Untersuchungen zur Inbetriebnahme des HERA-B-Myon-Pretriggers und Monte-Carlo-Studien zum Zerfall $B^0 \rightarrow {K^*}^0 \mu^+ \mu^-$

vorgelegt von
Elmar Klaus

Diplomarbeit im Fachbereich Physik
der
Universität Dortmund

30. November 2000

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Diskrete Symmetrien 1

1.2 CP-Verletzung 2

1.3 Grundlagen und Ziele des HERA-B-Experiments 4

1.4 Ziele dieser Arbeit 6

2 Das HERA-B-Experiment **7**

2.1 Das DESY und der Speicherring HERA 7

2.2 Der HERA-B-Detektor 7

2.3 Der Myondetektor des HERA-B-Experiments 10

2.4 Die Triggerkette 13

3 Der HERA-B-Myon-Pretrigger **17**

3.1 Aufbau des HERA-B-Myon-Pretriggers 18

3.2 Funktionsweise des HERA-B-Myon-Pretriggers 19

3.2.1 Funktionsweise des Pretrigger-Link-Boards 19

3.2.2 Funktionsweise der Pretrigger-Coincidence-Unit 20

3.2.3 Beschreibung des Pretrigger-Message-Generators 22

3.3 Auslese von Daten über die VME-Schnittstelle 23

4 Die Analyseumgebung ARTE in HERA-B **25**

4.1 Grundlagen der Monte-Carlo-Methode 25

4.2 Beschreibung der ARTE-Umgebung 26

5 Analyse der FCS-Testmuster **29**

5.1 Ziel der Untersuchung 29

5.2 Beschreibung der ausgelesenen Daten 29

5.3 Beschreibung der Messung 31

5.4 Auswertung der Testdaten 34

5.4.1 Ermittlung der Funktionstüchtigkeit der zu untersuchenden optischen Links 34

5.4.2 Diskussion der gefundenen Fehler bei der Betrachtung der DPRAM-Auslesen 38

5.5 Untersuchung des Auslaufens von Daten in die Bunchcrossing-Nummer *Eins* 40

5.6 Analyse der gefundenen Koinzidenzen 41

5.7 Zusammenfassung und Aussicht 45

6 Die geometrische Akzeptanz **47**

6.1 Untersuchung des Zerfalls $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 47

6.1.1 Erzeugung und Beschreibung des Datensatzes 48

6.1.2 Beschreibung der Messung 48

6.1.3 Ergebnisse der Untersuchung 50

6.1.4 Geometrische Akzeptanz im April 51

6.2 Berücksichtigung des Myonpixelsystem 53

6.2.1 Auswertung der Daten 54

6.3 Verschiedene Geometriebeschreibungen 56

6.3.1 Beschreibung der verwendeten Geometrien 56

6.3.2 Ergebnisse aus der Untersuchung verschiedener Geometrien 57

7 Monte-Carlo-Studien zu $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-K^{*^0}$ **59**

7.1 Ziel der Untersuchung 59

7.2 Beschreibung des Zerfalls und seiner Besonderheiten 59

7.3 Beschreibung der Arbeitsumgebung Grover 60

7.4 Erzeugung der Daten 63

7.5 Beschreibung der Schnitte und deren Effizienz 64

7.5.1 Schnitt auf die MuonID 64

7.5.2 Schnitt auf die Anzahl der Treffer im Myonsystem 65

7.5.3 Schnitt auf den Impuls des Myons 65

7.5.4 Bestimmung des Myonvertex 68

7.5.5 Abstand des Vertex vom nächstgelegenen Draht 68

7.5.6 Schnitt auf den Raumbereich, in dem der Vertex gesucht wird 69

7.5.7 Schnitt auf die J/ψ-Masse 69

7.5.8 Schnitt auf die RICH-Likelihood 72

7.5.9 Schnitt auf den Abstand der beiden Myonspuren und der hinzugenommenen Spuren 73

7.5.10 Schnitt auf die Masse der beiden hinzugekommenen Spuren 73

7.5.11 Die Bestimmung der B^0-Masse 74

7.5.12 Abstand der Spur des Vertex vom nächstgelegenen Draht 74

7.6 Anwendung der Analysekette 74

7.7 Schlußfolgerungen 78

8 Zusammenfassung und Ausblick **79**

Danksagung **85**

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Diskrete Symmetrien

Erhaltungssätze und Symmetrien sind die zentralen Bausteine der modernen Physik. Die moderne Physik leitet nicht mehr Invarianzgesetze aus Naturgesetzmäßigkeiten ab, sondern benutzt umgekehrt diese, um die Naturgesetze zu finden. In der klassischen Mechanik folgt aus der Invarianz der Bewegungsgleichungen gegen Zeittranslationen die Energieerhaltung, aus der Invarianz gegen Raumtranslationen die Impulserhaltung und aus der Invarianz gegen Rotationen die Drehimpulserhaltung [1].

