbeitsspeicher (133 MHz SDRAM ECC Module)
- AltiVec Koprozessor für rechenintensive Anwendungen
- Gigabit Ethernet Schnittstelle und 10/100 Mb/s Ethernet Schnittstelle

Beachtenswert ist beim neuen Kartentyp der mathematische Koprozessor von AltiVec, dieser kann 128 Bit Vektoren verarbeiten, oder vier 32 Bit Vektoren gleichzeitig. Im Vergleich zu *x86*-Prozessoren, die üblicherweise in PCs eingesetzt werden, besitzen die Power-PC Karten eine andere Prozessorarchitektur und verwenden andere Befehlsätze. Das ermöglicht den Power-PCs mit geringerer Taktrate bei vergleichbarer Rechenleistung zu arbeiten, womit ein verbessertes Temperaturverhalten erzielt wird. Durch die parallele Verarbeitung von Rechenoperationen erzielen sie darüberhinaus schnellere Verarbeitungszeiten. Die Details zu den Entscheidungskriterien für die Power-PC Architektur können in [53] nachvollzogen werden. Die Kontrollkarte des L3-Systems ist ebenfalls ein Power-PC. Diese liest die Daten der Rechenkarten aus und stellt sie der FTT-Auslese zur Verfügung. Außerdem kontrolliert die Power-PC Karte das gesamte L3-System und ist mit einem externen Server-PC verbunden.

Die systemweite FTT-Auslese der einzelnen Crates wird durch die VIC-Karten¹⁰ realisiert. Mit Hilfe der VIC-Karte wird eine Verbindung zwischen dem L3-Crate und allen anderen FTT-Crates insbesondere dem Steuercrate (STC¹¹) des FTT aufgebaut. Die Verbindung dient der Auslese der vom FTT genommenen Daten [53], hierauf wird im folgenden nicht weiter eingegangen.

Neben der Auslese der Daten ist vor allem die Weiterleitung der Triggerentscheidung der einzelnen Rechenkarten an die zentrale Triggerlogik wichtig. Für diesen Zweck wird die Triggerbitkarte verwendet, diese verfügt über 16 unabhängige Register. Jeder Eintrag in einem der Register stellt die positive Triggerentscheidung der bis zu 16 im L3-System integrierten Rechenkarten dar. Die Triggerbitkarte ist außerdem in der Lage, Steuersignale der zentralen Triggerlogik zu empfangen. Diese Signale werden in VME-Interrupts umgewandelt und von der Kontrollkarte ausgewertet.

Zusammenfassend sind folgende Schnittstellen der dritten Triggerstufe zu nennen:

- Die EIN- und AUSGÄNGE zur zentralen Triggerlogik,
- die AUSLESE des L3-Systems und
- eine GRAPHISCHE BENUTZEROBERFLÄCHE (GUI¹²),

¹⁰Vertical Interconnection, verwendet werden die VIC-8250 Karten.

¹¹Subsystem Trigger Crate

¹²Dieses Graphical User Interface (GUI) wird in Anhang A näher erläutert.

die über den Server-PC mit der Kontrollkarte verbunden ist.

Anfallende Statusmeldungen der Kontrollkarte werden an das GUI übertragen. Des Weiteren werden Steuerbefehle an die Kontrollkarte des L3-Systems übertragen, die zur Kontrolle und Fehlersuche innerhalb des Crates eingesetzt werden. Damit die Kontrollkarte durch das GUI ansprechbar ist, muss auf Seiten der Kontrollkarte entsprechender Programmcode existieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Funktionalität der Kontrollfunktionen des GUI erweitert und der dafür benötigte Programmcode entwickelt; diese Arbeit wird in Anhang A weiter ausgeführt.

5.2. Die L3-Empfängerkarte

Die Aufgabe der Empfängerkarte ist die Annahme von Daten der zweiten Triggerstufe und deren Versand innerhalb von L3. Für diese Aufgabe wurde an der Universität Dortmund von J. Naumann und M. Kolander eine Empfängerkarte entwickelt. Der Prototyp dieser Empfängerkarte war ebenfalls als A24 Karte ausgelegt, verfügte aber nur über 16 Datenleitungen [53, 60]. Das neue Serienmodell der Empfängerkarte für die Betriebsphase ist in einer Stückzahl von fünf Karten produziert worden und nutzt den gleichen Adressraum aber 32 Datenleitungen.

Deshalb mussten alle Datenprotokolle und Initialisierungsroutinen innerhalb der Programmierung der dritten Triggerstufe an die Änderung der Datenbreite angepasst werden. Dadurch wurden nicht nur umfangreiche Änderungen, sondern auch neue Routinen in der Programmierung nötig. Die Integration der Empfängerkarte in das L3-System stellt einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Zur Überprüfung der korrekten Integration der Karte und der Betriebsfähigkeit der dritten Triggerstufe wurden umfangreiche Testmöglichkeiten geschaffen. Das sind nicht nur die bereits in der Programmierung des FPGA vorhandenen [60], sondern im Rahmen dieser Arbeit entwickelte erweiterte Datentransfertests. Die möglich gewordenen Tests und deren Ergebnisse werden in den Abschnitten 6.1.1 und 6.2 behandelt. In Abbildung 5.5 ist eine schematische Skizze der Karte gezeigt. Innerhalb des L3 VME-Crate nutzt die Empfängerkarte mit der angebrachten VME-Schnittstelle den A24 Adressraum mit 32 Datenleitungen. Die L3-PB Karte ist über die Steckleiste mit der Empfängerkarte verbunden und leitet die über die LVDS-Verbindung eingehenden 48 Bit breiten Daten an den FPGA weiter. Dieser steuert die weitere Verarbeitung der eingegangenen Daten.

Darüber hinaus gibt es noch die Möglichkeit, ebenfalls 48 Bit breite Testdaten über die VME-Schnittstelle auf die Empfängerkarte zu leiten. Der bereits erwähnte FPGA ist in der Lage, die von unterschiedlichen Orten eingehenden Daten auf die gleiche Weise an den FPDP-Bus zu leiten. Sobald die Daten vom FPGA weitergeleitet worden sind, gelangen sie auf die Ausgangsschnittstelle: Den FPDP-Bus.

Ein FPGA kann keine Programmierung speichern, deshalb muss diese geladen werden. Für die Betriebsphase ist ein Festspeicher (EEPROM¹³) integriert worden, dieser lädt nach dem Einschalten des L3-Systems selbstständig den FPGA. Da in der Testphase die Programmierung einer raschen Evolution unterworfen ist, wurde eine JTAG-Schnittstelle¹⁴ vorgesehen. Diese ermöglicht die einfache Neu-Programmierung des FPGA im laufenden

¹³Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

¹⁴Joint Test Action Group

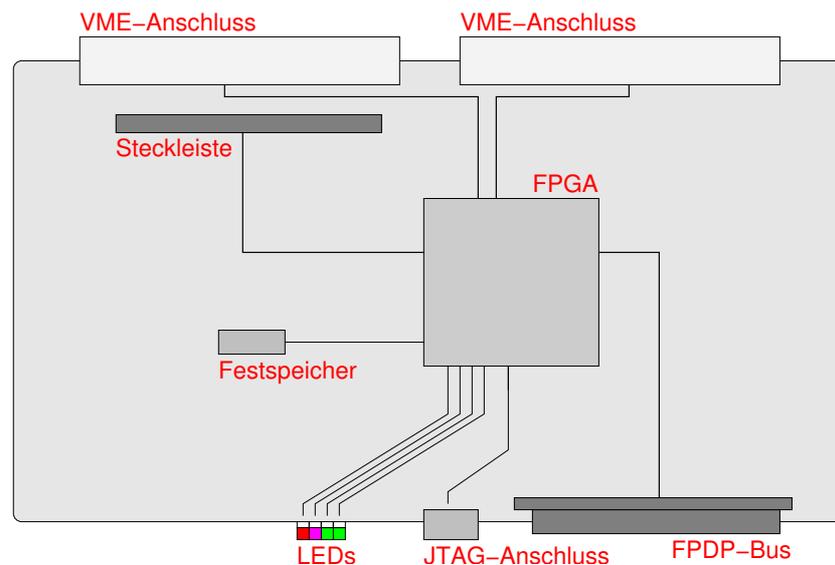


Abbildung 5.5.: Schematische Skizze der im L3 System zum Einsatz kommenden Empfängerkarte. Skizziert sind die VME-Schnittstelle zur Aufnahme in einem VME-Crate und Schnittstellen zum Datentransfer innerhalb von L3 (FPDP) sowie zur Programmierung des FPGA (JTAG-Anschluss, Festspeicher) und die für die L3-PB Karte angebrachte Steckleiste. Für Statusmeldungen sind LEDs angebracht, die lediglich schematisch angedeuteten Datenwege werden in diesem Kapitel erläutert.

Testbetrieb. Es sind darüberhinaus noch einige LEDs¹⁵ angebracht, die Statuszustände der Karte anzeigen.

Programmierung der Empfängerkarte

Für die Empfängerkarte wurde ein FPGA¹⁶ der Firma Altera gewählt [61], er bietet ausreichend Platz für eine Programmierung in der ein Fifo und die notwendige Logik vorhanden sind. Dieser so genannte LVDS-Fifo sichert die von der L3-PB Karte kommenden L2-Daten, bevor die Daten vom FPGA für den Versand über FPDP an die angeschlossenen Rechenkarten vorbereitet werden. Die Zwischenspeicherung ist notwendig, da die Busprotokolle der ein- bzw. ausgehenden Daten mit unterschiedlichen Taktraten arbeiten. Für die Betriebsphase genügt ein hinreichend großer LVDS-Fifo, wohingegen für die Testphase eine Programmierung erstellt wurde, in der mehrere Fifos angelegt sind. Diese Testprogrammierung kann auch in der Betriebsphase jederzeit über die JTAG-Schnittstelle in den FPGA geladen werden, um mögliche Tests auszuführen.

Eine Skizze der Programmierung des FPGA mit den integrierten Fifos ist in Abbildung 5.6 gegeben. In der Testphase der dritten Triggerstufe sind neben dem LVDS-Fifo noch weitere Fifos im FPGA der Empfängerkarte realisiert. Diese integrierten Fifos erlauben die umfangreichen Testmöglichkeiten, so dass der Lauf der Daten durch die Empfängerkarte an

¹⁵Light Emitting Diodes

¹⁶Die genaue Typenbezeichnung ist: Apex20K400.

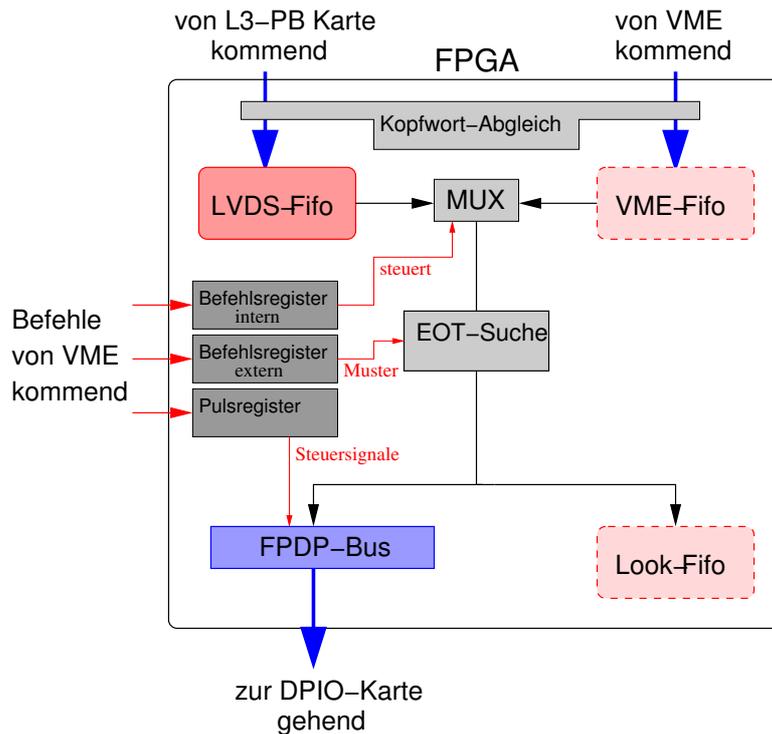


Abbildung 5.6.: Schematische Ansicht der Programmierung des FPGAs, die nur in der Testphase der Empfängerkarte angelegten Fifos (VME-Fifo, Look-Fifo) sind gekennzeichnet. Die Laufwege von Daten und Signalen sind skizziert.

jedem Punkt nachvollzogen werden kann. Für den bereits angesprochenen Datentransfer- test ist ein VME-Fifo integriert. In diesen werden die eingehenden, von der Kontrollkarte über VME gesendeten Testdaten, geschrieben. Ob das LVDS-Fifo oder das VME-Fifo auf den FPDP-Bus geleert werden, wird durch einen passend zu setzenden Multiplexer (MUX¹⁷) eingestellt. Der auf den FPDP-Bus geleitete Datenstrom wird allerdings noch in ein weiteres Fifo kopiert. Dieses Look-Fifo enthält damit eine Kopie jedes auf den FPDP-Bus gelangten Datenwortes und kann für Untersuchungen des Datentransfers über die VME-Schnittstelle ausgelesen werden.

Die Programmierung des FPGA enthält, neben obigen erwähnten Fifos, die Umsetzung der eingehenden Daten von 48 Bit auf das in L3 benutzte 32 Bit breite Datenformat. Das 16 Bit breite Kopfwort wird vom FPGA ausgewertet und abgeschnitten. Erst wenn diese Auswertung ergeben hat, dass die Datenwörter das Ziel L3 haben, werden eingehende Daten akzeptiert und in das LVDS- respektive VME-Fifo geschrieben. Der FPGA ist nicht nur für den Versand der Daten über FPDP und die Auswertung des Kopfwortes notwendig, sondern versendet auch verschiedene Steuersignale. Diese können neben der Vermittlung der 32 Bit breiten Daten über spezielle Steuerleitungen des FPDP-Protokolles versendet werden.

¹⁷Multiplexer oder auch Wahlschalter

Erzeugung von Steuersignalen durch die Empfängerkarte

Die Erzeugung und Übertragung der Steuersignale durch die Empfängerkarte ist insbesondere für den Test der dritten Triggerstufe bequemer, da keine Triggersignale der zentralen Triggerlogik genutzt werden müssen. Hierfür wird das PIO1-Signal¹⁸ mit dem L2Reject verknüpft und über FPDP an die angeschlossenen Rechenkarten geleitet. Das L3Reject¹⁹ wird als PIO2-Signal²⁰ ausgegeben.

Mit einem speziellen Datenwort, dem End-of-Transfer Wort (EOT-Wort), wird das RES1-Signal²¹ verknüpft. Dieses Signal wird von der Empfängerkarte nach Erhalt des definierten EOT-Wortes gesendet. Dafür wird jedes eingehende Datenwort mit einem im (externen) Befehlsregister²² (CR_{ext}) vereinbarten EOT-Muster verglichen. Das RES1-Signal zeigt der DPIO-Aufsteckkarte das Ende der Datenübertragung an, zusätzlich wird mit jedem gültigen Datenwort ein Steuerbit (DValid²³) mitgesendet. Dadurch existiert eine weitere Sicherheit zur Vermeidung von Datenfehlern bei der Übertragung.

Die auf den Steuerleitungen liegenden Signale werden von der DPIO-Aufsteckkarte in Interrupts umgewandelt und über den PCI-Bus an die Rechenkarten gesendet. Dieser Weg ist notwendig, da sonst der notwendige gleichzeitige Empfang des Interrupts durch alle Rechenkarten nicht gegeben ist.

Der Zugriff auf den umfangreichen Befehlssatz der Empfängerkarte wird durch drei Befehlsregister ermöglicht, das interne und externe Befehlsregister (CR_{int}, CR_{ext}), sowie das Pulsregister²⁴. Das CR_{ext} beinhaltet zum Beispiel das EOT-Wort für die RES1-Signal Erzeugung, wohingegen im CR_{int} die Weiterleitung der Daten auf den FPDP-Bus eingestellt werden kann. Mit dem Pulsregister ist beispielsweise die Erzeugung der Triggersignale PIO1 und PIO2 möglich. Die möglichen Befehle sind in Tabelle B.2 in Anhang B abzulesen.

5.3. Software des L3-Systems

Als Betriebssystem der im L3-System genutzten Power-PCs wird ein Echtzeitbetriebssystem (*vxWorks*) [56] genutzt, das Steuersignale mit gesicherten Antwortzeiten verarbeiten kann. Als Entwicklungsumgebung wird die graphische Benutzeroberfläche *Tornado* genutzt [59]. Die hierbei verwendete Programmierhochsprache ist C, dies erleichtert die Programmierung im Vergleich zu hardware-nahen Sprachen deutlich. Deshalb ist auch die eigenständige Entwicklung von Triggeralgorithmen durch andere Arbeitsgruppen möglich. Diese benötigen *keine* spezielle Kenntnis der L3-Hardware, da der eigentliche Triggeralgorithmus in Form einer Unteroutine in die bestehende Programmierung eingefügt werden kann. *vxWorks* ist in der Lage viele voneinander abhängende Prozesse auf der CPU²⁵ auszuführen. Dafür werden jedem Prozess unterschiedliche Prioritäten zugeteilt, welche das

¹⁸Parallel Input Output 1

¹⁹Signalisiert die Nicht-Validierung der L2-Triggerentscheidung durch die dritte Triggerstufe.

²⁰Parallel Input Output 2

²¹Reserved Signal1

²²Die unteren 16 Bit des CR_{ext} werden für diesen Zweck benutzt, siehe auch Tabelle B.2 in Anhang B.

²³Das so genannte **DataValid**- oder DValid-Bit.

²⁴Die in das Pulsregister geschriebenen Steuerbits (Befehle), werden automatisch nach 200 ns wieder zurückgesetzt.

²⁵Central Processing Unit

Betriebssystem in eine Hierarchie der abzuarbeitenden Prozesse umsetzt. Diese Hierarchie ist maßgeblich für die Abarbeitung der Prozesse durch die CPU der jeweiligen Karte. Um die Kommunikation und Synchronisation dieser parallel laufenden Prozesse zu gewährleisten, werden in *vxWorks* einige spezielle Konzepte verwendet. Genutzte Datenstrukturen werden in einem gemeinsamen Speicherbereich²⁶ angelegt und sind so für die CPU und alle laufenden Prozesse zugänglich. Durch spezielle Schutzmechanismen wird sichergestellt, dass zwei Routinen einen Schreibzugriff *nicht* gleichzeitig auf dieselbe gemeinsame Datenstruktur ausführen.

Steuerung von Prozessen

Die Steuerung von Prozessen wird durch Semaphoren²⁷ und Interrupts sichergestellt. Interrupts werden im L3-System genutzt, um auf besondere Statuszustände zu reagieren. Eingehende Testdaten verursachen beispielsweise einen Interrupt. Diese Interrupts sind Signale die auf bestimmten dafür vorgesehenen Leitungen innerhalb des VME-Crates versendet werden und von den Power-PCs empfangen werden.

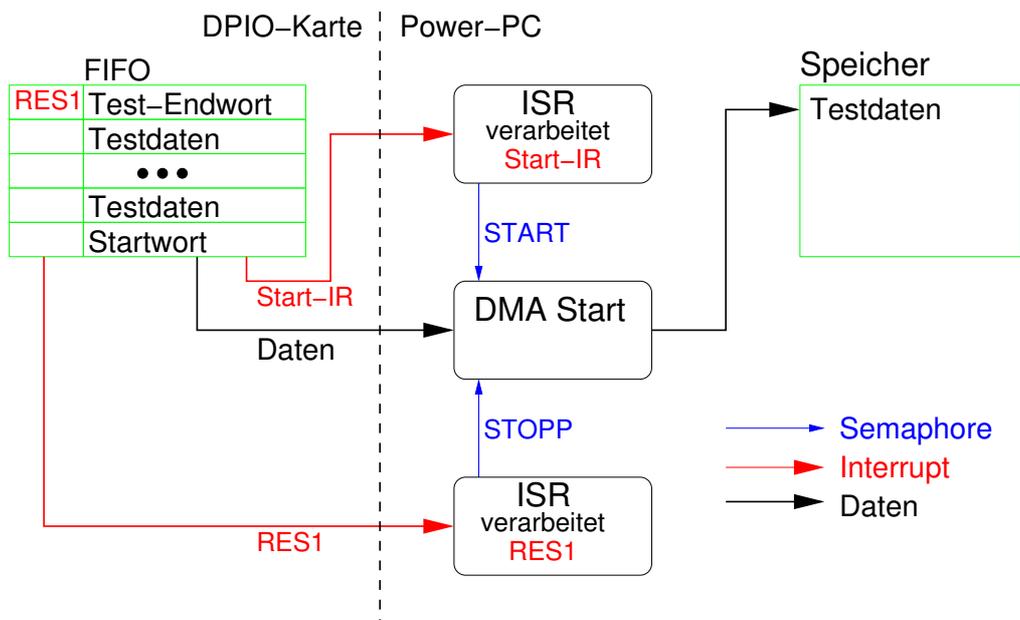


Abbildung 5.7.: Steuerung von Prozessen mit den vom Betriebssystem zur Verfügung gestellten Mitteln, welche im Text näher beschrieben werden. Skizziert am Beispiel eingehender Testdaten in die dritte Triggerstufe.