Das Noether-Theorem [2] postuliert hierzu, daß zu jeder kontinuierlichen Symmetrietransformation, welche die Form der Bewegungsgleichungen nicht ändert (Invarianz), eine Erhaltungsgröße und ein Erhaltungssatz gehört. Das Korrespondenzprinzip erlaubt es, das Noether-Theorem in die Quantenmechanik zu übertragen. Diese Symmetrien heißen kontinuierlich, da jede Änderung durch eine Reihe infinitesimaler Änderungen beschrieben werden kann.

Diskrete Symmetrien, welche nicht durch eine Reihe infinitesimaler Änderungen ersetzt werden können, sind nicht durch das Noether-Theorem zu beschreiben. Als Beispiel sei hier die Raumspiegelung genannt. Die für die Teilchenphysik wichtigen diskreten Symmetrien werden mit den Buchstaben **C, P** und **T** beschrieben. Diese stehen für folgende Begriffe:

C Charge Conjugation, Transformation aller ladungsartigen Quantenzahlen Q nach $-Q$,

P Parity Conjugation, Spiegelung der Koordinaten $\vec{x}$ nach $-\vec{x}$,

T Time Conjugation, Änderung der Zeitkoordinate t nach $-t$ und somit eine Umkehr der Bewegung.

Obwohl man zunächst annahm, daß die Physik invariant gegenüber diesen Symmetrietransformationen sei, stellte sich heraus, daß sowohl die C- als auch P-Symmetrie im β-Zerfall verletzt sind [3]. 1964 fanden Christenson, Cronin, Fitch und Turlay [4] dann, daß im neutralen Kaon-System auch die Kombination CP verletzt ist. Als Folge des CPT-Theorems [5, 6], welches aussagt, daß lokale Eichtheorien invariant sind gegen Transformationen durch CPT, wäre dann auch die T-Invarianz verletzt.

1.2 CP-Verletzung

Durch die heute anerkannte Theorie von der Entstehung des Universums hat die Entdeckung der CP-Verletzung über die Grenzen des Mikroskopischen hinaus Bedeutung erlangt. Es ist bisher ungeklärt, durch welchen Mechanismus die zum Beginn des Universums vorhandene Antimaterie verschwand und es zu der heutigen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie kam, der sogenannten Baryogenese. Die CP-Verletzung ist eine von drei Bedingungen, die laut Sacharov [7] erfüllt sein müssen, damit die Baryogenese möglich ist.

Die Brechung der CP-Symmetrie ist seit ihrer Entdeckung im neutralen Kaonsystem eine wichtige Fragestellung der Teilchenphysik. Im System der neutralen Kaonen zerfällt das langlebige Kaon $\mathrm{K_L}$ sowohl in drei als auch, mit einem Verzweigungsverhältnis von $2 \cdot 10^{-3}$, in zwei Pionen. Die Eigenzustände der starken Wechselwirkung K^0 und $\overline{\mathrm{K}}^0$ stellen jeweils eine Mischung der beiden **CP**-Eigenzustände K_1 und K_2 dar. Die Entdeckung von Christenson et al. zeigte, daß $\mathrm{K_L} \neq \mathrm{K}_2$, also die Masseneigenzustände nicht identisch sind mit den CP-Eigenzuständen, wie es die CP-Erhaltung gefordert hätte.

Es ist allerdings ungeklärt, wodurch die CP-Verletzung in diesem System hervorgerufen wird. Wolfenstein schlug vor [8], eine superschwache Wechselwirkung einzuführen, welche Übergänge zwischen den CP-Eigenzuständen K_1 und K_2 herbeiführt. Diese würde aber nur im Kaon-System existieren. Das Standardmodell liefert jedoch eine Erklärung über die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix [9, 10], welche die Kopplung der Quarks in der schwachen Wechselwirkung beschreibt. Abbildung 1.1 zeigt die relative Größe der Kopplung für die jeweiligen Quarks. Die Kopplung des Übergangs innerhalb einer Familie dominiert vor den Kopplungen zu anderen Familien. Besonders fällt die geringe Kopplung der 3. Familie, Bottom- und Top-Quark zu den anderen beiden Familien auf. Die

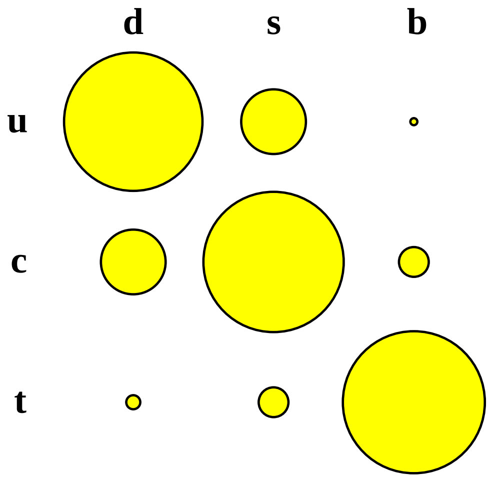


Abbildung 1.1: Die relative Kopplung der einzelnen Quark-Arten untereinander. Die Kreisflächen sind proportional zur Größe der Übergangsamplituden in Prozessen, bei denen ein Quark in ein anderes übergeht.

genaue Bestimmung dieser Matrixelemente wird momentan vorangetrieben. Eine geeignete Darstellung der CKM-Matrix ist die Wolfenstein-Parametrisierung [11]

$$\mathbf{V}_{\mathrm{CKM}} = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4), \tag{1.1}$$

welche die Elemente nach Potenzen von λ beschreibt (siehe Abbildung 1.1). In dieser Parametrisierung tritt CP-Verletzung auf, wenn $\eta \neq 0$ gilt und so die Kopplung der ersten an die dritte Quarkfamilie komplex ist. Die Unitaritätbedingung $\mathrm{VV}^\dagger = 1$ der CKM-Matrix führt zu Dreiecksrelationen wie:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0. \tag{1.2}$$

Diese Relation kann in der $\eta - \rho$-Ebene als Dreieck dargestellt werden (siehe Abbildung 1.2). Anhand geeigneter physikalischer Prozesse können Seitenlängen und Winkel dieses Dreiecks bestimmt werden. Die Zerfallskannäle des B-Mesons sind besonders geeignet, um diese Winkel zu bestimmen, und es existieren momentan mehrere Experimente, die angetreten sind, die CP-Verletzung im Rahmen des Standardmodells zu untersuchen.

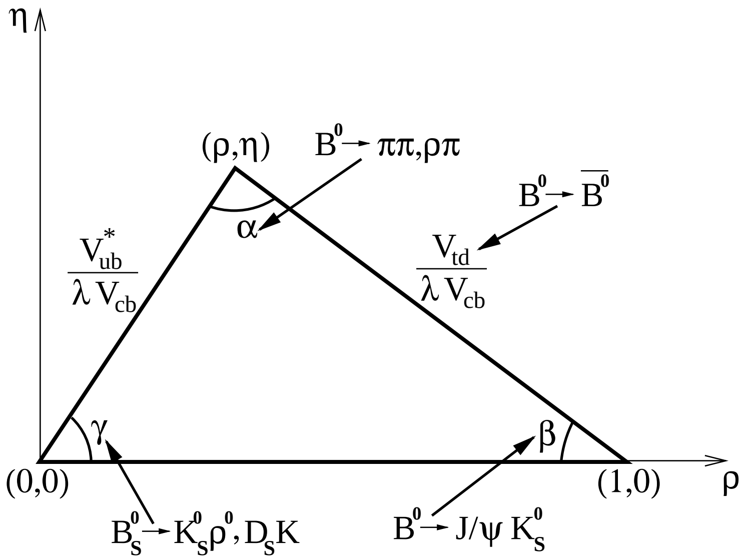


Abbildung 1.2: Das Unitaritätsdreieck. Die Winkel und Seitenlängen lassen sich mit den angegebenen Prozessen bestimmen; nach [12].