Mit Hilfe der Semaphoren wird in der Programmierung des L3-Systems die Synchronisation von Prozessen realisiert. Ein Prozess kann auf eine Semaphore warten oder eine geben, die dann von einem wartenden Prozess verarbeitet werden kann. Zum Beispiel wird eine Semaphore zur Verfügung gestellt, sobald Daten im Speicher der Rechenkarte zur Analyse bereit sind. Der auf diese Semaphore wartende Selektionscode startet daraufhin.

²⁶Auch *Shared Memory* genannt.

²⁷Auch Winksignal oder Flaggensignal genannt.

Die Arbeitsweise der Semaphoren wird in Abbildung 5.7 zusammen mit den verschiedenen Prozesszuständen am Beispiel eingehender Testdaten²⁸ erläutert. Semaphoren können zwei unterschiedliche Zustände belegen: *verfügbar* und *nicht verfügbar*. Zunächst sind die Semaphoren mit der Bedeutung START und STOPP *nicht verfügbar*. Das im Fifo befindliche Startwort verursacht einen Interrupt, der an die Rechenkarte geleitet wird. Die Interrupts werden in der Programmierung der Rechenkarte mit Interruptserviceroutinen (ISR) abgefangen und in Semaphoren umgewandelt. Der wartende Prozess nimmt diese nun *verfügbare* Semaphore START und startet den DMA-Zugriff²⁹.

Die Entkopplung der ISR von der zu startenden Routine ist notwendig um die Echtzeitfähigkeit des Systems nicht zu gefährden. In einer ISR wird deshalb nur der Interrupt deaktiviert und der Empfang des Interrupt der jeweiligen Quelle bestätigt, sowie die besagte Semaphore gegeben. Das Endwort generiert einen Interrupt RES1, der den DMA-Zugriff über eine Semaphore STOPP wieder stoppt, damit ist der Transfer eingehender Daten in den Speicher der Rechenkarte abgeschlossen.

Die Kommunikation und der Datenaustausch mit den Power-PCs des L3-Systems werden ebenfalls durch das in Abschnitt 4.1 bereits erklärte Nachrichtensystem durchgeführt. Die Systemnachrichten der Power-PCs werden mit Hilfe dieses Nachrichtensystems versendet. Falls ein Power-PC in einer Routine abgestürzt ist, steht keine Information über die Ursache zur Verfügung, da die zugehörigen Systemnachrichten nicht mehr versendet werden können. Aus diesem Grund wurde die Möglichkeit geschaffen, in einem speziellen Speicherbereich der im FTT eingesetzten Power-PCs die letzten 20 ausgehenden Systemnachrichten zu speichern. Solange der Power-PC nicht vom Strom getrennt ist, bleiben die im Speicher gesicherten Systemnachrichten erhalten und werden nach einem Neustart ausgegeben. Im Falle eines Absturzes der Rechenkarte sind so noch Hinweise auf die Ursache gegeben.

Speicherkonzept der Power-PCs

Auf jedem der Power-PCs gibt es einen Bereich des Speichers, der nicht vom Betriebssystem *vxWorks* verwaltet wird. Dieser Speicher steht den Anwendungen des L3-Systems zur Verfügung und ist vom Benutzer zu verwalten. Insbesondere sind mögliche Überschneidungen der Speicherbereiche vom Programmierer zu vermeiden. Dieser spezielle Speicherbereich wird im folgenden als Benutzerspeicher bezeichnet. Dort ist ein Bereich für Systemnachrichten angelegt, in dem die letzten 20 ausgehenden Systemnachrichten gespeichert werden. Dieser Nachrichtenbereich ist als Ringspeicher angelegt, das heißt es werden immer die gerade letzten 20 Systemnachrichten gespeichert.

Die Rechenkarten innerhalb des L3-Systems verwenden den Benutzerspeicher auch, um die Ergebnisse der Selektionsalgorithmen zur Auslese bereit zu stellen. Aus diesem Grund wurde die Struktur des Benutzerspeichers in L3 den neuen Anforderungen angepasst. Die geänderte Struktur des Benutzerspeichers der Rechenkarten ist in Abbildung 5.8 gezeigt. Zuerst ist ein Block für die Systemnachrichten angelegt, daran schließt sich der Speicher für die von der Kontrollkarte auszulesenden Daten an. Zugriffe in die unterschiedlichen

²⁸Die Möglichkeit Testdaten in das L3-System einzugeben, wird in Abschnitt 6.1.1 erklärt.

²⁹**D**irect **M**emory **A**ccess, ermöglicht den Datentransfer in den Speicher ohne direkte Beteiligung der CPU.

Bereiche werden über festgelegte Zeiger ermöglicht. Der Benutzerspeicher-Zeiger ist ein Zugriff der Rechenkarte in den Benutzerspeicher zur Sicherung der letzten 20 Systemnachrichten oder der Daten, während unten der Auslesezugriff der Kontrollkarte und der Zugriff auf die gespeicherten Nachrichten angedeutet ist.



Abbildung 5.8.: Die Struktur des Benutzerspeichers, den ersten Block bilden die für den Fall eines Absturzes des Power-PC gesicherten Nachrichten. Daran schließt sich der Speicherblock für die auszulesenden Daten an. Die mit roten Pfeilen markierten Zugriffszeiger werden von den Routinen im L3-System verwendet, um auf die jeweiligen Speicherbereiche zu zugreifen.

6. Systemverhalten des L3-Systems

Die Hard- und Software des L3-Systems, wie im vorherigen Kapitel 5 erläutert, ist mehreren umfangreichen Tests zum Nachweis der Betriebsfähigkeit unterworfen worden. So wird die fehlerfreie Integration des Serienmodells der, in Abschnitt 5.2 ausführlich erläuterten Empfängerkarte, mit dem internen L3-Systemtest nachgewiesen. Die Ergebnisse dieses internen L3-Tests werden in Abschnitt 6.1.1 diskutiert.

Zur Untersuchung der Kommunikation des L3-Systems mit dem L2-System ist im Rahmen dieser Arbeit ein Datentransfertest entwickelt worden, der im Gegensatz zu dem internen L3-Systemtest zufällig generierte Muster benutzt. Damit ist ein realitätsnaher Test des L3-Systems möglich, dessen resultierende Ergebnisse in Abschnitt 6.2 behandelt werden. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Untersuchung der Selektionsalgorithmen der dritten Triggerstufe und deren Zeitverhalten mit verschiedenen Datensätzen.

Zunächst wird im folgenden der Prozessablauf innerhalb des L3-Systems für eingehende Daten beschrieben. Dieser Ablauf ist für jede in das System gehende Datenart maßgeblich.

6.1. Verarbeitung eingehender Daten in L3

Die dritte Triggerstufe empfängt bis zu vier verschiedene Datenarten, die ebenfalls ein Kopfwort entsprechend dem Nachrichtensystem¹ besitzen. Das sind zunächst die von der zweiten Triggerstufe des FTT berechneten Spurdaten und die z-Vertexdaten des FTT. Darüberhinaus ist es möglich Daten anderer Subdetektorsysteme (z.B. Triggerdaten des Myonsystems) zu nutzen, diese werden als PQZP-Daten² bezeichnet. Mit Hilfe dieser Daten kann eine höhere Ratenreduktion innerhalb des L3-Systems erreicht werden [54]. Weiterhin besteht die Möglichkeit Testdaten zu versenden, mit denen der Datentransfer im und in das L3-System getestet wird. Darauf wird in Abschnitt 6.1.1 ausführlich eingegangen.

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Datenarten, erfolgt durch ein spezielles Bitmuster³ für das Kopfwort, welches den Datenstrom transparent hält.

Der insgesamt 48 Bit breite in das L3-System eingehende Datenstrom wird von der Empfängerkarte auf 32 Bit breite Datenwörter verkürzt, dabei wird das 16 Bit breite Kopfwort analysiert und anschließend entfernt. Der FPGA auf der Empfängerkarte kennt die Kodierung des Kopfwortes und akzeptiert nur Daten mit dem Ziel L3. Diese Reduzierung der Datenbreite ist notwendig, da dem FPDP-Bus ein 32 Bit Protokoll zugrunde liegt. An die Rechenkarten können neben den Datenwörtern weitere Steuersignale über zusätzliche Leitungen gesendet werden.

Zur Veranschaulichung des Datenflusses in den Speicher der Rechenkarte ist in Abbildung 6.1 der Datenfluß vom FPDP-Bus über die DPIO-Karte in den Power-PC für den Fall

¹siehe Abschnitt 4.1.

²Die Daten werden über den **P**arallel **Q**uickbus **Z**ero-Suppression **P**rocessor übertragen.

³Eine Aufschlüsselung des Kopfwortes ist im Anhang B in Tabelle B.1. gegeben, anhand des Kopfes können die eingehenden Daten (PQZP-, Test-, Spur- oder z-Vertex-Daten) und das Ziel der Daten unterschieden werden.

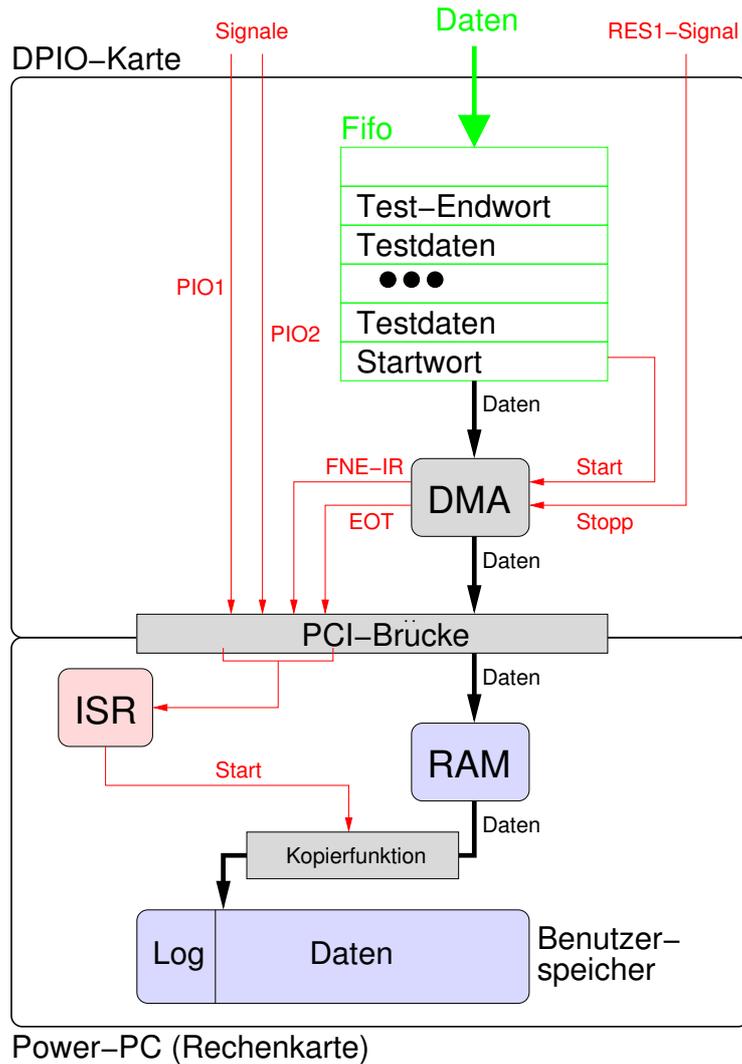


Abbildung 6.1.: Datenfluss der auf dem FPDP-Bus anliegenden Daten, welcher durch bestimmte Signale (FNE-IR, EOT) derart gesteuert wird, dass die Daten in den Speicher der Rechenkarte gelangen. Die genaue Funktionsweise der Steuersignale und die Auswirkungen auf den Datenfluss werden im Text beschrieben.

eingehender Testdaten gezeigt. Mit jedem gültigen Datenwort wird ein DValid-Bit über eine Steuerleitung gesendet, dieses markiert das gesendete Datenwort als gültig. Die über den FPDP-Bus eingehenden Daten werden in den Fifo der DPIO-Karte geschrieben, dabei erzeugt ein spezielles Startwort einen Interrupt (FNE-IR⁴) auf der Power-PC Karte. Der FNE-IR gibt dort eine Semaphore frei, welche den DMA-Zugriff von der DPIO-Karte in den Speicher der Rechenkarte startet. Solche DMA-Zugriffe werden ohne Beteiligung der CPU ausgeführt, so dass parallel andere Prozesse bearbeitet werden können. Außerdem werden mit DMA-Zugriffen kürzere Übertragungszeiten möglich. Anhand des Startwortes, das mit Hilfe von Tabelle B.1 in Anhang B erstellt wird, erkennt die Rechenkarte den Datentyp. Jedem Datentyp ist ein bestimmter DMA-Zugriff mit einer festen Adresse im Speicher der Rechenkarte zugeordnet, damit ist festgelegt, an welche Stelle im Speicher

⁴Fifo-not-empty Interrupt

(RAM) der Rechenkarte die Daten zu schreiben sind. Der DMA-Transfer wird bis zum Eingang eines Stoppsignals ausgeführt. Dieses RES1-Signal wird von der Empfängerkarte auf eine der Steuerleitungen gegeben, wenn der Abgleich der eingehenden Datenwörter mit einem definierten Muster positiv war, wie in Abschnitt 63 bereits erläutert.

Nach dem Transfer sind die Daten im Speicher (RAM) der Rechenkarte und stehen für die weitere Analyse zur Verfügung. Im Falle der Testdaten werden diese ohne weitere Bearbeitung in den Benutzerspeicher der Rechenkarte kopiert. Auf diesen Benutzerspeicher kann die Kontrollkarte des L3-Systems zugreifen.

Dieser Prozessablauf ist für die, in den nächsten beiden Abschnitten erläuterten, Datentransfertests von grundlegender Bedeutung. Die fehlerfreie Arbeitsweise der Programmierung des FPGA kann mit dem Versand von Testdaten untersucht werden.

6.1.1. Interner L3-Systemtest

In Abschnitt 5.2 sind die Funktionen und die benötigte Programmierung der Empfängerkarte ausführlich geschildert worden. Nun wird die Integration der Karte in das L3-System und der anschließende Datentransfertest beschrieben.

Die Empfängerkarte besitzt, gemäß dem modularen Aufbau der Programmierung des FTT und auch der dritten Triggerstufe, eine eigene Programmbibliothek. Diese ist im Rahmen dieser Arbeit für die Integration der Empfängerkarte in dem A24/D32-Bereich wesentlich geändert worden. Zusätzlich wurden neu entwickelte Routinen und Strukturen in diese Bibliothek integriert. Erst mit der Anpassung dieser Bibliothek ist die Serienversion der Empfängerkarte von der L3-Kontrollkarte ansprechbar. Nach dem Einschalten des L3-Crates wird von der Kontrollkarte eine Initialisierungsroutine aufgerufen, welche die Adressen der Befehlsregister und der Fifos dem Benutzer und anderen Routinen des L3-Systems zugänglich macht.

Um sicherzustellen, dass keine Fehler in der Datenübertragung oder der Hardware existieren, wird ein interner Datentransfertest ausgeführt [53]. Der interne Test der Systemintegrität des L3-Systems, beruht auf den Abläufen, die in Abbildung 6.2 innerhalb des blauen gestrichelten und mit L3-System beschriebenen Kastens skizziert sind.

Die Abbildung zeigt zusätzlich noch einen weiteren Datentransfertest, der die Übertragung von Daten in das L3-System ausgehend vom L2-System skizziert und in Abschnitt 6.2 weiter erläutert wird.

Der hier beschriebene Test der L3-Systemintegrität wird mit einem L3-Testaufbau bestehend aus je einer Kontrollkarte, Rechenkarte und Empfängerkarte ausgeführt. Während der späteren Betriebsphase ist die Überprüfung der Systemintegrität nach jedem Einschalten des L3-Systems als Standard vorgesehen.

Für diese Überprüfung erzeugt die Kontrollkarte in einem bestimmten Speicherbereich ein Testmuster aus laufenden Nullen und Einsen. Diese 32 Bit breiten Testdaten werden nun über die VME-Schnittstelle zusammen mit einem definierten Start- und Endwort an die Empfängerkarte gesendet. Zusätzlich wird vor jedem 32 Bit Datenwort ein zugehöriges 16 Bit Kopfwort gesendet. Diese beiden Wörter bilden zusammen das von der Empfängerkarte erwartete 48 Bit breite Datenformat. Das Kopfwort wird, wie bereits in Abschnitt 5.2 erklärt, von der Empfängerkarte ausgewertet und die verbliebenen 32 Bit Datenwörter werden in den VME-Fifo geschrieben, sofern das Kopfwort gültig war. Unter Abschaltung der Kontrolle des Kopfwortes werden verschiedenste elektronische Störsignale, welche zufällige Datenwörter bilden, in den VME-Fifo geschrieben. Die Empfängerkarte sendet den Inhalt des, mit den gültigen Testworten gefüllten, VME-

Fifo auf den FPDP-Bus. Dieser Vorgang wird bis zu dem Zeitpunkt ausgeführt, in dem der Vergleich mit dem gespeicherten EOT-Bitmuster positiv war. Das daraufhin gesendete Stoppsignal ist das in Abschnitt 5.2 erwähnte RES1-Signal. Sobald das Startwort der ankommenden Daten im Fifo der DPIO-Karte geschrieben ist, wird gleichzeitig ein FNE-IR an die Rechenkarte ausgegeben. Die DPIO-Karte startet nach dem Interrupt den DMA-Zugriff und kopiert selbständig die im Fifo befindlichen Daten in einen reservierten Speicherblock der Rechenkarte, ohne die CPU der Rechenkarte zu belasten.

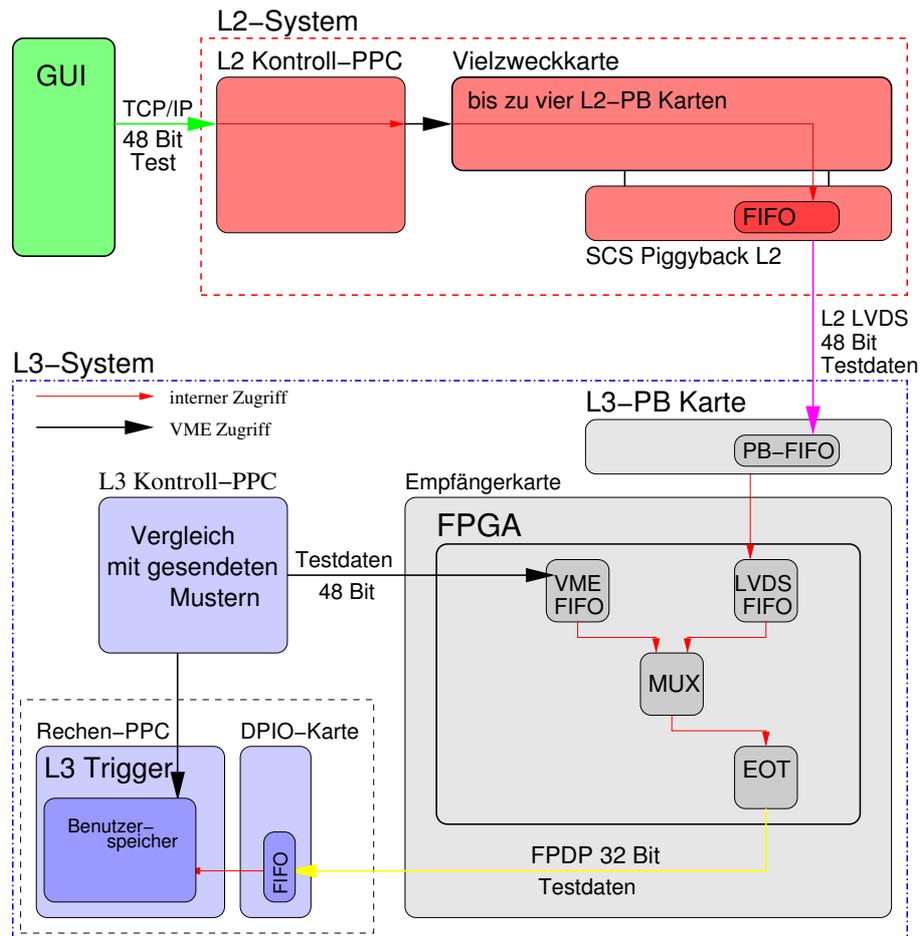


Abbildung 6.2.: Es gibt zwei unterschiedliche Möglichkeiten den Datentransfer des L3-Systems zu testen. Gezeigt ist einmal der L3 interne Test der Systemintegrität in dem das Testmuster von der L3 Kontrollkarte erzeugt wird und ein erweiterter Test bei dem die Daten des L2-Systems eingespeist werden. Die genauen Details beider Tests sind dem Text zu entnehmen.