1.3 Grundlagen und Ziele des HERA-B-Experiments

HERA-B ist ein Experiment zur Untersuchung der CP-Verletzung im neutralen B-Meson-System. Dieses System ist für diese Untersuchung geeignet, da das Standardmodell dort eine hohe Asymmetrie erwarten läßt, wobei die relative Stärke der Asymmetrie direkt mit den Parametern der CKM-Matrix zusammenhängt, ohne daß hadronische Matrixelemente, welche nur unzureichend bekannt sind, stören [13]. Der goldene Zerfall für die Untersuchung der CP-Verletzung (siehe Abbildung 1.3) im B-System ist:

$$\mathrm{B}^0/\overline{\mathrm{B}}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K_S}^0 \to \ell^+\ell^-\pi^+\pi^-. \tag{1.3}$$

ℓ steht hier für die Leptonen (Elektron, Myon), die aus dem Zerfall der Resonanz J/ψ entstehen. Die Teilchen $\mathrm{B}^0/\overline{\mathrm{B}}^0$haben den gleichen Zerfallskanal und zerfallen in den gleichen CP-Eigenzustand. Die Messung des Unterschieds der Zerfallsraten dieser Teilchen gibt Auskunft über die Größe der CP-Verletzung.

Die experimentell bestimmbare Asymmetrie ist mit dem Winkel β des Unitaritätsdreiecks verknüpft durch:

$$A_{\mathrm{CP}} = \frac{\Gamma(\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\psi\, K_S^0) - \Gamma(\overline{\mathrm{B}}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K_S}^0)}{\Gamma(\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K_S}^0) + \Gamma(\overline{\mathrm{B}}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K_S}^0)} = \sin 2\beta\, \frac{x}{1+x^2}. \tag{1.4}$$

x ist der Mischungsparameter zwischen B^0 und $\overline{B}^0$. Dieser ist erforderlich, da im neutralen B-Meson-System genauso wie im Kaon-System durch die Mischung der Zustände die Amplitude der Teilchen oszilliert [14]. Um zu ermitteln, ob ein B^0 oder ein $\overline{B}^0$ im Ausgangszustand vorlag, benötigt man Informationen aus dem Zerfall des assoziiert produzierten B-Mesons. Diese Verfahren bezeichnet man als tagging (etikettieren).

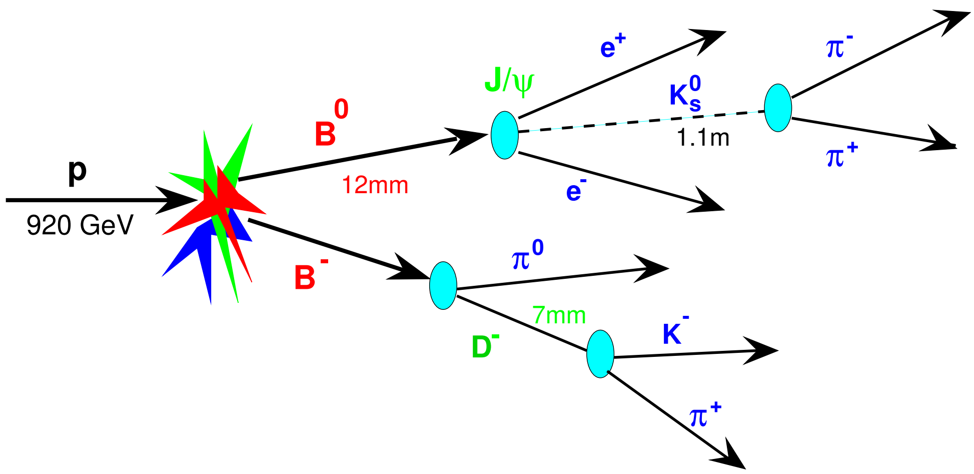


Abbildung 1.3: Der goldene Zerfall, der zur Messung von $\sin 2\beta$ nachgewiesen werden soll. Bei der Produktion des B^0 entsteht das zum Taggen (siehe Text) verwendete B^-. Der Zerfall des $\overline{B}^0$ verläuft identisch zu dem dargestellten B^0-Zerfall. Das assoziierte B-Meson ist dann ein B^+.

Die B-Mesonen werden an einem Drahttarget im Halo, dem äußeren Bereich des Protonenstrahls des HERA-Speicherrings (*HERA* = *H*adron-*E*lektron-*R*ing-*A*nlage), durch inelastische Proton-Nukleon Wechselwirkung erzeugt. Die Protonenpakete (Bunches) passieren alle 96 ns das Target, was einer Frequenz, oder auch Bunchcrossing(BX)-Rate, von 10 MHz entspricht. Für die geplante Wechselwirkungsrate von 40 MHz werden 4-5 Wechselwirkungen pro BX benötigt.

Die Suche nach dem goldenen Zerfall wird durch folgende Einflüsse erschwert:

- Das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte beträgt $\sigma_{\mathrm{b\overline{b}}}/\sigma_{\mathrm{inel}} \approx 10^{-6}$.
- Die Wahrscheinlichkeit für die Produktion eines neutralen $\mathrm{B_d^0}/\overline{\mathrm{B}}_d^0$ liegt bei $2\mathrm{P_{b\to B^0}} \approx 0,8$.
- Das Verzweigungsverhältnis des goldenen Zerfalls ist $\mathrm{BR(B^0 \to J/\psi\, K_S^0)} \approx 5 \cdot 10^{-4}$.
- Das Verzweigungsverhältnis des $\mathrm{K_S^0}$ ist: $\mathrm{BR(K_S^0} \to \pi^+\pi^-) \approx 0,69$.
- Das Verzweigungsverhältnis für den Zerfall $\mathrm{J}/\psi \to \ell^+\ell^-$ ist: $\mathrm{BR(J}/\psi \to \ell^+\ell^-) \approx 0,12$.

So kommt man auf ein totales Verzweigungverhältnis von $3 \cdot 10^{-11}$. Dies stellt besondere Anforderungen an die Detektorkomponenten und Analysewerkzeuge.

1.4 Ziele dieser Arbeit

Während des letzten Jahres befand sich das Myon-Pretrigger-System in der Einbau- und Erprobungsphase. Diese Arbeit dient dazu, das Verhalten des Myon-Pretriggers zu analysieren, um Fehler des Systems zu finden und dagegen vorgehen zu können. Darüber hinaus soll das Leistungsverhalten über das Hilfsmittel geometrische Akzeptanz erkundet werden. Es sollen Werkzeuge entwickelt werden, die es möglich machen, das Verhalten des Pretriggers in verschiedenen Stadien seiner Entwicklung voraussagen zu können.

In einem zweiten Abschnitt der Arbeit soll eine Analysekette für den Zerfall $\mathrm{B^0} \to \mathrm{K^*}^0\mu^+\mu^- \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^+\pi^-$ aufgestellt und dokumentiert werden. Es soll außerdem eine Möglichkeit gefunden werden, das Signal des Zerfalls gegen den stark konkurrierenden Zerfall $\mathrm{B^0} \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K^*}^0 \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^+\pi^-$ zu etablieren. Dies soll möglichst auf der Basis von Standardrekonstruktionsalgorithmen geschehen.

Kapitel 2

Das HERA-B-Experiment

2.1 Das DESY und der Speicherring HERA

Das HERA-B-Experiment ist ein Projekt am Deutschen Elektronen-Synchroton, kurz DESY, in Hamburg, Deutschland [15]. Das DESY ist ein Forschungsinstitut, welches sich der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung widmet, speziell der Untersuchung der Materie. Hierfür werden sehr hohen Teilchenenergien benötigt. Zum einen, weil das Auflösungsvermögen zur Untersuchung der Materie mit der Energie steigt, zum anderen weil die zu untersuchenden Teilchen sehr große Ruhmassen haben.

HERA-B befindet sich am Speicherring HERA, an dem außerdem noch die Experimente ZEUS, HERMES und H1 betrieben werden. Er speichert Elektronen bzw. Positronen einer Energie von 27,5 GeV und Protonen einer Energie von 920 GeV. Die Teilchen werden von den Linearbeschleunigern und im Falle der Leptonen auch von dem Ringbeschleuniger DESY II/III in den Ringbeschleuniger PETRA gespeist und gelangen von dort nach HERA. Eine Darstellung der Beschleuniger findet sich in Abbildung 2.1 . Während HERA-B die Protonen aus dem Halo des Strahls verwendet, sind die Experimente H1 und ZEUS Kollisionsexperimente, in denen die Protonenstruktur erforscht wird. HERMES streut den Leptonenstrahl an einem polarisierten Gastarget, um die Spinverteilung der Quarks im Proton und Neutron zu messen.