Es gibt verschiedene Speicherbereiche für unterschiedliche Datenarten. Im Falle der Testdaten ist der weitere Ablauf relativ einfach. Die Rechenkarte greift auf die Daten aus dem allgemeinen Datenspeicher zu und transferiert sie in den Benutzerspeicher, welcher das obere Megabyte des zur Verfügung stehenden Gesamtspeichers ist (siehe Abbildung 5.8 in Abschnitt 5.3). Das Ende des Kopiervorgangs der Daten wird der Kontrollkarte von der Rechenkarte mit einem Interrupt signalisiert. In diesem Interrupt ist es möglich die Prozessornummer zu übertragen, so dass die Kontrollkarte auf die richtige Rechenkarte zugreift und den vorab definierten Speicherbereich ausliest. Das von der Kontrollkarte

zurückgelesene Testdatenmuster wird nun mit dem gesendeten verglichen. Nachdem der Vergleich der beiden Muster keine Fehler der Datenübertragung gezeigt hat, wird die L3-Hardware als intakt bezeichnet.

Es besteht die Möglichkeit den Test als Schleife auszuführen, so wurden $1,92 \cdot 10^7$ Iterationen ohne Fehler ausgeführt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler innerhalb der L3-Datenübertragung ist also kleiner als:

$$W_{Fehler} = \frac{1}{N_{Iteration}} \leq 5,2 \cdot 10^{-8}. \quad (6.1)$$

Das Ergebnis dieses Tests belegt die fehlerfreie Integration der Empfängerkarte in das L3-System und motivierte einen wesentlich erweiterten Test der Datenkommunikation zwischen dem L2- und L3-System, wie sie auch im späteren Betrieb des FTT ausgeführt wird.

6.2. Datentransfer von L2 nach L3

Der Datentransfer innerhalb des FTTs erfolgt mittels des Signalstandards LVDS, auf diese Weise können Daten sicher und schnell ausgetauscht werden. Die zweite Triggerstufe schickt mit dieser Art der Verbindung Spurdaten an die dritte Triggerstufe. Für einen realistischen Test des L3-Systems muss deshalb der Datentransfer von der zweiten Triggerstufe des FTT in das L3-System getestet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Testsystem aufgebaut, welches das L2-System simuliert.

Dieses besteht aus einem Power-PC, einer Vielzweckkarte und einem Servicemodul. Die Vielzweckkarte ist in Abschnitt 4.1 vorgestellt worden und verfügt zur Kommunikation mit dem L3-System über eine LVDS-Piggyback Karte. Mit dem Servicemodul wird im realen Betrieb des L2-Systems der Empfang von Triggersignalen von der zentralen Triggerlogik realisiert. Im Testsystem wird es benötigt, um eine Taktuhr vorzugeben. Diese ist nicht nur für die Programmierung der Aufsteckkarten der Vielzweckkarte notwendig, sondern auch für das LVDS-Protokoll. Der Datentransfertest von L2 in das L3-System stellt sicher, dass der Datentransfer in das L3-System fehlerfrei funktioniert. Eine kritische Fehlerquelle ist dabei die Phase zwischen der Empfängerkarte und der aufgesteckten L3-PB Karte, da diese beiden Karten mit unterschiedlichen Taktraten arbeiten.

Dieser L2-L3 Datentransfertest ist in Abbildung 6.2 skizziert, zusätzlich zum L3-System ist das L2-Testsetup im roten Kasten abgebildet. Einen Test der Datenkommunikation zwischen diesen Systemen zu entwickeln, der lediglich von einem Power-PC gesteuert wird, ist aufwendig und übersteigt den für einen Test vertretbaren Aufwand. Deshalb ist die bestehende Programmierung in der Weise geändert worden, dass der Test mit dem GUI möglich ist. Die dafür benutzte Oberfläche wird im Anhang A.2 vorgestellt.

Das GUI generiert ein 32 Bit breites Zufallsdatenmuster und erweitert dieses Datenwort um das 16 Bit breite Kopfwort der FTT weiten Datenübertragung, so dass insgesamt 48 Bit breite Testdaten versendet werden. Die Datenworte werden mit Hilfe der Kontrollkarte des L2-Testsystems zur Vielzweckkarte gesendet. Von dort werden sie in den Fifo der LVDS-PB Sendekarte geschrieben und mit dem Sendebefehl auf die LVDS-Verbindung gegeben. Ein Bild des realen Testaufbaus ist in Abbildung 6.3 zu sehen, das obere Crate ist das L3-System. Mit diesem ist das darunter liegende L2-Testsystem über ein LVDS-Kabel verbunden.

Die im L3-System ankommenden Daten werden zunächst in einen Fifo auf der L3-PB Karte geschrieben und dann von der Empfängerkarte in das eigene LVDS-Fifo kopiert. Die auf der Empfängerkarte genutzte L3-PB Karte muss dafür eine angepasste Programmierung erhalten.

Die Karte verfügt über zwölf frei konfigurierbare Kontrollleitungen. In der Programmierung können davon je sechs für eingehende bzw. ausgehende Kontrollsignale verwendet werden. Die Belegung dieser Leitungen ist in Tabelle 6.1 angegeben.

Kontrollleitung	Belegung	Kontrollleitung	Belegung
PB-OUT[0]	DValid	PB-IN[0]	PB Testdatenerzeugung
PB-OUT[1]	PB_nicht_bereit	PB-IN[1]	Bereit
PB-OUT[2]	Fifo Überlauf	PB-IN[2]	Clear
PB-OUT[3]	Fifo-not-empty	PB-IN[3]	Neustart PB
PB-OUT[4]		PB-IN[4]	
PB-OUT[5]		PB-IN[5]	

Tabelle 6.1.: *Belegung der Kontrollleitungen für die FPGA-Programmierung der SCS Piggyback Karte, die auf die Empfängerkarte gesteckt ist. Mit diesen Leitungen wird ein spezielles Protokoll für eingehende Daten der zweiten Triggerstufe vereinbart. Die genauen Einzelheiten sind dem Text zu entnehmen.*

Mit diesen Kontrollleitungen wurde ein definiertes Protokoll für eingehende L2-Daten erstellt, um Übertragungsfehler zu minimieren. Der FPGA auf der Empfängerkarte setzt das *Bereit*-Zeichen und nimmt gleichzeitig das *Clear*-Zeichen zurück, sobald die Karte bereit ist, Daten zu verarbeiten. Die L3-PB Karte löscht bei anliegendem *Clear*-Zeichen fortwährend den eigenen Fifo. Erst auf das *Bereit*-Zeichen der Empfängerkarte werden die, über LVDS mit gültigem DValid-Bit, ankommenden Daten in das L3-PB-Fifo der Empfängerkarte geschrieben. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass nur gültige Datenwörter im Fifo der L3-PB Karte gespeichert werden. Die Empfängerkarte erkennt ungültige Datenwörter zwar am nicht vorhandenen oder falschen Datenkopf, jedoch ist die Größe des Fifo auf der L3-PB Karte begrenzt. Deshalb sollten nur Datenwörter in den Fifo gelangen, wenn die Empfängerkarte auch bereit ist, diese in den eigenen Fifo zu schreiben. Auf das *Bereit*-Zeichen wird der Inhalt des L3-PB-Fifo freigegeben und die Empfängerkarte kann die Daten in das LVDS-Fifo für eingehende Daten der zweiten Triggerstufe schreiben. Der Inhalt des LVDS-Fifo der Empfängerkarte wird auf den FPDP-Bus gegeben. Ab diesem Punkt werden die Testdaten analog dem L3 internen Datentransfer-test behandelt und von der Rechenkarte in den Benutzerspeicher geschrieben. Das GUI liest dieses Testmuster durch einen Lesezugriff über die Kontrollkarte des L3-Systems zurück und vergleicht es mit dem gesendeten Testmuster. Dieser Test ist in der Lage den Datentransfer der gesamten L2-L3 Systemkette zu untersuchen. Aufgrund der Vielzahl an betroffenen Komponenten sind mit diesem Test keine hohen Frequenzen zu erreichen. Insgesamt wurden etwa 15650 Übertragungen mit jeweils 64 zufällig erzeugten Datenwörtern ausgeführt, dafür wurde ungefähr ein Tag Rechenzeit benötigt. Von diesen mehr als 10^6 übertragenen Wörtern zeigten sich in 103 Fällen Übertragungsfehler. Das bedeutet jedoch nicht, dass das ganze Wort fehlerhaft ist, sondern lediglich Bits innerhalb der Wörter falsch

sind. Das korrespondiert mit einer Fehlerrate von:

$$R_{Fehler} = \frac{N_{Fehler}}{N_{Gesamt}} = (3,2051 \pm 0,0001) \cdot 10^{-6}. \quad (6.2)$$

Es ist bereits bei Tests der LVDS-Verbindung innerhalb der zweiten Triggerstufe erkannt worden, dass die LVDS-Verbindung Übertragungsfehler zeigt. Dabei sind Testmuster zwischen einzelnen Vielzweckkarten versendet worden und Fehler in der Größenordnung von Promille aufgetreten [62]. Die Rate lag bei diesen L2 internen Tests in der Größenordnung der Rate des internen L3-Datentransfertests. Die Fehlerrate des hier vorgestellten L2-L3 Datentransfertests liegt um Größenordnungen unter der des L2 internen Tests, damit ist ein negativer Einfluss nicht zu befürchten⁵ [62].

Mit den vorgestellten Datentransfertests kann weitgehend ausgeschlossen werden, dass es während den Datenübertragungen in das L3-System und im L3-System selbst zu Fehlern kommt. Im nächsten Arbeitsschritt werden keine Testmuster mehr übertragen, sondern physikalische Datenmuster, die Spurdaten beschreiben. Dafür sind zunächst einige grundlegende Überlegungen und Definitionen notwendig. Diese werden in den nächsten Abschnitten behandelt.

⁵Nach der vollständigen Integration des L3-Systems in das H1-Triggersystem sollte dieser Effekt dennoch erneut untersucht werden.

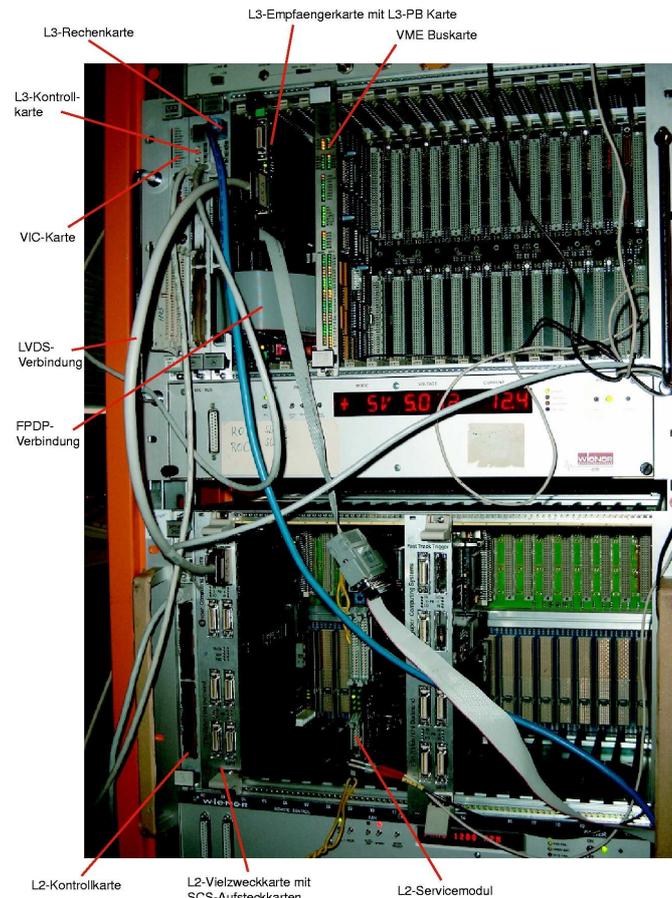


Abbildung 6.3.: *Der Testaufbau der zweiten und dritten Triggerstufe des FTT im Triggerlabor. Zu sehen ist im oberen Crate das L3-System, mit den verschiedenen Einsteckkarten. Im unteren Crate ist das L2-Testsystem aufgebaut, es ist mit dem oberen Crate über ein LVDS-Kabel verbunden.*

6.3. Datenaufbereitung in L3

Für den Versand des kompakten Datenwortes, wie in 4.3 beschrieben, werden die drei Spurparameter ($\kappa, \varphi^*, \cot(\vartheta)$) genutzt und an die dritte Triggerstufe gesendet. Aus diesen werden die für die Selektionsalgorithmen notwendigen physikalischen Variablen abgeleitet bzw. berechnet, die dabei zum Einsatz kommenden Verfahren werden hier erläutert.

Besondere Aufmerksamkeit verdient hier die Grösse φ^* , welche eine Linearkombination der Winkelfunktionen $\cos(\varphi)$ und $\sin(\varphi)$ darstellt und in Gleichung 6.3 definiert ist. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes zur Berechnung trigonometrischer Funktionen ist es nicht möglich, diese direkt auf L3 zu berechnen. Den Ausweg bildet die Grösse φ^* . Aus dieser an L3 übertragenen Variable kann, durch Invertieren der Gleichungen in 6.3, jeweils eine der Winkelfunktionen $\cos(\varphi)$ und $\sin(\varphi)$ direkt abgeleitet werden. Die jeweils andere Winkelfunktion wird über die Winkelrelation $\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi) = 1$ bestimmt. Die Berechnung der dabei auftretenden Wurzelausdrücke wird mit der Taylorentwicklung der Wurzeln vermieden. Die numerische Stabilität im Falle der Übertragung von φ^* an L3 wurde untersucht, die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt 6.4 vorgestellt.

Für die Konstruktion der Linearkombination auf L2 wird der Einheitskreis in $\varphi \in [0, 2\pi]$ auf ein Oktagon der Kantenlänge eins abgebildet, $\varphi^* \in [0, 8]$. Diese Konstruktion der Variable φ^* wird in Abbildung 6.4 skizziert und ist in Gleichung 6.3 mathematisch definiert, die Winkelfunktionen sind das Ergebnis der auf L2 ausgeführten Spurrekonstruktion. In der Abbildung 4.6 in Abschnitt 4.3 ist der in guter Näherung lineare Zusammenhang zwischen φ^* und φ bereits gezeigt worden.

$$\varphi^* = \left\{ \begin{array}{ll} \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \text{für } \varphi \in [0, \frac{1}{4}\pi] \\ 2 - \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi), & \text{für } \varphi \in]\frac{1}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi] \\ 4 - \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \text{für } \varphi \in]\frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi] \\ 6 + \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi), & \text{für } \varphi \in]\frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi] \\ 8 + \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi), & \text{für } \varphi \in]\frac{7}{4}\pi, 2\pi[\end{array} \right\} \quad (6.3)$$

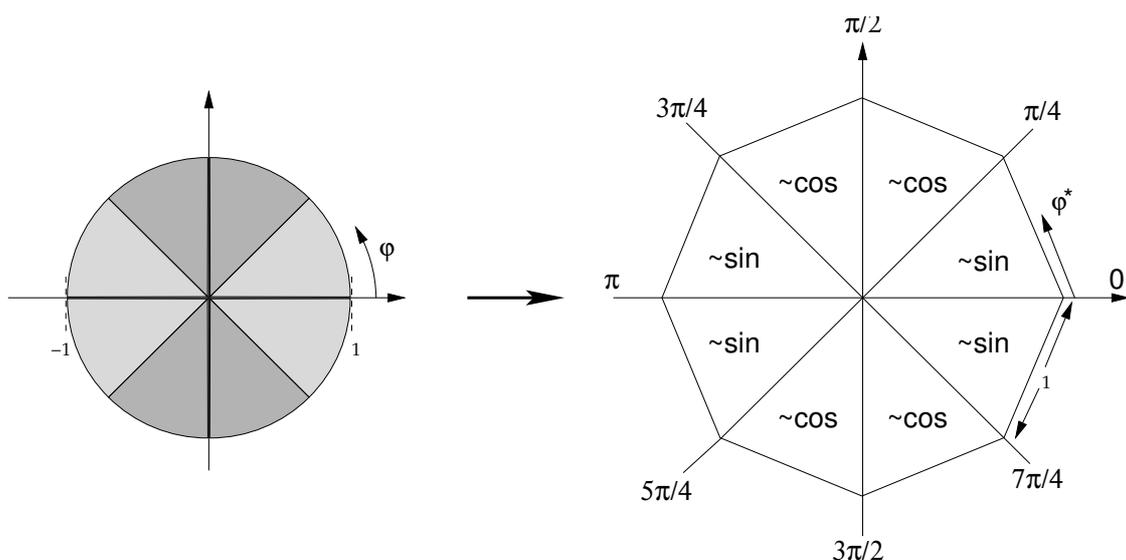


Abbildung 6.4.: Konstruktion der Variable φ^* aus dem Winkel φ , dazu wird der Einheitskreis auf ein Oktagon der Kantenlänge eins abgebildet.

Damit die dritte Triggerstufe eine Triggerentscheidung fällen kann, werden Signaturen exklusiver Endzustände mit Selektionsalgorithmen gesucht. Für diese Suche ist es notwendig, das invariante Massenspektrum von passend kombinierten Spuren zu bestimmen. In diesem Spektrum werden Kandidaten der exklusiven Endzustände durch Schnitte um die jeweilige erwartete invariante Masse des Endzustandes gesucht. Die invariante Masse einer Spurkombination wird aus den übertragenen Spurparametern κ , φ^* und $\cot(\vartheta)$ berechnet. Der für die Berechnung der Impulskomponenten p_x, p_y, p_z und anderer abgeleiteter Größen benötigte Transversalimpuls ist der inversen Spurkrümmung κ proportional. Die Berechnung dieser Größen erfolgt über folgende Beziehungen:

$$p_x = p_t \cdot \cos(\varphi) \quad (6.4)$$

$$p_y = p_t \cdot \sin(\varphi) \quad (6.5)$$

$$p_z = p_t \cdot \cot(\vartheta) \quad (6.6)$$

$$p_{tot}^2 = p_t^2 \cdot (1 + \cot^2(\vartheta)). \quad (6.7)$$

Aufgrund der Latenzzeit der dritten Triggerstufe von $100 \mu s$ erfolgen alle Schnitte der Selektionsalgorithmen in den Quadraten der invarianten Masse. Auf diese Weise wird die unnötige und zeitintensive Berechnung von Wurzelausdrücken in den Selektionsalgorithmen der dritten Triggerstufe vermieden. Diese invariante Masse der Spuren eines Mutterteilchens, zum Beispiel des J/ψ -Mesons, errechnet sich aus den Viererimpulsen p_1, p_2 der beiden Zerfallsteilchen (Myonen) gemäß:

$$M_{J/\psi}^2 = (p_1 + p_2)^2 \quad (6.8)$$

$$M_{J/\psi}^2 = \left(2M_\mu^2 + 2 \cdot (E_{\mu_1} E_{\mu_2} - (p_{x,1} p_{x,2} + p_{y,1} p_{y,2} + p_{z,1} p_{z,2})) \right), \text{ mit } E_{\mu_{1,2}}^2 = (p_{tot}^2 + m_\mu^2). \quad (6.9)$$

Die in den Gleichungen 6.4 bis 6.7 aus den übertragenen Spurparametern abgeleiteten Größen stehen den Selektionsalgorithmen zur Verfügung und werden *vor* dem Start der Selektion bestimmt. Die von den Anwendern geschriebenen Selektionsprogramme können diese Größen verwenden. Die Beziehung 6.9 ist die Ausgangsgleichung für die Berechnung der invarianten Masse von J/ψ -Kandidaten innerhalb von L3.

6.4. Leistungsverhalten des L3 Systems

In Kapitel 6.1.1 wurde gezeigt, dass Übertragungsfehler in der L3-Hardware auf hohem Niveau ausgeschlossen sind. Um das Leistungsverhalten des L3-Systems zu untersuchen, werden Daten mit dem im vorherigen Abschnitt besprochenen Spurparameterformat an das System gesendet. Die Grundlage der hier vorgestellten Untersuchung des Leistungsverhaltens ist ein J/ψ -Datensatz und eine nicht selektierte Datennahme vom Juni 2004. Mit diesen Spurdaten wird die in Abschnitt 6.3 bereits erwähnte numerische Stabilität der kompakten Datenübertragung an L3 untersucht. Darüber hinaus werden die Spurdaten für Untersuchungen bestehender Selektionsalgorithmen verwendet, insbesondere des Laufzeitverhaltens der dritten Triggerstufe.