2.2 Der HERA-B-Detektor

Im folgenden wird ein Überblick über die Komponenten des HERA-B-Detektors gegeben [12, 16]. Abbildung 2.2 zeigt den vollständigen Detektor in der Aufsicht

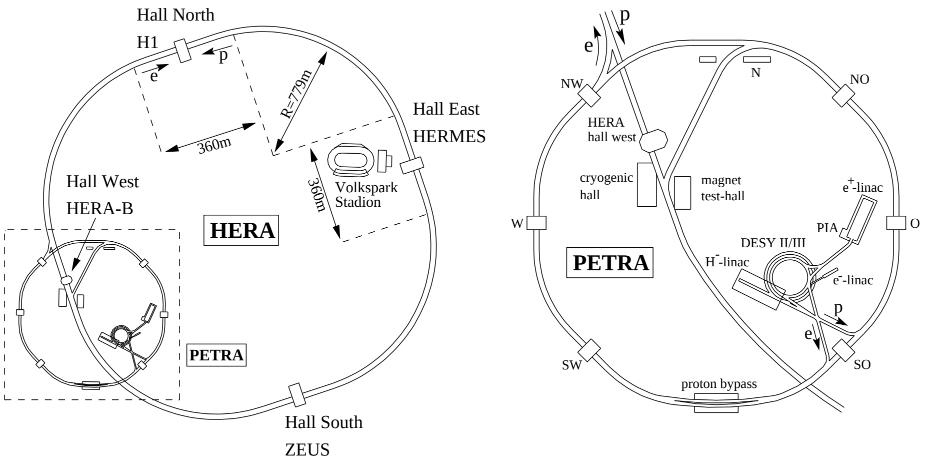


Abbildung 2.1: Der Speicherring HERA (links) und die Vorbeschleuniger (rechts) am DESY in Hamburg. Das Experiment HERA-B befindet sich in der Halle West.

und in der Seitenansicht.

- Das Target besteht aus acht Drähten. Die Drähte sind auf zwei Stationen à vier Drähte aufgeteilt. Die vier Drähte sind im Rechteck um den Protonenstrahl angeordnet. Die Targetmechanik erlaubt es, die Drähte separat in den Strahl zu bringen.

- Der Silizium-Vertex-Detektor dient dazu, die Position der Primär- und Sekundärvertices zu bestimmen und Spuren innerhalb des Detektors zu definieren. Der Detektor besteht aus 8 Lagen von Silizium-Streifen-Detektoren. Er ist zwischen dem Target und Magneten positioniert. Die Auflösung in transversaler Richtung ist ungefähr $70\,\mu$m. In Richtung der Strahlröhre können etwa $500\,\mu$m aufgelöst werden.

- Zum Spektrometer zählt der Magnet und das innere und äußere Spurkammersystem. Der Impuls der Teilchen wird aus der Ablenkung im Magnetfeld berechnet. Dafür werden Spursegmente vor und nach dem Magneten benötigt, wobei die Kammerlagen innerhalb des Magnetfelds eine bessere Bestimmung der Spurparameter ermöglichen. Die Ebene, in der das Teilchen abgelenkt wird, ist die x-z-Ebene.

- Das innere Spurkammersystem (ITR, Inner-Tracker) deckt einen Bereich von bis zu 25 cm von der Strahlröhre ab. Es besteht aus zehn Lagen von MSGC/GEM (Micro-Strip-Gaseous-Chamber/Gas-Electron-Multiplier) Detektoren. Es trägt zur Spurverfolgung bei kleinen Radien bei und liefert Informationen für die erste Triggerstufe.