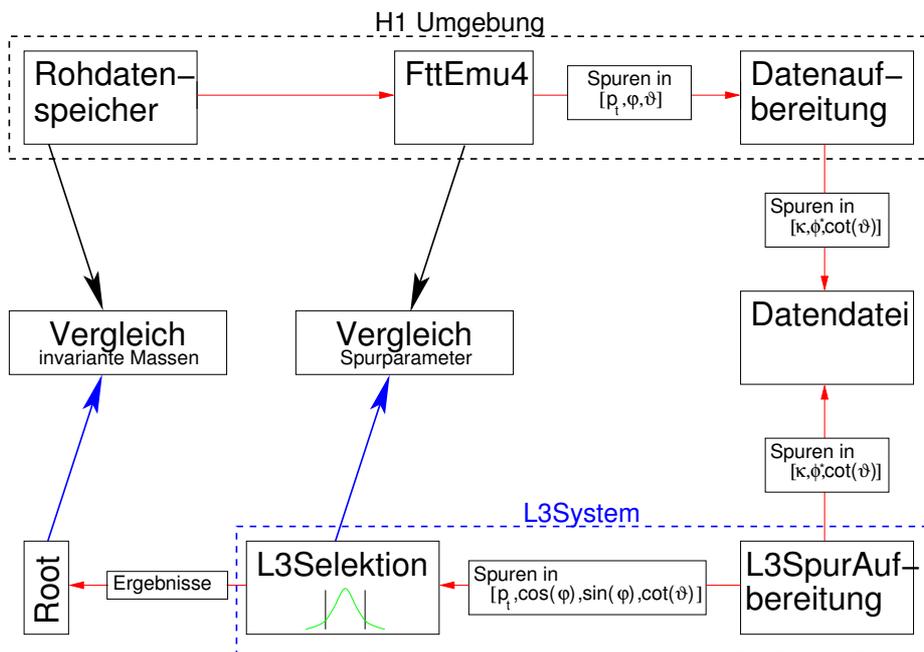


Abbildung 6.5.: Das Verhalten von L3 bei Sendung physikalischer Daten kann mit dem hier gezeigten Verfahren untersucht werden. Die H1-Umgebung mit PC-Rechnern wird zur Vorbereitung der Datendateien genutzt, die anschließend dem L3-System zugeführt werden.

Die vorbereitenden Arbeiten, die zum Einlesen von Spurdaten notwendig sind, werden neben anderen in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Eingangsdaten sind Spuren der zweiten Triggerstufe des FTT, dafür werden die verschiedenen Datensätze mit der FTT-Simulation, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, verarbeitet. Nach der Umrechnung in die vom L3-System verlangten Variablen κ , φ^* und $\cot(\vartheta)$ durch eine Datenroutine können diese in eine Spurdatendatei geschrieben werden. Damit endet der externe Teil der Datenvorbereitung und die Verarbeitung der Spurdaten durch das L3-System beginnt mit dem Einlesen der erstellten Spurdatendatei.

Die Verteilung der eingelesenen Daten innerhalb von L3 verläuft anhand des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Verfahrens. Diese Verfahrensweise wird durch das Startwort der Spurdaten, welches das erste Wort der übertragenen Daten ist, ausgelöst. Auf der Rechenkarte verursacht dieses Startwort der physikalischen Daten die Freigabe einer Semaphore, welche die Datenaufbereitung der Daten startet. Dafür wird eine interne Spurdatenstruktur

mit den übertragenen Spurparametern κ , φ^* und $\cot(\vartheta)$ gefüllt. Außerdem werden bereits *während* des Füllvorgangs der Spurdatenstruktur aus den übertragenen Spurparametern einige physikalische Größen berechnet, die innerhalb der Selektionsalgorithmen für die jeweilige Spur konstant sind. Das sind unter anderem die Winkelfunktionen $\cos(\varphi)$ und $\sin(\varphi)$ des Azimuthalwinkels φ , sowie aus den Impulskomponenten abgeleitete Größen, die in Abschnitt 6.3 eingeführt worden sind.

Sobald der Datentransfer und die Berechnungen abgeschlossen sind, wird eine weitere Semaphore freigegeben. Diese startet zum Beispiel den J/ψ -Selektionsalgorithmus. Die Ergebnisse der Selektionsalgorithmen werden in den Benutzerspeicher der Rechenkarte geschrieben. Zusätzlich wird mit dem Ende dieses Kopiervorgangs ein Interrupt gesendet. Dieser veranlasst die L3-Kontrollkarte mit der Auslese des Benutzerspeichers der Rechenkarte zu beginnen. Innerhalb der L3-Programmstruktur können an jedem Punkt der Verarbeitung Zwischenergebnisse, wie zum Beispiel die aus den Eingangsdaten abgeleiteten Größen, abgefragt werden. Diese Zwischenergebnisse und die Endergebnisse des Selektionsalgorithmus stehen für Untersuchungen zur Verfügung. Dabei wurde die objektorientierte Analysesoftware *root* benutzt [63].

Untersuchung der kompakten Datenübertragung

Zunächst werden die Untersuchungen der Zwischenergebnisse vorgestellt, dafür wurde die Abweichung zwischen den von L2 gesendeten und durch L3 daraus aufbereiteten Größen betrachtet. Verwendet wurde hierfür der J/ψ -Datensatz. Die Abweichung ΔX_x ist durch Gleichung 6.10 definiert. Dabei wird die Differenz der von L3 aufbereiteten Größe x_{L3} von der auf L2 berechneten (und an L3 übertragenen) Größe $x_{Ftt,L2}$ gebildet. Diese Differenz wird durch die in L2 bestimmte Variable $x_{Ftt,L2}$ geteilt:

$$\Delta X_x = \frac{x_{L3} - x_{Ftt,L2}}{x_{Ftt,L2}}. \quad (6.10)$$

Diese Abweichung ΔX_x ist ein geeignetes Maß um die numerische Stabilität der kompakten Datenübertragung, die in Abschnitt 6.3 erläutert wurde, zu untersuchen. Die kompakte Übertragung beinhaltet die Variablen $\cot(\vartheta)$, κ und φ^* . Die Variable $\cot(\vartheta)$ wird direkt von L2 zu L3 transferiert, dort sind deshalb keine Abweichungen erkennbar. An die resultierenden Verteilungen der Abweichung für p_t und φ werden Gaußfunktionen angepasst:

$$f(\Delta X_x) = f_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(X_x - \mu)^2}{\sigma^2}\right). \quad (6.11)$$

Der Transversalimpuls wird zusammen mit dem Vorzeichen der Ladung als Spurkrümmung κ übertragen und ist von geringen Migrationseffekten betroffen. In Abbildung 6.6 ist die Abweichung in p_t gezeigt, der Transversalimpuls wurde aus der Spurkrümmung κ nach Gleichung 4.1 berechnet. Die Abweichungen des in L3 verwendeten Transversalimpulses von dem Wert, der an das L3-System gesendet wurde, sind von der Größenordnung 10^{-3} . Diese sehr kleinen Werte sind jedoch systematisch zu positiven Werten verschoben.

Die Variable φ^* wird in L3 mit Näherungen wieder in die Winkelfunktionen $\cos(\varphi)$ und $\sin(\varphi)$ zurückberechnet, um die Latenzzeit der dritten Triggerstufe einzuhalten. Für den Umgang mit der Variable φ^* ist die numerische Stabilität deshalb von Interesse.

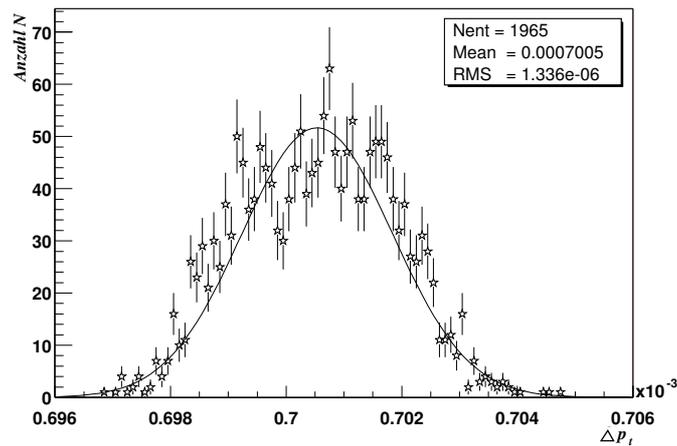


Abbildung 6.6.: Gezeigt ist die Abweichung der Variablen p_t die auf der dritten Triggerstufe aus der Spurkrümmung κ abgeleitet wird.

In Abbildung 6.7 ist eine Abweichung zwischen $\sin_{L3}(\varphi)$ und $\sin_{L2}(\varphi)$ von bis zu zwei Prozent erkennbar. Um die Ursache der Abweichung näher zu untersuchen, wurde eine obere Schranke $\Delta_{\sin(\varphi)} < 0,001$ definiert. Oberhalb dieser Schranke liegen 382 φ^* -Werte der insgesamt 1965 φ^* -Werte der Spuren, was annähernd 20 Prozent sind.

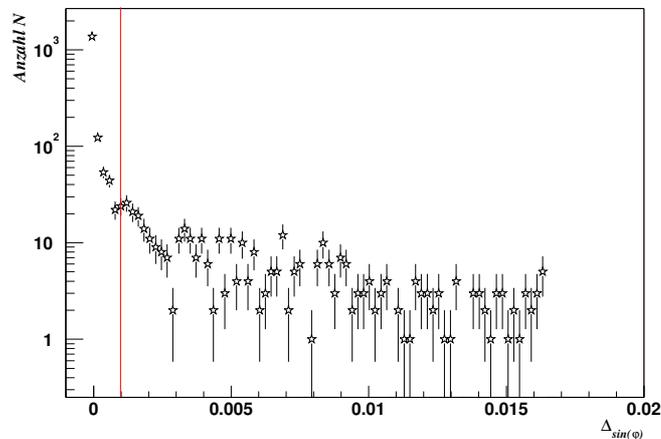


Abbildung 6.7.: Gezeigt ist hier die in Gleichung 6.10 allgemein definierte Abweichung der Variable $\Delta_{\sin(\varphi)}$. Erkennbar sind die Ausläufer hin zu Abweichungen von fast zwei Prozent, die eingezeichnete Schranke wird im Text weiter erläutert.

In Abbildung 6.8 ist zu erkennen, dass alle Einträge der über der Schranke liegenden Werte an den Intervallgrenzen von φ^* liegen. Der Begriff Intervallgrenze wird anhand der Konstruktionsgleichung 6.3 von φ^* deutlich und ist auch in Abbildung 6.4 dargestellt. Die Häufung der Einträge an den Intervallgrenzen erklärt die in Abbildung 6.7 gezeigte Abweichung. Diese ist durch die alternierende Abhängigkeit der Variable φ^* von den beiden Winkelfunktionen $\cos(\varphi)$ bzw. $\sin(\varphi)$ begründet. In jedem Oktanten wird jeweils

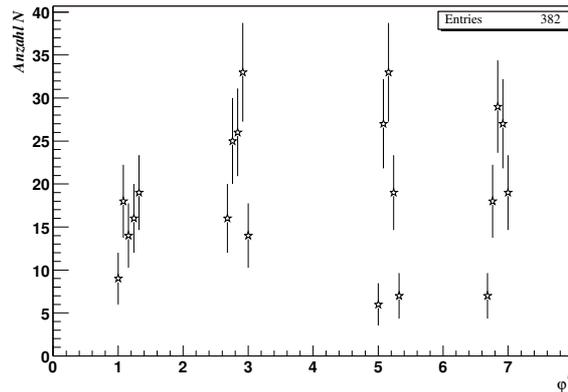


Abbildung 6.8.: Gezeigt ist φ^* der oberhalb der Schranke von $\Delta_{\sin(\varphi)} < 0,001$ liegenden Werte von $\sin(\varphi)$.

eine der Winkelfunktionen direkt aus φ^* abgeleitet und die jeweils andere durch eine Taylorentwicklung genähert. In Abbildung 6.9 ist die Sinusfunktion zusammen mit den ersten drei Termen der Näherung dargestellt. Die Näherung wird in der Programmierung des L3-Systems nach dem zweiten Glied abgebrochen, dadurch resultieren im Intervall $[0, \pi/2]$ gerade an der oberen Intervallgrenze Abweichungen.

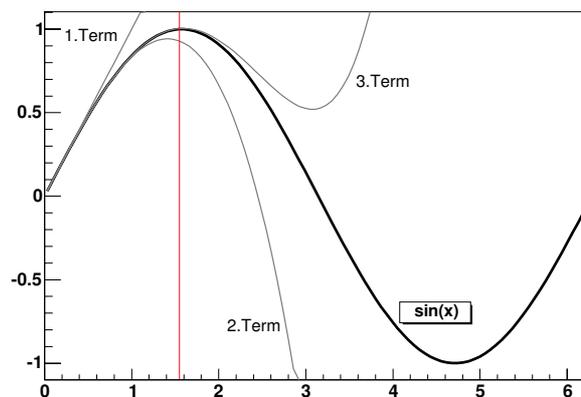


Abbildung 6.9.: Gezeigt ist hier Sinusfunktion und der Verlauf der drei ersten Terme aus der Taylernäherung. Diese Näherung wird in L3 bis zum zweiten Term innerhalb des Intervalls $[0, \pi/2]$ benutzt.

Die hier beobachteten Abweichungen im Azimutalwinkel setzen sich aufgrund der Definition der Impulskomponenten p_x und p_y (siehe Gleichung 6.4) in diese fort. Die Auflösung $\sigma_{L3} = 94 \text{ MeV}$ (siehe 6.4.1) die für die Berechnung der invarianten Masse durch den J/ψ -Selektionsalgorithmus bestimmt wird, ist von diesen Abweichungen betroffen. Zur Untersuchung des genauen Effekts auf die Auflösung wurde ein Datensatz erstellt, der keine Ereignisse enthält, deren Abweichung $\Delta_{\sin(\varphi)}$ vom L2-Wert größer als ein Promille ist. Mit Ausschluß dieser Ereignisse liegt die Auflösung des L3-Selektionsalgorithmus bei $\sigma_{L3} = 87 \text{ MeV}$.

Die Verbreiterung der Auflösung in der invarianten Masse, die durch die Benutzung der

Variable φ^* im kompakten Datenwort entsteht, ist demnach gering. Die dritte Triggerstufe wird Ereignisse erkennen und eine darauf basierende Triggerentscheidung senden, aber keine Rekonstruktion des Ereignisses durchführen. Die Entscheidung für oder gegen das kompakte Übertragungsverfahren wird erst im laufenden Betrieb des FTT gefällt werden, die hier vorgestellten Untersuchungen unterstützen die Bildung einer Entscheidung.

6.4.1. Untersuchung vorselektierter J/ψ -Ereignisse

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mit Daten, die im Jahr 2000 genommen worden sind, durchgeführt. Aus den vollständig rekonstruierten Daten wurde ein fast reiner J/ψ -Datensatz selektiert, der die Daten von elastisch produzierten J/ψ -Mesonen, die in zwei entgegengesetzt geladene Myonen zerfallen, enthält. Anhand dieses Datensatzes wird das Verhalten des L3-Selektionsalgorithmus für J/ψ -Ereignisse untersucht.

Für die Spurselektion der Myonkandidaten [64] wurden die Spuren auf folgende Bereiche beschränkt. Dabei wird der Bereich der zentralen Spurräumen (CJCs) überdeckt:

- $20^\circ < \vartheta < 160^\circ$
- $p_t > 0,8 \text{ GeV}$
- $|z_{vertex}| < 40 \text{ cm}$.

Es werden nur Spuren berücksichtigt, die an den primären Vertex angepaßt sind. Die verwendeten Schnitte in ϑ und $|z_{vertex}|$ stellen sicher, dass nur Spuren die im Zentralbereich des Detektors rekonstruiert wurden, genutzt werden. Durch die Begrenzung der Lage des Vertex in z wird der Untergrund weiter unterdrückt. Die Wahl der p_t -Schwelle orientiert sich an einer guten Identifikation der Myonkandidaten und berücksichtigt die minimale Schwelle des DCr φ -Spurtrigger⁶. Darüberhinaus wird die Schwerpunktenergie des Photon-Proton Systems ($W_{\gamma p}$) auf $100 \text{ GeV} < W_{\gamma p} < 200 \text{ GeV}$ eingeschränkt, um den kinematischen Bereich zu definieren. Die Details dieser Selektion sind in [64] ausführlich beschrieben.

Aus diesem so selektierten Datensatz wurden 1000 J/ψ -Ereignisse für den Test der dritten Triggerstufe benutzt. Die Spuren dieser Ereignisse wurden mit der Simulation der ersten und zweiten Triggerstufe des FTT verarbeitet, damit stehen Spuren zur Verfügung, die von der zweiten Triggerstufe rekonstruiert wurden. Diese werden im folgenden FTT-Spuren genannt. Diese Spuren besitzen aufgrund von nicht optimal angepassten Masken für die Spursegmentsuche Abweichungen in den von der Simulation rekonstruierten FTT-Größen. In Abbildung 6.10 sind deshalb Kontrollverteilungen der FTT-Spuren des verwendeten Datensatzes gezeigt. Die Produktion des J/ψ -Mesons geschieht ohne wesentlichen Übertrag von Transversalimpuls (fast in Ruhe), das heißt mit einem Viererimpulsübertrag $Q^2 \approx 0$ auf das Meson. Dadurch erklärt sich die Häufung von Spuren mit einem Transversalimpuls von $p_t \approx 1,5 \text{ GeV}$, dies entspricht etwa der halben J/ψ -Masse, wie in 6.10 a) gezeigt ist. Die Einträge von Spuren mit Transversalimpulsen unterhalb von 800 MeV resultieren aus den nicht optimierten Masken. In 6.10 b) ist die φ -Verteilung gezeigt, diese ist im Rahmen der kleinen Statistik wie erwartet flach. Die Anzahl der Spuren in den

⁶Drift Chamber r φ , bezeichnet das alte auf CJC-Spurinformationen basierende Spurtriggersystem. Wird vom FTT ersetzt werden.

Ereignissen ist in 6.10 c) gezeigt. Die überwiegende Anzahl der Ereignisse haben erwartungsgemäß zwei Spuren. Bei Ereignissen mit drei Spuren wurde das gestreute Elektron ebenfalls nachgewiesen. Da die Spuren mit der FTT-Simulation prozessiert worden sind, ergeben sich aufgrund von nicht optimal angepassten Masken für die Spursegmentsuche ebenfalls Abweichungen in der Anzahl der rekonstruierten Spuren. Das äußert sich in jeweils zwei Ereignissen mit keiner bzw. vier Spuren, sowie 59 Ereignissen mit genau einer Spur.

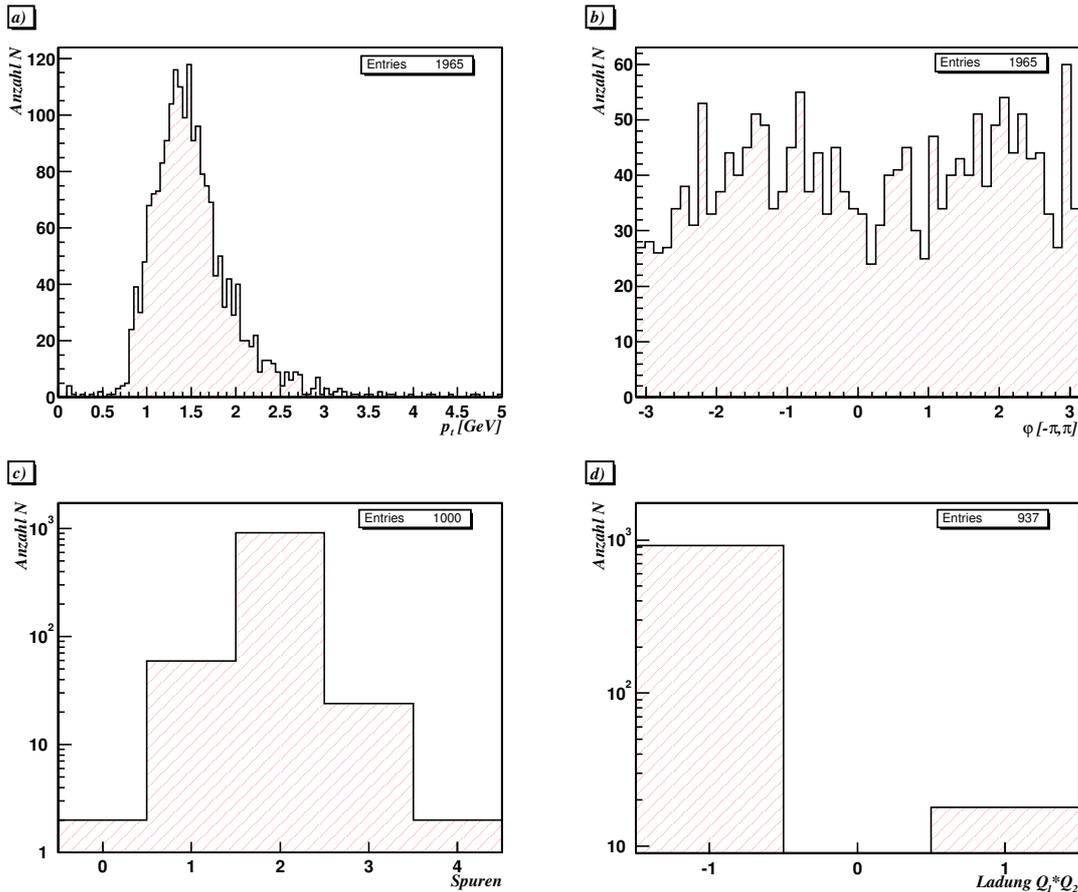


Abbildung 6.10.: Die mit der Simulation der ersten beiden Triggerstufen des FTT verarbeiteten 1000 J/ψ -Ereignisse, die in das L3-System gegeben werden, wurden zunächst anhand einiger Charakteristika kontrolliert. a) zeigt die Transversalimpulsverteilung der Spuren mit einem Maximum bei etwa der halben invarianten Masse des J/ψ . b) stellt die erwartete flache Verteilung der Variable φ dar. In c) ist die Erwartung von überwiegend zwei FTT-Spuren in einem Ereignis ebenfalls bestätigt. Das Produkt der Ladung der Zwei- und Drei-Spur Ereignisse ist, wie in d) gezeigt, überwiegend entgegengesetzt. Einträge für den Wert $Q_1 Q_2 Q_3 = 1$ resultieren aus Ereignissen mit drei Spuren, dabei kann das Produkt der Ladungen auch einen positiven Wert annehmen.

In 6.10 d) wurde für Ereignisse mit zwei oder drei Spuren das Produkt des Ladungsvorzeichens der Spuren gebildet. Im Falle eines Ereignisses mit zwei Spuren resultiert für entgegengesetzt geladene Spuren ein negativer Wert. Die positiven Werte resultie-

ren aus den Ereignissen mit drei Spuren, hierbei kann das Produkt der Ladungen der Spuren mit zumindest zwei entgegengesetzt geladenen Spuren sowohl einen positiven als auch negativen Wert besitzen. Insgesamt erfüllen die FTT-Spuren von 937 der insgesamt 1000 Ereignisse das Kriterium von zwei entgegengesetzt geladenen Spuren. Die Erwartung an das L3-System ist also, dass der J/ψ -Selektionsalgorithmus möglichst alle 937 J/ψ -Ereignisse mit, im Sinne der oben durchgeführten Kontrollen, guten FTT-Spuren findet. Die Spurdaten des J/ψ -Datensatzes wurden, wie bereits anhand der Abbildung 6.5 am Anfang des Abschnitts 6.4 erklärt, für den Transfer in das L3-System vorbereitet. Innerhalb von L3 wird die Spurdatenstruktur aufbereitet und der Selektionsalgorithmus für J/ψ -Mesonen gestartet. Die detaillierte Beschreibung des Ablaufs ist in Kapitel 6 und ausführlich in [53] beschrieben.

Untersuchung des J/ψ -Selektionsalgorithmus

Zuerst verlangt der L3-Algorithmus mindestens zwei Spuren im betrachteten Ereignis, die einen minimalen Transversalimpuls von $p_t = 700$ MeV und entgegengesetzte Ladungen tragen. Damit wird ein großer Anteil des Untergrundes aus dem Zerfall von leichteren Mesonen in zwei geladene Spuren verworfen. Die endgültige Triggerentscheidung für den Kandidaten eines J/ψ -Ereignisses wird durch die Einschränkung der invarianten Masse der kombinierten Spuren getroffen. Die Suche nach möglichen Kandidaten wird in einem Suchfenster von 1200 MeV um die nominelle J/ψ -Masse ausgeführt, damit wird die Selektivität des Algorithmus gegenüber Untergrundereignissen weiter erhöht. Es ist zu beachten, dass der Selektionsalgorithmus nach der ersten passenden Spurkombination, mit einer invarianten Masse innerhalb des Suchfensters, abbricht. Ausgehend von den Gleichungen 6.9 werden im folgenden die Schnitte im invarianten Massenspektrum erläutert. Das oben angesprochene Suchfenster wird durch eine obere Schranke Δ der Abweichung zwischen der nominellen Masse des J/ψ s und der aus den Spuren rekonstruierten Masse festgelegt:

$$|M_{\mu\bar{\mu}} - M_{J/\psi}| < \Delta. \quad (6.12)$$

Die Berechnung von invarianten Massen beinhaltet die Berechnung von besonders zeitaufwendigen Wurzelausdrücke, um dies zu vermeiden, wird Gleichung 6.12 geeignet umgestellt und quadriert:

$$M_{\mu\bar{\mu}}^2 \geq (M_{J/\psi} - \Delta)^2 \quad \wedge \quad M_{\mu\bar{\mu}}^2 \leq (M_{J/\psi} + \Delta)^2. \quad (6.13)$$

In diese Gleichung werden nun die Variablen der Spurkandidaten eingesetzt, damit ergibt sich:

$$C_2 \leq E_\mu E_{\bar{\mu}} - \vec{p}_\mu \vec{p}_{\bar{\mu}} \quad \wedge \quad C_1 \geq E_\mu E_{\bar{\mu}} - \vec{p}_\mu \vec{p}_{\bar{\mu}}. \quad (6.14)$$

Die mit $C_{1,2}$ bezeichneten Größen sind Konstanten und werden nicht innerhalb des Algorithmus berechnet, sondern zusammen mit der Aufbereitung der eingehenden Daten. Die Konstanten sind gegeben durch:

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot \left((M_{J/\psi} + \Delta)^2 - 2 \cdot M_\mu^2 \right), \quad (6.15)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \cdot \left((M_{J/\psi} - \Delta)^2 - 2 \cdot M_\mu^2 \right). \quad (6.16)$$

Auch um die Energien $E_{\mu,\bar{\mu}}$ der Teilchen zu bestimmen, wäre die Berechnung von Wurzelausdrücken notwendig. Das kann durch Quadrieren der Gleichungen 6.14 vermieden werden. In der Selektionsroutine wird also folgender Ausdruck mit den Konstanten $C_{1,2}$ verwendet:

$$(C_1 + \vec{p}_\mu \vec{p}_{\bar{\mu}})^2 \geq E_\mu^2 E_{\bar{\mu}}^2 (C_2 + \vec{p}_\mu \vec{p}_{\bar{\mu}})^2 \leq E_\mu^2 E_{\bar{\mu}}^2. \quad (6.17)$$

Wie in Abbildung 6.5 angedeutet, wird der J/ψ -Datensatz vom L3-System eingelesen und in der bereits zu Anfang des Kapitels besprochenen Art und Weise zur Selektion vorbereitet. Im Testlauf hat der Selektionsalgorithmus aus den 1000 Ereignissen 933 J/ψ -Ereignisse identifiziert. Damit kann eine Effizienz des Algorithmus mit $\epsilon = N_{L3}/N_{gesamt} = (0,933 \pm 0,008)$ angegeben werden. Wie bereits in Abbildung 6.10 c) gezeigt beinhalten 61 Ereignisse weniger als zwei gute FTT-Spuren, in diesen Ereignissen kann kein J/ψ -Ereignis gefunden werden. Sofern nur die Ereignisse mit mehr als zwei guten FTT-Spuren berücksichtigt werden, resultiert eine Effizienz von:

$$\epsilon = \frac{N_{L3}}{937} = (0,996 \pm 0,002). \quad (6.18)$$

Diese Effizienz nahe dem Wert eins entspricht auch der Erwartung. Die Begründung für die nicht gefundenen J/ψ -Ereignisse liegt, wie bereits angedeutet, in der Simulation der ersten beiden Triggerstufen des FTT. Die dabei zum Einsatz kommende Kalibrierung ist noch nicht optimal. So sind die zur Spursegmentsuche verwendeten Masken nicht für alle Datennahmeperioden produziert worden.

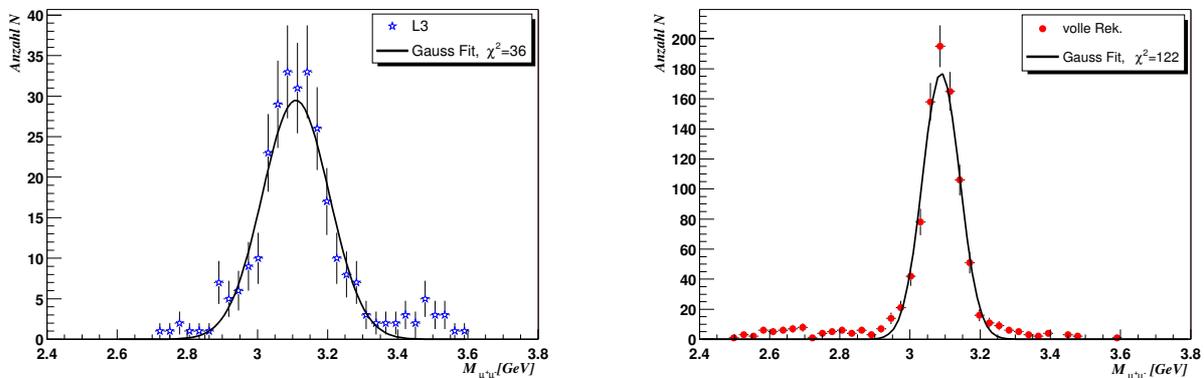


Abbildung 6.11.: Gezeigt ist das invariante Massenspektrum der beiden aus dem Zerfall des J/ψ -Mesons stammenden Myonen. Dabei ist links die Rekonstruktion von FTT L3 und rechts die volle Rekonstruktion jeweils mit den entsprechenden Gaußanpassungen wiedergegeben.

Das aus dem Selektionsalgorithmus resultierende invariante Massenspektrum des J/ψ -Datensatzes ist in Abbildung 6.11 gezeigt und wurde nach Gleichung 6.9 berechnet. Die Anpassung einer Gaußfunktion an die Massenverteilung ergibt eine invariante Masse des J/ψ -Mesons von (3108 ± 7) MeV. Diese weicht damit weniger als zwei Standardabweichungen von der nominellen J/ψ -Masse von $(3096,87 \pm 0,04)$ MeV [16] ab. Die Auflösung ergibt sich zu $\sigma_{L3} = 94$ MeV und ist mit der aus der FTT-Simulation erhaltenen Auflösung von $\sigma_{sim} = 84$ MeV zu vergleichen, siehe hierzu den Anfang des Kapitels 5 und [49]. Die

Werte zeigen eine gute Übereinstimmung, die kleine Differenz kann aus dem zeitoptimierten Selektionsalgorithmus und den dafür benötigten Näherungen während der Aufarbeitung der eingehenden Daten resultieren. In Abschnitt 6.4 wurde bereits erwähnt, dass bei Ausschluss von φ -Werten mit zu großen Abweichungen vom L2-Wert die Auflösung des L3-Selektionsalgorithmus bei $\sigma_{L3} = 87 \text{ MeV}$ liegt.

Zur Kontrolle wurde das invariante Massenspektrum der vollständig rekonstruierten Spuren berechnet, dieses ist in Abbildung 6.11 rechts gezeigt. Die vollständige Rekonstruktion verfügt über ein Auflösungsvermögen von $\sigma_{\text{voll.Rek.}} = 53 \text{ MeV}$ und liefert eine invariante Masse von $M_{J/\psi} = (3088 \pm 2) \text{ MeV}$.

6.4.2. Das L3-Zeitverhalten

Eine kritische Größe für das L3-System ist das Zeitverhalten der Selektionsalgorithmen. In früher durchgeführten Zeitmessungen wurde gezeigt, dass die Berechnung der physikalischen Größen aus den übertragenen Spurdaten und der jeweilige Selektionsalgorithmus innerhalb der Latenzzeit der dritten Triggerstufe von $100 \mu\text{s}$ ausgeführt werden kann [53]. Jedoch wurde in diesen Untersuchungen die Empfängerkarte durch einen Power-PC simuliert, da das Serienmodell nicht zur Verfügung stand.

Nach der Implementierung der Empfängerkarte wurde das Zeitverhalten des vollständigen L3-Systems untersucht. Für diese Tests wird ein Rohdatensatz des 17. Juni 2004 verwendet. Aus diesem Datensatz werden 8000 Ereignisse benutzt, um die Untersuchungen des Zeitverhaltens auszuführen. Das L3-System besteht für diesen Test aus der Kontrollkarte, der Rechenkarte und der Empfängerkarte. Dabei werden zwei verschiedene Rechenkartentypen eingesetzt. Zum einen wird die bereits vorhandene MVME2400 Karte eingesetzt. Die andere benutzte Rechenkarte ist die neue MVME5500 Karte, die in Abschnitt 5.1 vorgestellt wurde.

Die Daten wurden für beide Rechenkarten in Form des kompakten Datenwortes mit den Variablen κ , φ^* und $\cot(\vartheta)$ in das L3-System eingelesen, dieser Fall hat aufgrund der Umrechnung von φ^* in $\sin(\varphi)$ und $\cos(\varphi)$ den höchsten Zeitbedarf. In den Untersuchungen des Zeitverhaltens ist dieser zeitintensive Fall betrachtet worden.

In Abschnitt 6.1 wurde die Verarbeitung eingehender Daten in das L3-System besprochen, innerhalb der Verarbeitungskette ist es möglich, verschiedene Zeitmarken zu setzen. Diese Zeitmarken werden relativ zu dem Zeitpunkt T_0 gemessen, an dem die Übertragung der Datenworte von der DPIO-Karte in den Arbeitsspeicher der Rechenkarte abgeschlossen ist. Das Zeitverhalten wird mit zwei Zeitmarken untersucht, das sind:

T_1 : Rechenzeit (Aufbereitung der L2-Daten) beendet

T_2 : Triggeralgorithmus beendet.

Zusätzlich gibt es eine so genannte Übertragungszeit von etwa $10 \mu\text{s}$. Diese beinhaltet unter anderem die Auswertung der Interrupts durch die Rechenkarte, den Startvorgang der jeweiligen Routinen und den Transfer selbst [53].

Die Abbildung 6.12 zeigt für beide Rechenkarten das ermittelte Zeitverhalten. Die Rechenzeit $T_1 - T_0$ wächst mit steigender Spuranzahl, wie erwartet, linear an und ist in Abbildung 6.12 mit schwarzen Punkten dargestellt. Die Suchzeit $T_2 - T_1$ des Selektionsalgorithmus ist in rot dargestellt und zeigt eine annähernd konstante Entwicklung mit der zunehmenden Anzahl der Spuren. Diese entsteht aufgrund des Abbruchs des Algorithmus

nach der ersten Spurkombination, welche die Anforderungen erfüllt. Zu beachten ist außerdem, dass die Anzahl der Ereignisse mit vielen Spuren sehr gering ist.

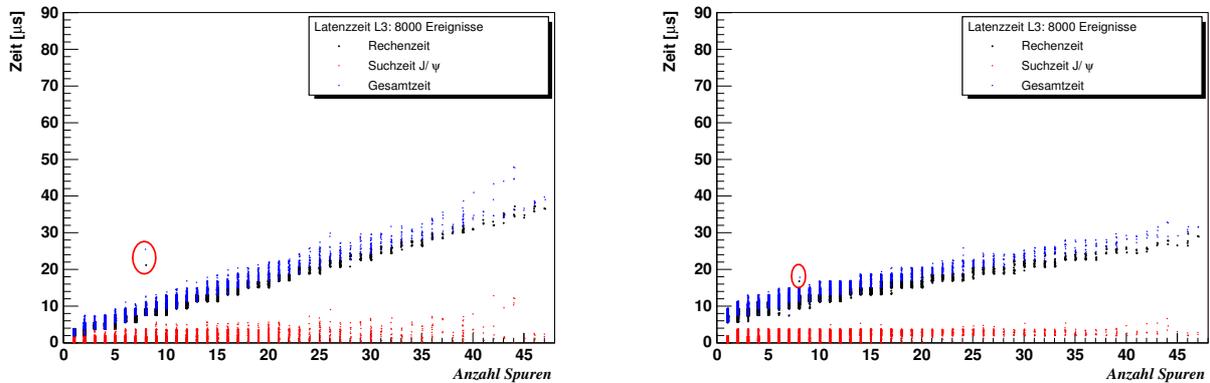


Abbildung 6.12.: Das Zeitverhalten des L3-System ist mit 8000 Ereignissen untersucht worden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse im Falle des Selektionsalgorithmus für J/ψ -Ereignisse, wobei die zugrunde liegenden Spurdaten in Form des kompakten Datenwortes an das L3-System gesendet worden sind. In der links gezeigten Messung wird eine MVME2400 Karte benutzt, wohingegen die rechts gezeigte Messung mit der neuen MVME5500 Karte durchgeführt worden ist.

Die in blau gezeigte Gesamtzeit ist, auch bei der maximalen Spuranzahl eines Ereignisses von 48 Spuren, für beide Kartentypen deutlich unterhalb von $50 \mu\text{s}$. Zu dieser Zeit muss die Übertragungszeit addiert werden. Die Ergebnisse der in Abbildung 6.12 links gezeigten Messung, wurden mit der MVME2400 Karte ausgeführt und sind mit denen in [53] vergleichbar. Die Übertragungszeit liegt, wie bereits erwähnt, konstant bei etwa $10 \mu\text{s}$. Wie erwartet wird dieser Wert sowohl in den Messungen mit dem Prototypen der Empfängerkarte [53], als auch für das Serienmodell der Empfängerkarte abgeleitet.

Die Laufzeitmessung wurde jeweils zweimal ausgeführt, um festgestellte Auffälligkeiten, wie zum Beispiel das in Abbildung 6.12 zu sehende zeitintensive Ereignis mit acht Spuren, näher zu untersuchen. Der zweite Durchlauf der 8000 Ereignisse liefert ein nahezu identisches Ergebnis, das auffällige Acht-Spur-Ereignis ist weiterhin zeitintensiv. Daraus wird der Schluss gezogen, dass bei erhöhten Laufzeiten kein Problem der verwendeten Hard- oder Software vorliegt, sondern einige wenige Ereignisse besonders zeitintensiv sind. Die Ergebnisse der in 6.12 rechts gezeigten Messung der Gesamtzeit für die neue MVME5500 Karte zeigen ein deutlich besseres Zeitverhalten. Dieses ist aufgrund der verbesserten Prozessorarchitektur und der hier genutzten erweiterten Befehlssätze, wie in Abschnitt 5.1 angedeutet, möglich geworden. Insbesondere ist der Zeitaufwand für das auch in dieser Messung auffällige Ereignis wesentlich geringer, das gesamte Spektrum verfügt über deutlich weniger Streuung innerhalb der einzelnen gemessenen Zeitmarken.