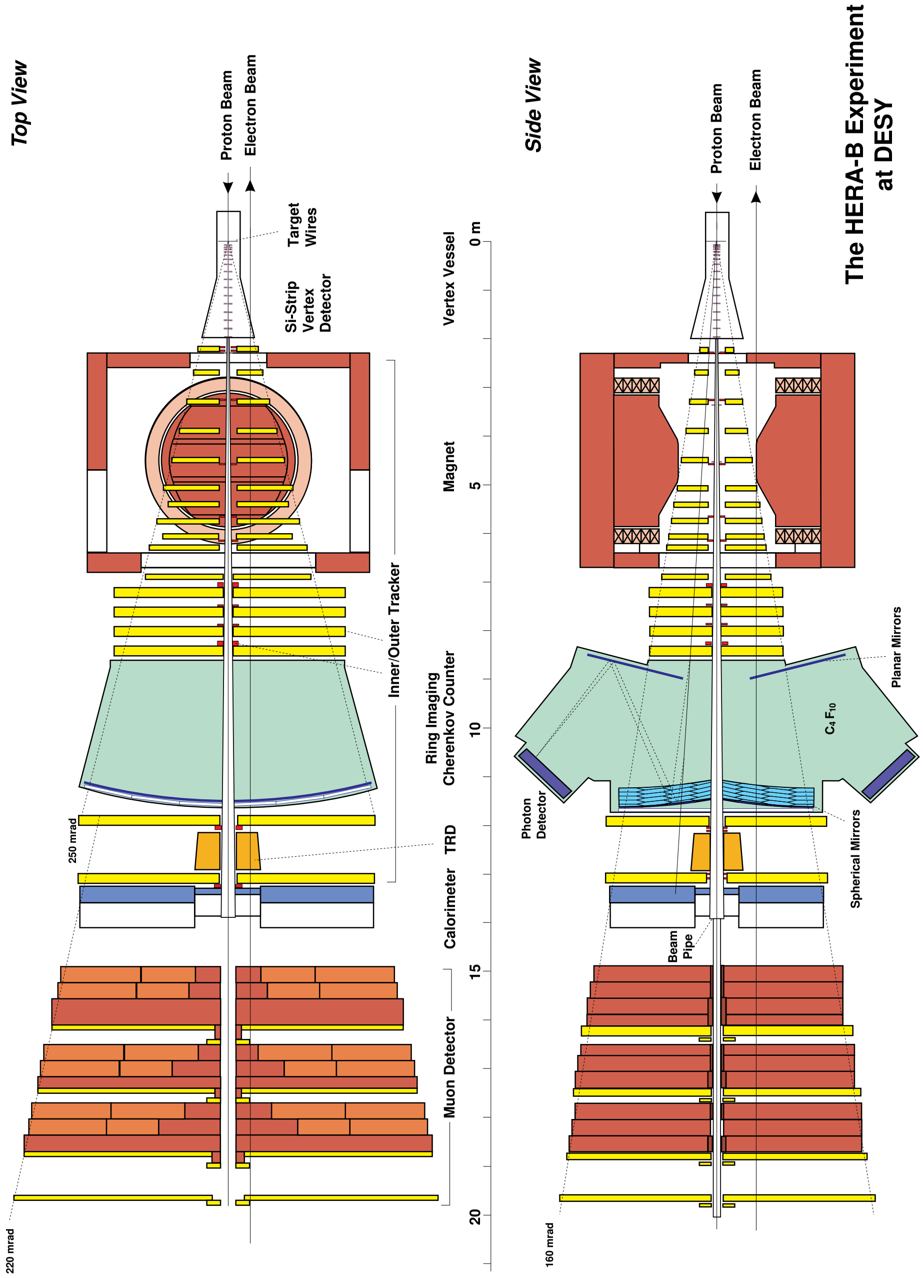


Abbildung 2.2: Der HERA-B-Detektor in der Aufsicht (oben) und Seitenansicht (unten). Rechts ist das Target, gefolgt von Silizium-Vertex-Detektor, inneren und äußeren Spurkammern, RICH, Übergangsstrahlungsdetektor, elektromagnetischem Kalorimeter und dem Myondetektor.

- Das äußere Spurkammersystem (OTR, Outer-Tracker) besteht aus 13 Superlagen aus Einzeldrahtdriftkammern. Diese ermöglichen eine Ortsauflösung von 350 μm.

- Das High-p_{T}-System im Magneten ist Bestandteil des Triggers und ermöglicht die Analyse von Zerfällen mit Endzuständen hohen Transversalimpulses, wie zum Beispiel $\mathrm{B}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, einem hadronischen Zerfall.

- Der Ring-Cherenkov-Counter (RICH) wird zur Teilchenidentifikation, vor allem von Pionen und Kaonen eingesetzt.

- Der Übergangsstrahlungsdetektor hilft, Hadronenspuren von Elektronenspuren zu trennen. Er ist nahe dem Strahlrohr positioniert.

- Das elektromagnetische Kalorimeter ist als Schaschlik-Kalorimeter mit Wolfram- und Bleiabsorbern realisiert. Abhängig vom Abstand von der Stahlröhre ist es in drei Bereiche unterschiedlicher Granularität unterteilt. Es dient dem Nachweis und der Energiemessung von Elektronen und ist zudem wesentlicher Bestandteil der ersten Triggerstufe.