Die Laufzeitmessung wurde weiterhin mit dem D^* -Suchalgorithmus, der in [53] ausführlich beschrieben ist, wiederholt. Dieser Algorithmus beinhaltet aufgrund der Zerfallssignatur eine weitere Schleife, daraus ergeben sich deutlich verlängerte Suchzeiten. In Abbildung 6.13 ist wiederum links das Laufzeitverhalten der MVME2400-Karte und rechts das der

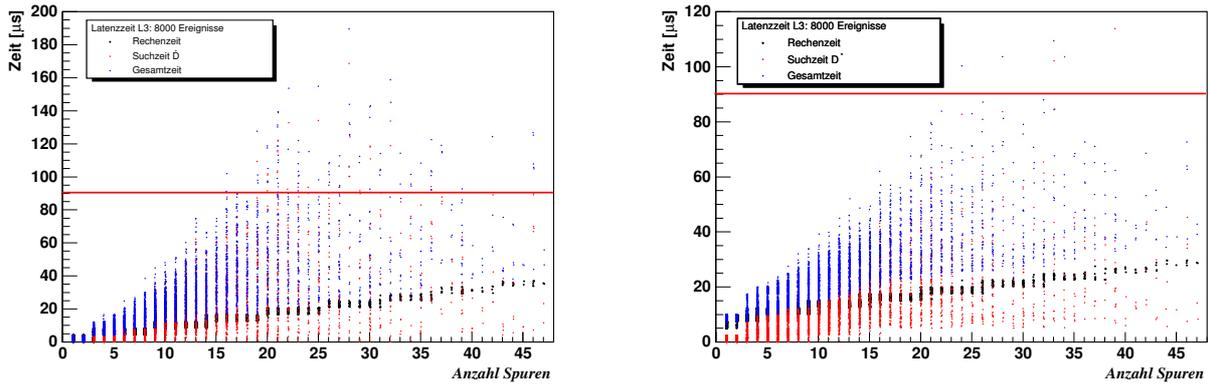


Abbildung 6.13.: Das Zeitverhalten des L3-System ist mit 8000 Ereignissen untersucht worden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse im Falle des Selektionsalgorithmus für D^* -Ereignisse. In der links gezeigten Messung ist eine MVME2400 Karte benutzt worden, wohingegen die rechts gezeigte Messung mit der neuen MVME5500 Karte durchgeführt worden ist. Die eingezeichnete Linie kennzeichnet in beiden Histogrammen die Latenzzeit der dritten Triggerstufe.

neuen MVME5500-Karte gezeigt. Zu beachten ist die unterschiedliche Zeitskala im Vergleich zu Abbildung 6.12, diese reicht für die neue Karte bis $120 \mu\text{s}$ und für die MVME2400-Karte bis $200 \mu\text{s}$. Die Latenzzeit der dritten Triggerstufe ist in Abbildung 6.13 als rote Linie bei $90 \mu\text{s}$ angedeutet. Für den alten Kartentyp lagen noch 1,6 % der untersuchten Ereignisse [53] über der vorgegebenen Zeit. Der neue Kartentyp zeigt hier ebenfalls ein verbessertes Zeitverhalten, lediglich 0,075 % der 8000 untersuchten Ereignisse benötigen mehr als $90 \mu\text{s}$.

Aus den Zeitmessungen der beiden Selektionsalgorithmen ist eine Halbierung der benötigten Rechenzeit bei maximaler Spuranzahl für die neue Rechenkarte abzuleiten.

Dieser Faktor zwei in der Rechenzeit motivierte den Test einer Routine zur Selektion von Jets. Basierend auf [65, 66] konnte eine weiter verbesserte Routine auf dem neuen Power-PC getestet werden, obwohl diese nicht vollständig integriert wurde. Erste Zeitmessungen ergeben bei maximaler Spuranzahl Werte zwischen 80 und $90 \mu\text{s}$, damit wäre die Anforderung eines L3-Selektionsalgorithmus erfüllt. Weitere Untersuchungen des Selektionsvermögens des Algorithmus stehen jedoch noch aus.

Selektierte J/ψ -Ereignisse

Der Selektionsalgorithmus für J/ψ -Ereignisse ist in Abschnitt 6.4.1 erklärt worden, deshalb wird hier das von L3 berechnete invariante Massenspektrum der 8000 Ereignisse vorgestellt. In Abbildung 6.14 links ist das vom alten Rechenkartentyp berechnete invariante Massenspektrum der J/ψ -Kandidaten gezeigt. Wohingegen rechts die Ergebnisse der neuen Rechenkarte abgebildet sind, in beiden Massenspektren ist entsprechend der Erwartung kein Signal für ein J/ψ -Meson zu sehen. Die Ergebnisse sind reproduzierbar, das ist durch einen wiederholten Durchlauf der Selektion getestet worden. Des weiteren sind die Ergebnisse der beiden Rechenkarten vergleichbar, es sind keine großen Abweichungen vorhanden, kleinere Abweichungen sind durch Migration erklärbar. Die Anzahl der selektierten Ereignisse bleibt für beide Rechenkarten konstant bei $N_{J/\psi\text{-Kandidat}} = 982$. Damit

ist weitgehend ausgeschlossen, dass die durchgeführten Optimierungen in der Software zu falschen Ergebnissen führen.

Bereits ohne die explizite Benutzung von Informationen der Myonsysteme wird durch das

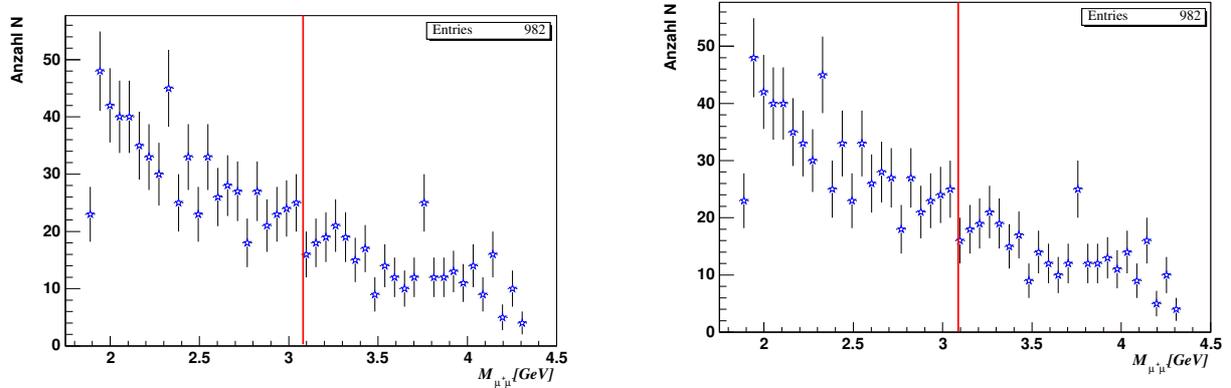


Abbildung 6.14.: *Das invariante Massenspektrum der aus 8000 Ereignissen selektierten J/ψ -Kandidaten. Das links gezeigte Spektrum ist mit der MVME2400 Karte erstellt worden, wohingegen das rechts gezeigte Spektrum von der neuen MVME5500 Karte durchgeführt worden ist. Die eingezeichnete senkrechte Linie kennzeichnet die invariante Masse des J/ψ -Vektormesons.*

L3-System des FTT eine Ereignisreduktion um eine Größenordnung möglich. Die Selektivität des Algorithmus ist noch nicht optimiert. Mit der Einschränkung des Suchfensters zu kleinen invarianten Massenkombinationen ist eine weiter verbesserte Reduktion zu erwarten. Für eine Halbierung des Suchfensters auf $\Delta = 600$ MeV folgen 537 selektierte J/ψ -Kandidaten, dem entspricht eine weitere Reduktion der Ereignisse um etwa einen Faktor zwei.

7. Zusammenfassung

Der Umbau des HERA-Speicherringes im Jahre 2000 und 2001 hat zu einer gesteigerten Luminosität geführt und damit auch zu einer entsprechend erhöhten Ereignisrate. Diese Ereignisrate muss vom H1-Experiment intelligent reduziert werden, um möglichst ohne Datenverlust die interessanten Ereignisse zu sichern. Die Rate von Ereignissen, die durch hohe Q^2 -Werte gekennzeichnet sind, ist auch in der HERA-II Phase niedrig genug, um vom bestehenden Trigger- und Datennahmesystem verarbeitet werden zu können.

Im Gegensatz dazu sind im niedrigen Q^2 -Bereich die Raten nach dem Umbau zu groß, um vom bestehenden System effizient verarbeitet zu werden. Dieser Energiebereich ist interessant, da neben der hohen Rate bereits vermessener Prozesse auch Ereignisse mit interessanten exklusiven Endzuständen auftreten. Diese besonderen Endzustände sind gerade in der HERA-II Phase von Interesse, wobei die bestehenden Trigger im niedrigen Q^2 -Bereich keine hinreichende Trennung von uninteressanten Reaktionen und damit keine ausreichende Ratenreduktion erreichen können. Das führt auf der vierten Triggerstufe des H1-Triggersystems, die eine feste Eingangsrate von 50 Hz besitzt, zum willkürlichen Verwerfen von Ereignissen, sobald diese Rate überschritten wird. Dieser Verlust von physikalisch interessanten Ereignissen kann nur vermieden werden, indem die Selektivität des Triggersystems auf frühen Stufen erhöht wird. Dazu wurde von der H1-Kollaboration ein schneller Spurtrigger (FTT) für das H1-Experiment entwickelt.

Der FTT ist in der Lage, Teilchenspuren präzise zu rekonstruieren und anhand der rekonstruierten Spurparameter Triggerentscheidungen zu treffen. Diese ermöglichen es dem H1-Triggersystem die Datenrate des H1-Experiments weiter zu reduzieren, so dass keine Daten verworfen werden müssen. Deshalb ist der FTT als mehrstufiges Triggersystem ausgelegt. Auf der ersten Triggerstufe werden innerhalb von $2,3 \mu\text{s}$ die analogen Signale ausgewählter Drahtlagen der zentralen Spurkammern digitalisiert und analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen wird eine L1-Triggerentscheidung des FTT getroffen. Sofern ein Ereignis von der ersten Triggerstufe akzeptiert worden ist, wird innerhalb von $20 \mu\text{s}$ eine wesentlich verbesserte dreidimensionale Spurrekonstruktion ausgeführt. Mit den derart berechneten genauen Spurparametern wird zunächst eine L2-Triggerentscheidung getroffen. Wird das Ereignis von der zweiten Triggerstufe akzeptiert, erfolgt eine aufwendige Ereignisrekonstruktion durch die dritte Triggerstufe. Diese verwendet die auf L2 berechneten Spurparameter und bestimmt daraus invariante Massen. Das FTT-System ermöglicht dadurch eine höhere Selektionseffizienz auf frühen Triggerlagen, das ist insbesondere für exklusive Endzustände interessant. Die gesamte Ausgangsrate der dritten Triggerstufe wird bei 50 Hz liegen, womit die Eingangsrate des L4-Systems eingehalten wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die dritte Triggerstufe des FTT untersucht; ein Schwerpunkt bildete die Integration des Serienmodells der Empfängerkarte in das bestehende L3-System. Die dazu notwendigen Änderungen und Neuentwicklungen der Programmiersbibliothek des L3-Systems wurden vorgenommen. Anschließend wurde die gelungene Integration der Empfängerkarte anhand des Tests der L3-Systemintegrität gezeigt. Außerdem wurde ein L2-Testsystem aufgebaut, von dem aus Spurdaten an die dritte Triggerstufe gesendet werden können. Für den Empfang dieser Daten auf der Empfängerkarte ist eine LVDS-Piggyback Karte notwendig, deren Programmierung für diesen Zweck angepasst

wurde. Mit dem Aufbau wurde der Datentransfer von der zweiten in die dritte Triggerstufe getestet und Fehlerquellen behoben, so dass ein fehlerfreier Transfer von Daten gewährleistet ist.

Das L3-System wurde im weiteren mit verschiedenen Datensätzen untersucht. Dabei konnten die an das System gestellten Erwartungen bestätigt werden. Zusätzlich wurde das Laufzeitverhalten der dritten Triggerstufe untersucht. Dabei konnten keine negativen Auswirkungen des Serienmodells der Empfängerkarte auf das Zeitverhalten festgestellt werden. Im Rahmen dieser Laufzeitmessungen konnten Untersuchungen mit zwei verschiedenen Power-PCs ausgeführt werden, da kurz vor Abschluss dieser Arbeit der neue Kartentyp MVME5500 verfügbar wurde. Aus dem Vergleich der Ergebnisse dieser zwei Kartentypen wurde ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil der neuen Karten ersichtlich. Dies äußert sich vor allem beim Selektionsalgorithmus für D^* -Ereignisse, der im Gegensatz zum Betrieb auf der alten Power-PC Karte unterhalb der Latenzzeit von $100\ \mu\text{s}$ beendet wird. Insgesamt kann aus den Untersuchungen ein Geschwindigkeitszuwachs für die neue Rechenkarte um einem Faktor zwei abgeleitet werden. Die vollständige Integration der neuen MVME5500 Karten in das L3-System wäre deshalb begrüßenswert.

Weiterhin wurde im Rahmen dieser Arbeit die Echtzeit-Kontrolle der Auslese über eine graphische Benutzeroberfläche ermöglicht. Dadurch ist erstmalig die wesentlich benutzerfreundlichere Steuerung der Auslesebanke mit dieser graphischen Benutzeroberfläche möglich. Die dafür benötigten Routinen wurden entwickelt und ermöglichen unter anderem auch den umfangreicheren und vor allem bequemen Test der FTT-Auslese.

Nach dem Abschluss dieser Arbeit ist es möglich, das FTT-L3 System zusammen mit der ersten und zweiten Triggerstufe des FTT zu betreiben und die notwendige Integration der dritten Triggerstufe in das H1-Triggersystem zu beginnen.

A. Die graphische Benutzeroberfläche

Die Komplexität des FTT und die Vielzahl der genutzten elektronischen Komponenten und Übertragungsprotokolle legten die Schaffung einer graphischen Benutzeroberfläche (GUI) nahe. Die Befehlsvergabe über ein GUI bietet im Vergleich zu Befehlen, die mit einer Textkonsole gegeben werden, ein hohes Maß an Komfort und vereinfacht dadurch den Betrieb des FTT wesentlich. Dieses GUI ist einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess unterworfen und wird den technischen Anforderungen laufend angepasst [68, 67]. Die Programmierung des GUI wird mit der *LabView*-Umgebung durchgeführt [69], damit ist eine umfangreiche Programmierumgebung zur Erstellung graphischer Kontrollfenster gegeben. In diesem Anhang werden nach einer kurzen Einleitung die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Funktionalitäten des GUI vorgestellt. Diese ermöglichen eine vereinfachte graphische Steuerung der Auslese des FTT. Das für diese Aufgabe entwickelte Programm und die Funktionsweise wird in A.1 vorgestellt.

Jede Kontrollkarte in den unterschiedlichen Crates des FTT baut mit dem TCP/IP-Protokoll¹ eine Netzwerkverbindung mit einem entfernten Server-PC auf, wie in Abbildung A.1 skizziert ist. Auf dem Server-PC läuft, für den GUI-Benutzer nicht direkt sicht-

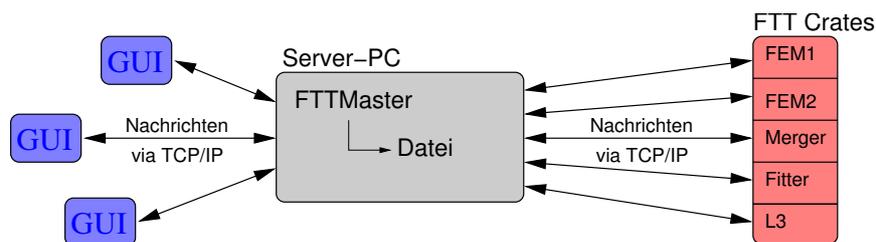


Abbildung A.1.: Die Steuerung des FTT erfolgt über Nachrichten, die mit dem TCP/IP-Protokoll übertragen werden. Hierzu bauen die einzelnen Crates des FTT eine Verbindung mit einem Server-PC auf. Mit diesem sind die von den Benutzern gestarteten GUIs verbunden und ermöglichen so die gezielte Steuerung des FTT-Systems.

bar, das Programm *fttMaster* [71], welches die Kommunikation und den Datenversand an das FTT-System kontrolliert. Diese zwischen dem GUI und den Kontrollkarten angeordnete Instanz stellt sicher, dass trotz einer abgestürzten Benutzeroberfläche die Kontrolle des FTT-Systems möglich ist. Des weiteren werden die empfangenen Statusnachrichten von der Routine zur dauerhaften Sicherung in eine Datei geschrieben, auf diese Weise gehen keine Nachrichten verloren. Mit dem *fttMaster*-Prozess verbinden sich die auf unterschiedlichen und entfernten PCs laufenden GUIs, dadurch ist ein Maximum an Flexibilität und Sicherheit der FTT-Kontrolle gegeben.

Die eigentliche Kommunikation zwischen den Instanzen erfolgt durch den Austausch von Nachrichten in einem speziellen Format, die mit dem TCP/IP-Protokoll versendet werden. Das dafür benötigte Nachrichtensystem ist in Abschnitt 4.1 beschrieben worden. Einer Statusnachricht können unterschiedliche Prioritäten zugeordnet werden. Die folgende

¹Hier wird das **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol/**I**nternet **P**rotocol abgekürzt TCP/IP genutzt.

Liste enthält diese Prioritäten in absteigender Reihenfolge:

- ERROR – Fehlermeldungen des Systems
- WARNING – Systemwarnungen
- INFO1 – Informationen hoher Priorität
- INFO2 – Informationen niedriger Priorität
- INFO3 – Informationsmeldungen zur expliziten Fehlersuche.

Bis zu welcher Priorität die Statusnachrichten an das GUI übermittelt werden, kann in der Programmierung des FTT-Systems flexibel eingestellt werden. Die Menge der ausgegebenen Statusnachrichten steigt mit der Priorität INFO3 stark an. In Abbildung A.2 ist eine Übersicht der Fenster beim Start des GUI gezeigt. Die Verbindung mit dem `fttMaster`-Prozess wird mit dem Fenster *Connection.vi* ausgeführt, dabei wird eine Verbindung zu einem entfernten Server-PC aufgebaut. Eingehende Statusnachrichten der Kontrollkarten werden im *Log.vi*-Fenster dargestellt.

Dieses GUI ermöglicht eine benutzerfreundliche Steuerung des gesamten FTT-Systems, so werden zum Beispiel die im FTT-System eingesetzten verschiedenen elektronischen Karten mit Hilfe des GUI kontrolliert und auch konfiguriert. Das beinhaltet unter anderem auch die Programmierung der einzelnen FPGAs der Karten. Neben diesen Hardware-Kontrollen ermöglicht das GUI auch den Zugriff auf die umfangreiche Software der verschiedenen Kontrollkarten. Mit Hilfe des GUI wird unter anderem auch die systemweite FTT-Datenauslese kontrolliert.

A.1. Auslesekontrolle

Der FTT besitzt eine systemweite Datenauslese, dabei schreibt jede Triggerstufe des FTT die Daten in dafür vorgesehene Bänke [70, 53]. Diese Datenauslese ist auch für die Aufbauphase des FTT wichtig, damit wird der fehlerfreie Betrieb der einzelnen Triggerstufen getestet. Eventuell auftretende Fehlerquellen können auf diese Weise besser isoliert und behoben werden.

Die Steuerung der Auslesekontrolle kann unter einer bestimmten Voraussetzung, nämlich einer Schnittstelle zu den Power-PCs, auch mit dem GUI ausgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Routinen erstellt worden, welche die Nachrichten des GUI interpretieren können und die entsprechenden Bänke für die Auslese zu setzen. Ohne eine solche Schnittstelle müssten vor jedem Start einer Datennahme die zu schreibenden Bänke “von Hand“ gesetzt werden, wesentlich komfortabler ist die Steuerung mit dem GUI.

Für diesen Zweck wird eine globale Struktur in der Programmierung der Kontrollkarten eingeführt, in welchem die Bezeichnungen der auszulesenden Bänke gespeichert werden. Anhand den in dieser Struktur “gesetzten“ Bänken, entscheiden die Power-PCs welche Bänke zur Auslese bereit gestellt werden. Änderungen in dieser Struktur werden mit den Routinen *fttReadoutBanks* und *fttMonitorBanks*, jeweils für die Steuerung der auszulesenden oder lediglich zu überwachenden Bänke, ausgeführt. Die Routinen knüpfen an die mit dem GUI geschaffene Schnittstelle an. Für den Versand der ausgewählten Bänke wird das Nachrichtensystem genutzt. Die Auslesebänke werden dabei vom GUI in einem speziellen Format an die jeweiligen Kontrollkarten der einzelnen Crates gesendet.

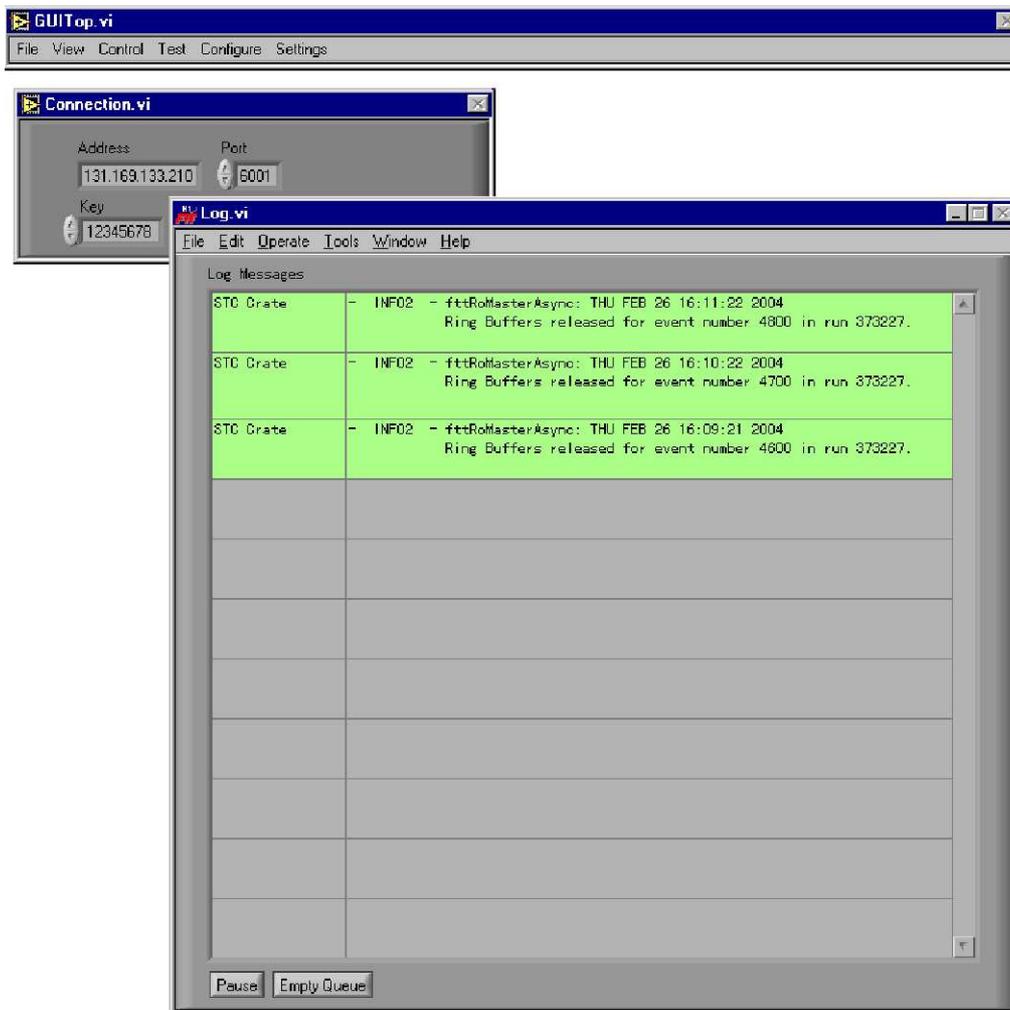


Abbildung A.2.: Abgebildet sind die verschiedenen Startfenster der graphischen Benutzeroberfläche, auf die Funktionen der einzelnen Fenster wird im Text weiter eingegangen.

Auf der Ebene des GUI existiert das in Abbildung A.3 gezeigte Kontrollfenster zur Auswahl der Auslesebänke. Das Kontrollfenster ist unterteilt in zwei Reihen mit LEDs. Die obere Reihe betrifft die Auslesekontrolle des FTT, wohingegen die untere Reihe die Auswahl der Monitorbänke steuert. Zwischen den beiden Reihen ist jeweils der Name der Auslesebank angegeben. Die Auswahl der Auslesebänke kann für jedes Crate einzeln festgelegt und gesendet werden, allerdings sollten während einer Datennahme alle Power-PCs der Subsysteme des FTT die gleiche Konfiguration besitzen.

Das durch die Auswahl der Bänke entstehende Bitmuster wird vom GUI als ganze Zahl interpretiert und mit dem Nachrichtensystem an die einzelnen Kontrollkarten übertragen. Die oben genannten und auf den Kontrollkarten laufenden Routinen, interpretieren diese Zahl und setzen die entsprechenden Bänke in der globalen Struktur. Zu beachten ist dabei, dass der Power-PC eine Zahl intern in anderer Form darstellt, als der PC auf dem das GUI läuft².

Im linken unteren Teil wird das Zielcrate der eingestellten Auslesebänke angegeben, oder

²Unter dem Begriff Little Endian - Big Endian bekannt und beschreibt die Reihenfolge in der eine Sequenz von Bytes (Zahl) im Speicher gesichert wird.

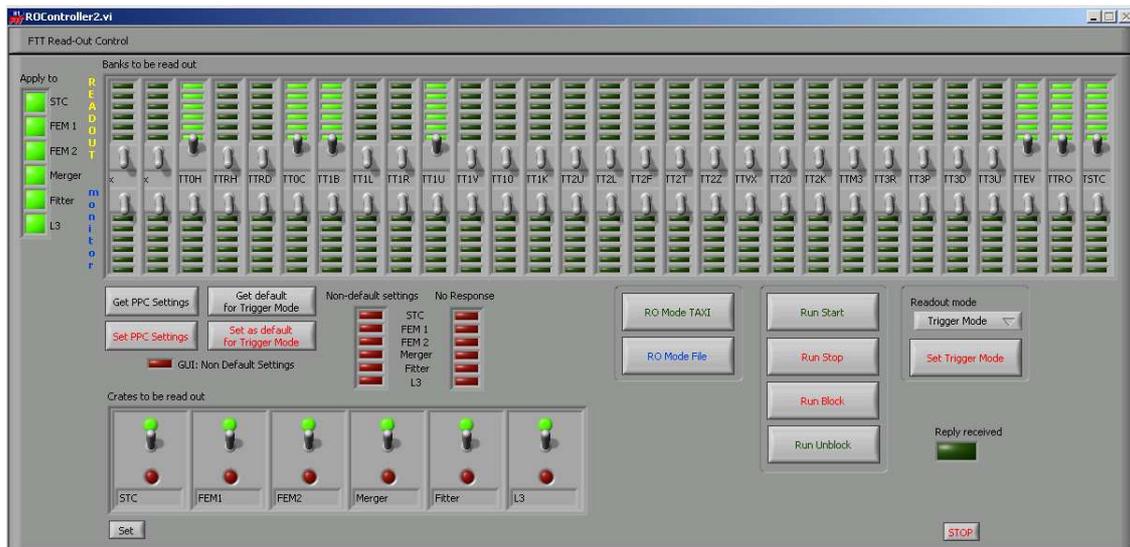


Abbildung A.3.: Das GUI-Fenster der Auslesekontrolle. Mit dieser umfangreichen Kontrolltafel ist die Steuerung der verschiedenen Auslese- und Monitorbänke des FTT möglich. Die einzelnen Funktionen werden im Text näher erklärt.

eine Abfrage der in den Kontrollkarten der einzelnen Triggerstufen bzw. Crates bestehenden Konfiguration ausgeführt. Die mittig unten angeordneten LEDs geben Aufschluß über in den Power-PCs befindliche Nicht-Standardkonfigurationen. Hier wird auch angezeigt, falls ein Crate nicht antwortet.

Die im rechten unteren Teil des Fensters angebrachten Schalter steuern das Start- und Stoppsignal einer Datennahme. Für diese Datennahme gibt es zwei unterschiedliche Verfahren: Das ist einmal der Triggermodus und andererseits der Rohdatenmodus; in diesem ist die Menge der geschriebenen Daten groß und zum Beispiel für die Kalibrierung des FTT notwendig. Diese Betriebsmodi können sowohl FTT-intern (Auslese in Datei) oder als Teil der H1-Auslese im Taxi-Modus³ ausgeführt werden.

Falls der FTT einen Warmstart oder sogar einen kompletten Neustart durchführt, sind sämtliche Einstellungen innerhalb des FTT verloren gegangen. Deshalb wurde mit einer weiteren neuen Routine *initRoMonBanks* das Lesen und Schreiben aus einer bzw. in eine Konfigurationsdatei implementiert. Der Schreib- bzw. Lesevorgang ist dabei sowohl durch das GUI als auch durch die Kontrollkarten des FTT möglich. Diese Konfigurationsdatei besitzt eine festgelegte Struktur:

```
[Mode]
```

```
roMode = 0,1
```

```
[TriggerBanks]
```

```
roBanks = 12
```

```
monitorBanks = 24
```

```
[RawDataBanks]
```

```
roBanks = 5
```

```
monitorBanks = 10.
```

³Die zentrale Auslese des H1-Detektors nutzt eine elektronische Karte (Taxikarte) zur Auslese der verschiedenen Detektorkomponenten.

Die Datei ist in Abschnitte, welche an den eckigen Klammern erkennbar sind, und Schlüsselwörter mit zugehörigen Werten unterteilt. Diese Struktur hat zunächst einmal den Vorteil, dass sie zumindest prinzipiell noch vom Benutzer gelesen und verstanden werden kann. Darüberhinaus bietet sie ein flexibles Format, wodurch die Implementierung weiterer Abschnitte erleichtert wird. Das zugehörige Programm ist deshalb entsprechend modular ausgelegt, so dass eine Erweiterung der Datei, ohne schwerwiegende Änderung an der Programmstruktur, möglich ist.

Die Funktionsweise der zugrunde liegenden Routine wird in Abbildung A.4 schematisch verdeutlicht und im folgenden anhand der oben wieder gegebenen Dateistruktur erläutert. Die Suche nach Abschnitten oder Schlüsselwörtern umfasst immer die gesamte Konfigura-

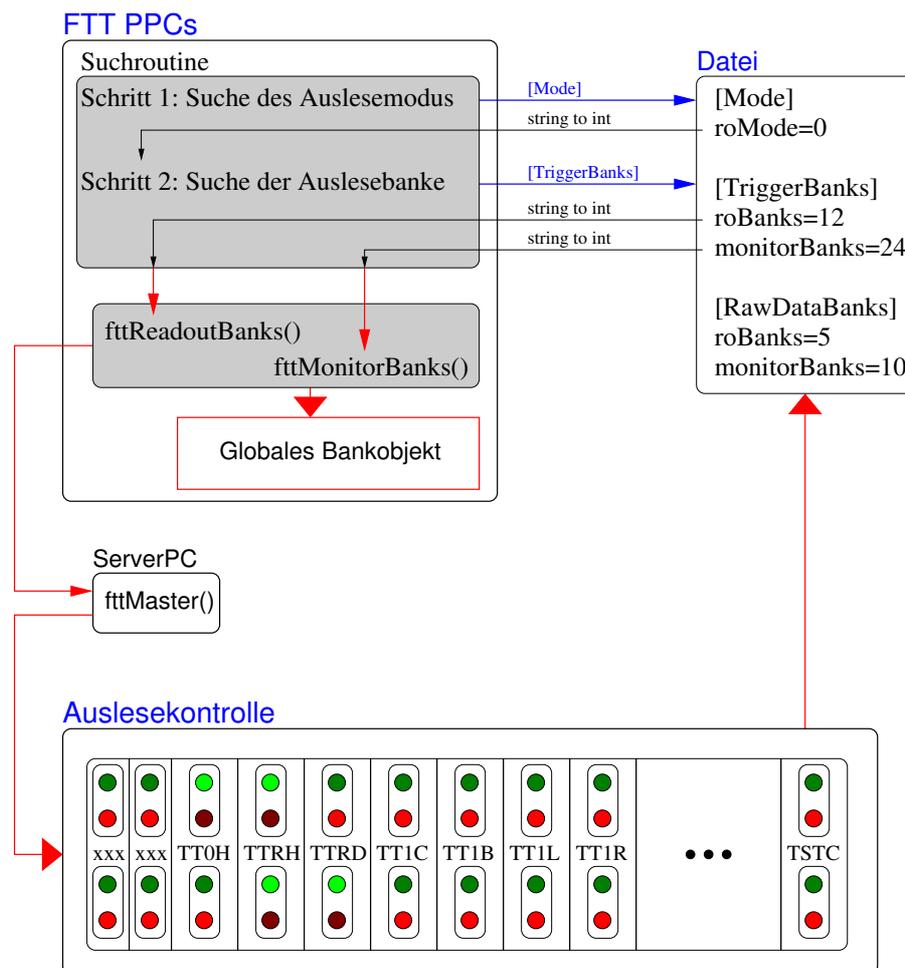


Abbildung A.4.: Schematische Skizze für des Funktionsprinzips der Auslesekontrolle. Gezeigt sind drei Instanzen: Die graphische Benutzeroberfläche (GUI), die formatierte Konfigurationsdatei und die entwickelte Suchroutine (Parser), welche die Information der zu setzenden Bänke aus der Datei heraussucht.

tionsdatei, so dass keine Abhängigkeit von der Reihenfolge auftritt. Auf diese Weise wird die oben angesprochene Flexibilität gesichert. Beginnend mit der Suche nach dem Abschnitt Auslesemodus `[Mode]` gibt die Routine den in diesem Abschnitt gefundenen Wert des Schlüsselwortes Auslesemodus `roMode` zurück. Für dieses Schlüsselwort sind lediglich zwei Werte möglich, nämlich 0 für den standardmäßig gesetzten Triggermodus und 1 für

den Rohdatenmodus. Der Wert des Schlüsselwortes `roMode` definiert also, ob im Abschnitt Triggerbänke [TriggerBanks] oder Rohdatenbänke [RawDataBanks] weitergesucht wird. In der weiteren Erklärung des Programmes wird der Triggermodus als gesetzt betrachtet, wie auch in Abbildung A.4 gezeigt. Damit wird die zweite Suche nach den Schlüsselwörtern der Auslese- und Monitorbänke im passenden Abschnitt Triggerbänke [TriggerBanks] ausgeführt. Die Werte der Schlüsselworte `roBanks` und `monitorBanks` werden an die bereits erwähnten Routinen zum Setzen der Auslese- und Monitorbänke übergeben. Diese interpretieren den Wert des jeweiligen Schlüsselwortes als Bitmuster und setzen die zugeordneten Bänke in der globalen Struktur.

Die Routinen senden Antworten über das Nachrichtensystem an das GUI, in denen die jeweils gesetzten Bänke mitgeteilt werden. Diese werden mit grün leuchtenden LEDs angezeigt und übermitteln dem Benutzer den Erfolg oder Mißerfolg der Steuerung der Auslese.

A.2. L2-L3 Datentransfertest mit dem GUI

Der in Kapitel 6.2 beschriebene Test der Verbindung zwischen dem L2- und L3-System kann mit dem GUI gesteuert werden. Auf diese Art und Weise ist es möglich, den Test als Schleife auszuführen und mehrere generierte Testmuster nacheinander zu versenden. Für diese Funktionalität, muss die Programmierung des L3-Test Fensters mehrere VME-Zugriffe ausführen. Zunächst wird ein zufälliges Testdatenmuster erzeugt und über die L2-Kontrollkarte an eine Vielzweckkarte gesendet. Dort wird es in den Fifo einer LVDS-Piggyback Karte geschrieben und steht für den Versand über LVDS bereit. Zunächst muss das L3-System auf den Empfang von LVDS-Testdaten vorbereitet werden.

Diese Vorbereitung umfaßt im Wesentlichen die passende Konfiguration der Empfängerkar-

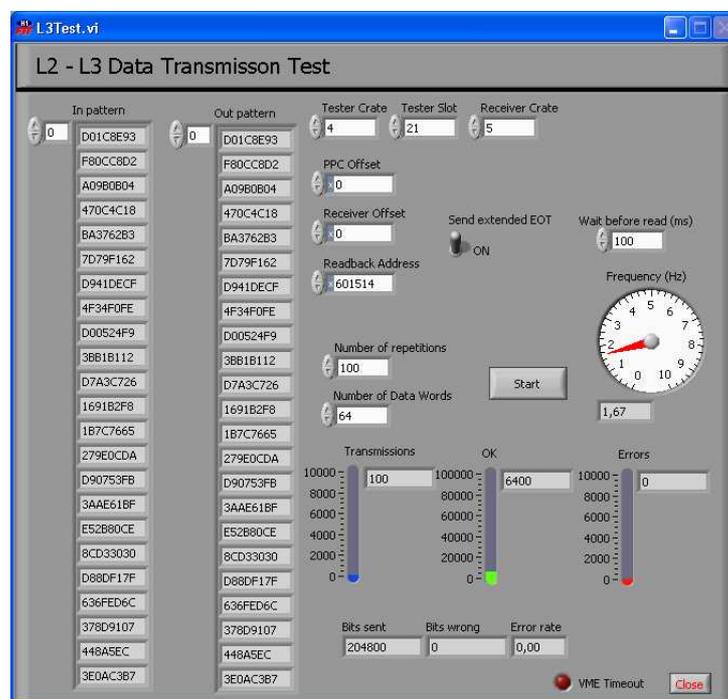


Abbildung A.5.: Das L3-Test Fenster, mit den benötigten Eingabefeldern und den Anzeigen für die Ergebnisse des Übertragungstests.

te. Diese Konfiguration wird ebenfalls mit VME-Zugriffen durchgeführt, dabei werden die

Befehlsregister unter anderem mit dem EOT-Muster, dessen Bedeutung in Abschnitt 5.2 erläutert wurde, beschrieben. Darüberhinaus müssen Kontrollbits der Empfängerkarte gesetzt sein, um den Datentransfer von der L3-PB Karte in das L3-System zu erlauben. Das gesendete Testdatenmuster wird vom GUI aus dem Benutzerspeicher der Rechenkarte zurückgelesen und mit dem gesendeten verglichen. In Abbildung A.5 ist das L3-Test Fenster gezeigt, neben den für die Steuerung des Tests notwendigen Eingabefeldern existieren Anzeigen die das Ergebnis des Tests anzeigen. Neben der Anzahl der fehlerfreien Übertragungen wird auch die Frequenz mit der der Test durchgeführt wurde, angezeigt.

B. Bitmuster und Befehlsätze

Kopfwort	15. - 12. Bit	11. - 8. Bit	7. - 4. Bit	3. - 0. Bit	Bedeutung
CF20	1100	1111	0010	0000	PQZP – Daten
CF40	1100	1111	0100	0000	Testdaten
CF80	1100	1111	1000	0000	EOT – Wort
CF81	1100	1111	1000	0001	Spurdaten (kompaktes Datenwort)
CF82	1100	1111	1000	0010	Spurdaten
CF83	1100	1111	1000	0011	Spurdaten (beide Formate)
CF90	1100	1111	1001	0000	z – Vertex – Daten
C200	1100	0010	0000	0000	PQZP – Daten
C400	1100	0100	0000	0000	Testdaten
C810	1100	1000	0001	0000	Spurdaten (kompaktes Datenwort)
C820	1100	1000	0010	0000	Spurdaten
C830	1100	1000	0011	0000	Spurdaten (beide Formate)
C900	1100	1001	0000	0000	z – Vertex – Daten

Tabelle B.1.: *Die unterschiedlichen Daten innerhalb des schnellen Spurtriggers können jederzeit anhand eines 16 Bit breiten Kopfwortes erkannt und zugeordnet werden. Die hier angegebenen Kopfworte sind nur die mit Ziel L3 gültigen, diese Information beinhalten die Bits 12 bis 15 (Ziel L3 hat den hexadezimalen Wert: C). Dabei wird zwischen dem Kopfwort eines Datenwortes und dem eines Startwortes unterschieden. Die oberen sieben Wörter sind die Kopfworte des Startwortes, erkennbar am Wert der Bits 8 bis 11. Liegt dort der hexadezimale Wert F vor, so wird der DMA-Zugriff von der DPIO-Karte in den Speicher der Rechenkarte gestartet. Wohingegen die unteren sechs Worte das Kopfwort der verschiedenen Datenarten darstellen.*

CR_{int}		CR_{ext}		Pulsregister	
Steuerbit	ausgelöster Befehl	Steuerbit	ausgelöster Befehl	Steuerbit	ausgelöster Befehl
31		31		31	Reset PIO2 Statemachine
30		30		30	Test PIO2request
29		29		29	Reset PIO1 Statemachine
28		28		28	Test PIO1request
27		27	PIO2request von Slowcontrol	27	
26	Receiver EOT Reaktion	26	PIO2 Slowcontrol oder Test	26	
25	Receiver für PB bereit	25	PIO1request von Slowcontrol	25	
24	PB Testdatenerzeugung (0:LVDS)	24	PIO1 Slowcontrol oder Test	24	CLR FPDP Look-Fifo
23		23		23	
22		22		22	
21		21	nOE-DPIO7 (muss NULL sein)	21	
20		20	nOE-DPIO6 (muss NULL sein)	20	CLR FPDP Paket Counter
19		19		19	
18		18		18	CLR FPDP Pipeline Stufe 3
17		17		17	CLR FPDP Pipeline Stufe 2
16	Pipeline Counter	16		16	CLR FPDP Pipeline Stufe 1
15		15	— EOT-Muster —	15	
14		14	— EOT-Muster —	14	
13		13	— EOT-Muster —	13	
12	PB-Fifo → DPIO	12	— EOT-Muster —	12	Reset PB Control FSM
11		11	— EOT-Muster —	11	CLR Monitor PB-Fifo
10		10	— EOT-Muster —	10	CLR PB-Fifo
9		9	— EOT-Muster —	9	CLR Read Counter PB-Fifo
8		8	— EOT-Muster —	8	CLR Write Counter PB-Fifo
7		7	— EOT-Muster —	7	CLR Monitor VME-Fifo
6		6	— EOT-Muster —	6	CLR VME-Fifo
5		5	— EOT-Muster —	5	CLR VME-Dateregister
4		4	— EOT-Muster —	4	CLR VME-Headerregister
3		3	— EOT-Muster —	3	CLR Read Counter VME-Fifo
2		2	— EOT-Muster —	2	CLR Write Counter VME-Fifo
1		1	— EOT-Muster —	1	CLR CR_{ext}
0	VME-Fifo → DPIO	0	— EOT-Muster —	0	CLR CR_{int}

Tabelle B.2.: Zur Ausführung der verschiedenen Befehle hat die Empfängerkarte drei Register, das interne und externe Kommando-register (CR_{int}, CR_{ext}), sowie das Pulsregister. In der Tabelle sind jeweils die zu setzenden Bits mit dem entsprechenden ausgelösten Befehl verknüpft.

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 so genannten 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.

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.

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.

d_{ca} *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.

DIS *Deep Inelastic Scattering*

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

DMA *Direct Memory Access*

Datentransfer zwischen einem Speichermedium und einer weiteren elektronischen Komponente ohne direkte Einflußnahme durch eine CPU. Dazu muß der sendenden oder empfangenen Komponente ein Satz von Adressen in diesem Speicherbereich bereitstehen, der angesprochen werden soll.

DPIO *Digital Parallel Input Output*

Bezeichnung für eine Elektronikartenfamilie der Firma VMetro, die die Ein- oder Ausgabe paralleler Daten über digitale Datenbusse unterschiedlicher Signalstandards unterstützt.

DSP *Digital Signal Processor*

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

EOT *End of Transfer*

Generelle Bezeichnung für ein Signal, das einzeigt, dass ein bestimmter Datentransfer beendet ist.

EEPROM *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*

Programmierbarer ROM-Baustein, dessen Inhalt zur Neuprogrammierung durch Einstrahlung von UV-Licht oder ein elektrisches Signal gelöscht werden kann.

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.

FIFO *First In First Out*

Elektronischer Speicherbaustein, aus dem Daten nur in der Reihenfolge des Beschreibens wieder ausgelesen werden können.

FNE *FIFO not empty*

Signal der DPIO-Karte, das anzeigt, dass mindestens ein Datenwort im FIFO gespeichert ist.

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.

FTTEMU *Fast Track Trigger Emulation*

Simulationsprogramm des schnellen Spurtriggers des H1-Experiments, geschrieben für die Hardwareentwicklung und Analyse der FTT-Daten.

GUI *Graphical User Interface*

Graphische Benutzeroberfläche zur Steuerung und Kontrolle des schnellen Spurtrigger

HERA *Hadron-Elektron-Ring Anlage*

Elektron-Proton-Speicherring am DESY. Durch Umbau des ursprünglichen Rings kann die Luminosität in der HERA-II Phase etwa vervierfacht werden.

ISR *Interrupt Service Routine*

Spezielle Routine in einem Programmpaket, die mit einem Interrupt verknüpft wird und diesen bearbeitet.

JTAG *Joint Test Action Group*

Durch IEEE standardisiertes, bitweises Übertragungsprotokoll zum Laden eines elektronischen Bausteins von einem Arbeitsplatzrechner.

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.

L2KEEP

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

L2NN *Level 2 Neuronal Network*

System der zweiten Triggerstufe, das mit neuronalen Netzen arbeitet.

L2TT *Level 2 Topological Trigger*

L2-Triggersystem, das Ereignisse unter topologischen Aspekten analysiert.

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.

MUX *Multiplexer*

Elektronisches Bauteil, das Daten aus mehreren Quellen bündelt und über eine gemeinsame Leitung seriell weiterverschickt.

MVME *Motorola VME*

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

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*

Standartisierter Formfaktor für PCI-Aufsteckkarten.

Power-PC *Performance Optimized With Enhanced RISC microprocessor architecture for Personal Computers*

Prozessorarchitektur von IBM/Motorola/Apple.

PPC *Power-PC*

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.

RES *Reserved Signal*

Drei Signale des FPDP-Busses, die für spezielle Aufgaben reserviert sind. Typische Anwendung ist die Übertragung eines EOT-Signals.

RISC *Reduced Instruction Set Computer*

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

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.

SCS *Super Computing Systems*

Schweizer Firma mit Sitz in Zürich, die an der Entwicklung des FTTs beteiligt war.

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.

TAXI-Karte *VME-TAXI-Karte*

VME-Karte der H1-Datenakquisition mit TAXI-Baustein zur optischen Datenübertragung.

TCP/IP *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

Das Protokoll dient unter anderem zur Datenübertragung innerhalb vernetzter PC-Systeme.

TE *Trigger Element*

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

TLP *Tractatus logico-philosophicus*

Abhandlung des Philosophen L. Wittgenstein über die logische Struktur der Sprache und deren Zusammenhang mit der beobachteten Welt.

VIC *Vertical Interconnection*

Elektronik-Karte der Firma CES, die zur Verbindung mehrerer VME-Systeme durch ein spezielles Bussystem, dient. und VMV-Bus herstellt.

VME *VERSA module Eurocard*

Standartisiertes Bussystem für Rückwandplatinen.

Literaturverzeichnis

- [1] Platon: *Politeia*, Buch **7** 514a - 518b.
- [2] Ludwig Wittgenstein: *Tractatus logico-philosophicus*, erstmals erschienen in *Annalen der Naturphilosophie* **14** (1921) hier: Suhrkamp Werksausgabe Band 1 *Tagebücher 1914-1916* (1984).
- [3] R. Hofstadter: *Electron Scattering and Nuclear Structure*, *Rev. Mod. Phys.* **28** (1956) 214.
- [4] E. D. Bloom et al.: *High-Energy Inelastic ep Scattering At 6-Degrees And 10-Degrees*, *Phys. Rev. Lett.* **23** (1969) 930.
- [5] M. Breidenbach et al.: *Observed Behaviour Of Highly Inelastic Elektron - Proton Scattering*, *Phys. Rev. Lett.* **23** (1969) 935.
- [6] J. I. Friedmann: *Deep inelastic scattering: Comparisons with the quark-model*, *Rev. Mod. Phys.* **63** (1991) 615.
- [7] J. D. Björken, E. A. Paschos: *Inelastic Electron-Proton and gamma-Proton Scattering and the Structure of the Nucleon*, *Phys. Rev.* **185** (1969) 1975.
- [8] M. Gell-Mann: *A Schematic Model of Baryons and Mesons*, *Phys. Lett.* **8** (1964) 214.
- [9] S. Weinberg: *Conceptual foundations of the unified theory of weak and electromagnetic interactions*, *Rev. Mod. Phys.* **52** (1980) 515.
- [10] A. Salam: *Gauge unification of fundamental forces*, *Rev. Mod. Phys.* **52** (1980) 525.
- [11] S. L. Glashow: *Towards a unified theory: Threads in a tapestry*, *Rev. Mod. Phys.* **52** (1980) 539.
- [12] D. P. Barber et al.: *Discovery of Three-Jet Events and a Test of Quantum Chromodynamics at PETRA*, *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979) 830.
- [13] 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.* **13** (2000) 609.
- [14] J. J. Aubert et al.: *Experimental Observation of a Heavy Particle J*, *Phys. Rev. Lett.* **33** (1974) 1404.
- [15] J. E. Augustin et al.: *Discovery of a narrow Resonance in e+ e- Annihilation*, *Phys. Rev. Lett.* **33** (1974) 1406.

-
- [16] Particle Data Group, D. E. Groom et al.: *Review of Particle Physics*, Eur. Phys. J. C **15** (2000), 1. Kapitel.
- [17] H1 Detektor: *H1 Fast Navigator*, verfügbar unter http://www-h1.desy.de/general/home/intra_home.html H1 intern.
- [18] U. Schneekloth: *The HERA luminosity upgrade*, DESY-HERA-98-05 (1998).
- [19] H1 Collaboration: *ep Physics beyond 1999*, (1997) Internal Note H1-10/97-531.
- [20] G. Hofstaetter: Vortrag *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] H1 Collaboration: *Proposal for an Upgrade of the H1 Forward Track Detector for HERA 2000*, DESY PRC-98/06.
- [24] H1 Calorimeter Group Collaboration: B. Andrieu et al.: *The H1 Liquid Argon calorimeter system*, Nucl. Instrum. Meth. A **336** (1993) 460.
- [25] H1 Spacal Group, R.-D. Appuhn et. al.: *The H1 Lead/Scintillating-Fibre Calorimeter*, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 397.
- [26] H1 Collaboration: *A Fast Track Trigger with High Resolution for H1* (1999), Proposal submitted to the Physical Research Committee PRC 99/06 und Interne H1 Note H1-06/99-573.
- [27] H1 Collaboration: *Addendum to the Proposal „A Fast Track Trigger with High Resolution for H1“* (1999), Internal Note H1-09/99-576.
- [28] D. Pitzl et al.: *The H1 silicon vertex detector*, Nucl. Instrum. Meth. A **454** (2000) 334.
- [29] H1 Collaboration: *A forward silicon Tracker for H1*, DESY PRC 99-01(1999).
- [30] H. Henschel, R. Lahmann: *The backward silicon tracker of the H1 Experiment at HERA*, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 93.
- [31] M. Cuje et al.: *H1 High Luminosity Upgrade 2000 – CIP and Level 1 Vertex Trigger* (1998), Internal Note H1-01/98-535.
- [32] M. Tluczykont: *Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer des H1-Detektors bei HERA*, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1999).

- [33] E. Elsen: *The H1 Trigger and Data Acquisition System* (1993), Internal Note H1-01/93-262.
- [34] J. C. Bizot et al.: *Strategy studies for the H1 topological L2 trigger (L2TT)*, Internal Note H1-01/97-508.
- [35] 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.
- [36] A. Baird et al.: *A Fast High Resolution Track Trigger for the H1 Experiment*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **48** (2001) 1276.
- [37] Altera Corporation: *FPGA-Programmierung*, verfügbar unter <http://www.altera.com>.
- [38] J. Müller, D. Müller: *Message System*, SCS Projektdokument (2001) H1 intern.
- [39] C. Wissing: *Entwicklung eines Simulationsprogrammes und Implementierung schneller Spurfitalgorithmen für den neuen H1-Driftkammertrigger*, Dissertation, Universität Dortmund (2003).
- [40] H. Beck: *Principles and Operation of the z-Vertex Trigger*, (1996) Internal Note H1-05/96-479.
- [41] N. Berger: *Development of a z-vertex trigger based on drift chamber signals at H1*, Diplomarbeit, ETH Zürich (2002).
- [42] A. Baird et al.: *A Fast Track Trigger for the H1 Collaboration*, Nucl. Instrum. Meth. A **461** (2001) 461.
- [43] D. Meer et al.: *A Multifunctional Processing Board for the Fast Track Trigger of the H1 Experiment*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **49** (2002) 357.
- [44] V. Karimäki, *Effective Circle Fitting for Particle Trajectories*, Nucl. Instrum. Meth. A **305** (1991) 187.
- [45] Fast Track Trigger: *Project Tool*, verfügbar unter <http://fh1fttz1.desy.de> H1 intern.
- [46] C. Wissing: *Persönliche Mitteilung: Status FttEmu4* (2004).
- [47] D. Dodt: *Persönliche Mitteilung: Treffereffizienz* (2004).
- [48] C. Wissing: Vortrag: *FTT tools h1tools*-Vortragsreihe (Mai 2004).
- [49] O. Behrendt: *Entwicklung von Algorithmen zur Identifikation von Vektormeson-Ereignissen mit dem neuen H1-Spurtrigger*, Diplomarbeit, Universität Dortmund (2002).
- [50] American National Standards Institute, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.: *Versatile Backplane Bus: VMEbus*, ANSI/IEEE Standard 1014-1987.

-
- [51] American National Standards Institute, VMEbus International Trade Association: *VME64 Extension*, ANSI/VITA 1.1-1997.
- [52] American National Standards Institute, VMEbus International Trade Association: *Front Panel Data Port Specifications*, ANSI/VITA 17-1998.
- [53] J. Naumann: *Entwicklung und Test der dritten H1-Triggerstufe*, Dissertation, Universität Dortmund (2003).
- [54] J. Merkel: *J/ ψ -vector meson identification with the Fast Track Trigger and the Central μ -Detector*, DESY Summerstudent Report (2002).
- [55] VMetro/VSystems: *DPIO - FPDP Digital Parallel I/O PMC Moduls*, verfügbar unter <http://www.vmetro.com> oder <http://www.vsystems.com>.
- [56] Wind River System, Inc.: *VxWorks Programmer's Guide, 5.4*, Edition I (1999).
- [57] Motorola Inc. Computer Group: *MVME 2400 Series VME Processor Modules*, verfügbar unter <http://mcg.motorola.com>.
- [58] Motorola Inc. Computer Group: *MVME 5500 Series VME Processor Modules*, verfügbar unter <http://mcg.motorola.com>.
- [59] Wind River System, Inc.: *Tornado User's Guide (Windows Version)*, Edition 1 (1999).
- [60] M. Kolander: *Persönliche Mitteilung: FPGA-Programmierung*, (2004).
- [61] Altera Corporation: *APEX 20K – Programmable Logic Device Family*, verfügbar unter <http://www.altera.com>.
- [62] A. Schöning: *Persönliche Mitteilung: Channel Link Test*, (2004).
- [63] R. Brun, F. Rademakers: *ROOT: An Object Oriented Data Analysis Framework*, Nucl. Instrum. Meth. A **389** (1997) 81.
- [64] D. Schmidt: *Diffraktive Photoproduktion von Charmonium im H1-Detektor bei HERA*, Dissertation, Universität Hamburg (2001).
- [65] J. Seehafer: *Jets finden mit dem FTT*, DESY Summerstudent Report (2002).
- [66] A. Jung: *A Jet-Searching Algorithm for the FTT*, DESY Summerstudent Report (2002).
- [67] S. Baumgartner: *The Graphical User Interface (fttgui) for the Fast Track Trigger FTT*, verfügbar unter <http://www-h1.desy.de/~simonba/fttgui.html>.
- [68] N. Berger: *The Graphical User Interface (fttgui) for the Fast Track Trigger FTT*, verfügbar unter <http://fh1fttz1.desy.de> H1 intern.

- [69] National Instruments, Inc.: *LabVIEW - The software that powers virtual instrumentation*, verfügbar unter <http://www.ni.com/labview>.
- [70] V. Blobel: *The BOS System*, verfügbar unter http://www-h1.desy.de/icas/imanuals/ndb_man.html (H1 intern).
- [71] M.-O. Bönig: *Persönliche Mitteilung: fttMaster* (2004).

Danksagung

An erster Stelle danke ich meinen Eltern und Großeltern, die mir meinen bisherigen Lebenslauf erst ermöglicht haben. Auch bei meiner Freundin Silke, die mich während dieser Zeit immer wieder von der Physik ablenken konnte und mir so die notwendige Erholung zu Teil werden ließ, bedanke ich mich von Herzen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. D. Wegener, der es mir ermöglicht hat, diese Diplomarbeit in einer internationalen Kollaboration und in einer angenehmen Arbeitsatmosphäre anzufertigen.

Das folgende kleine Zitat aus einem der großen literarischen Werke unserer Zeit erklärt vielleicht zu einem Teil die Entscheidung, am Lehrstuhl EV zu arbeiten und an das DESY zu gehen:

Ein Ring, sie zu knechten, sie alle zu finden,
Ins Dunkel zu treiben und ewig zu binden, ...

J.R.R. Tolkien: *Der Herr der Ringe*, Klett-Cotta (1999)

Oft trieb die Arbeit mit dem "Ring" einen ins Dunkel, diese Tage (Nächte) wurden allerdings meistens mit einem gar fürstlichen Grillen am Elbstrand oder im Perlhuhnweg (weitere Orte waren nicht ausgeschlossen und zahlreich) ausgeglichen. Dabei versammelten sich auf wunderbare Weise die weit verstreuten Gefährten innerhalb kürzester Zeit um das wärmende Feuer und so mancher Krug ward getrunken. Diesen Gefährten des Weges gilt natürlich mein Dank für bestandene Abenteuer und Herausforderungen auf dem Weg zum Ziel.

Allen voran sind das meine WG-Mitbewohner. Hierbei danke und erinnere ich mich immer gerne an die Uhland-WG (Jesko, Jörg, Johannes & Stephan) in Dortmund. Diese haben mich ohne großen Aufstand zunächst in ihrer Küche untergebracht, bevor ich regulär dort eingezogen bin. Ich danke euch für diese schönen Jahre ... in dieser Zeit lernte ich, was es bedeutet, Geschwister zu haben. Die anschließend in Hamburg gegründete WG im Perlhuhnweg mit zwei Neuzugängen (Dirk & Klaus) ist die konsequente Fortsetzung dieser Uhland-WG, auch hier sei mein Dank ausgesprochen, für viele interessante und schöne Abende.

Nicht nur meinen Mitbewohnern, sondern auch meinen anderen Kommilitonen (Aco, Daniel, Daniel, Sven, Jens, etc.) aus Dortmund, die mittlerweile in alle Winde zerstreut worden sind, bin ich zu Dank verpflichtet. Sobald es sich irgendwie machen ließ, haben wir uns getroffen und über vergangene und neue Zeiten bei dem ein oder anderen mehr oder weniger gefüllten Glaserl diskutiert. All meinen Kommilitonen bin ich in vielerlei Hinsicht zu Dank verpflichtet, vor allem für ihre zahlreichen Versuche, mich bei den verschiedensten Gelegenheiten zu "wecken".

Ich hoffe sehr, dass die Wörter „ewig zu binden“ aus obigem Gedicht auf die eine oder andere Weise wahr werden. Die Vereinsgründung unseres *PeP et al. eV*¹ strebe ich noch

¹Physikstudierende und ehemalige Physikstudierende der Universität Dortmund **et al.** eingetragener Verein

in den Wochen nach meiner Abgabe an, dieses sei an dieser Stelle mein Versprechen an euch alle. Ich hoffe es werden dann viele Vereinstreffen und vielleicht damit verbunden weitere Segelabenteuer auf allen Weltmeeren stattfinden.

Bei dem angeschlossenen Lehrstuhl aus Heidelberg, in Person des Herrn Professor Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon, bedanke ich mich für die Bereitschaft, das Amt des Zweitgutachters zu übernehmen. Für viele interessante Gespräche bin ich ihm zu Dank verpflichtet.

Markus Kolander danke ich insbesondere für seine unermüdliche Arbeit an der Programmierung der Empfängerkarte. Jedwede Frage zu VME und anderen Dingen hat er mir dabei ausführlich beantwortet, für diese Geduld bedanke ich mich ebenfalls. Bei Dr. Jürgen Naumann, der mir zumindest anfangs noch helfen konnte, bis er die Gruppe verlassen hat, bedanke ich mich für die Einführung in die dritte Triggerstufe. Diese war mir eine große Hilfe. Marc-Oliver Bönig und Herrn Dr. Christoph Wissing danke ich insbesondere für ihre freiwillige Bereitschaft, diese Arbeit gründlichst zu lesen. Ihre Korrekturvorschläge haben zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen. Für die Betreuung und Bereitschaft Fragen zum FTT und zur H1-Software zu beantworten, danke ich diesen beiden ebenfalls. Bei der gesamten FTT-Gruppe bedanke ich mich für die Aufnahme in diese Gemeinschaft, insbesondere sei Herrn Dr. André Schöning gedankt. Die Gespräche über den FTT und insbesondere L3, die ich mit ihm geführt habe, sind immer sehr motivierend für mich gewesen. Mister GUI (Nick Berger) danke ich für seine Bereitschaft, die graphische Benutzeroberfläche quasi instantan an die sich jeweils ergebenden Anforderungen in Form eines neu entwickelten Fensters anzupassen.

Bedanken will ich mich auch bei allen Mitgliedern des Lehrstuhls EV und angeschlossener Lehrstühle, mit denen ich nicht explizit zusammengearbeitet habe (Andrea, Olaf, Victor, Katja, Klaus, Christopher, Martin, Mitch und natürlich Frau Lorenz). Die Freizeitaktivitäten wurden mit ihnen immer bereichert, dabei danke ich Herrn Dr. Martin Bräuer für seine spontane Bereitschaft, in den letzten Tagen der Diplomarbeit einen kritischen Blick von "außen" auf meine Arbeit geworfen zu haben. Bei Frau Dr. Katja Krüger bedanke ich mich für die Korrektur des "Physik-Kapitels" und meines Wissens über Vektormesonproduktion.

Ich danke allen, die zum Gelingen dieser Arbeit auf die eine oder andere Weise beigetragen haben.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung & Forschung unter der Projektnummer 05H14BEA/6 gefördert.