- Der Myondetektor dient zur Identifizierung von Myonen. Er besteht aus vier Lagen von Driftkammern, die jeweils durch eine Absorberlage aus Eisen und Beton getrennt sind. Eine genauere Beschreibung des Detektors folgt im nächsten Kapitel.

Alles in allem hat der Detektor ungefähr 500.000 Auslesekanäle, die alle 96 ns Daten liefern. Um die Datenmenge von ca. 4 Terabyte pro Sekunde verarbeiten zu können, wird ein vierstufiges Triggersystem verwendet, welches in Kapitel 2.4 beschrieben wird.

2.3 Der Myondetektor des HERA-B-Experiments

Die räumlich letzte Komponente des HERA-B-Detektors ist der Myondetektor. Zum Nachweis des goldenen Zerfalls werden die Myonen aus dem Zerfall $\mathrm{J}/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ benötigt. Der Detektor befindet sich hinter dem elektromagnetischen Kalorimeter und beginnt etwa 1600 cm vom Target entfernt. Er besteht aus vier Detektorlagen MU1-MU4, von denen die letzten beiden Lagen für das Myon-Pretrigger-System, den FLT (First-Level-Trigger, die erste Triggerstufe) und Offline-Analysen bestimmt sind. Die drei Absorberlagen MF1-MF3, welche sich jeweils vor den Superlagen MU1-MU3 befinden, sind im inneren Bereich aus Eisen und im äußeren Bereich aus Beton. Vor der Superlage MU4 befindet sich nahe der Strahlröhre ein kleiner Absorber. Zwischen diesen beiden Lagen sollen die Effekte der Vielfachstreuung möglichst gering gehalten werden, da die Lagen innerhalb der ersten Triggerstufe verwendet werden, um Kandidaten für Myonspuren zu finden. Da Myonen in Materie einen geringeren Energieverlust erfahren als andere Teilchen (natürlich ausgenommen Neutrinos), gelangen hauptsächlich Myonen durch alle drei Absorberlagen. Abbildung 2.3 zeigt die Aufsicht auf den Myondetektor.

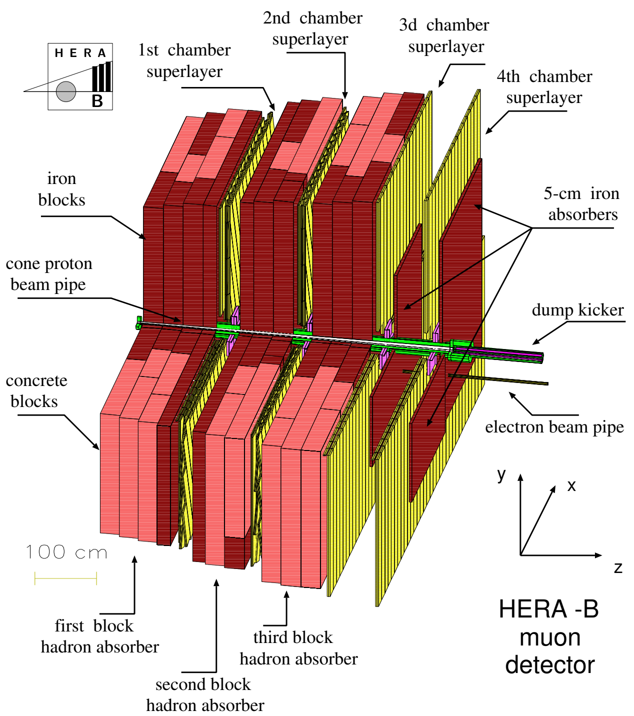


Abbildung 2.3: Übersicht des Myondetektors [17]. Die Protonen laufen von links nach rechts durch den Detektor. Er besteht aus vier sensitiven Superlagen und drei Absorberblöcken, jeweils vor den ersten drei Superlagen. Vor und hinter der vierten Superlage befindet sich eine kleiner ausgelegte Absorberlage.

Die Lagen MU1 und MU2 sind jeweils in drei Lagen von Driftkammern unterteilt. Eine davon ist die 0°-Lage, in der sich die Drähte parallel zur y-Achse des Detektors befinden, also senkrecht zur Ebene, in der die Ablenkung durch den Magneten stattfindet. Die beiden anderen Lagen sind als $\pm 20°$-Stereolagen konzipiert, um so eine Positionsbestimmung in y-Richtung zu ermöglichen. Die einzelnen Driftröhren haben eine Querschnittsfläche von $14 \times 12\,\mathrm{mm}^2$ [17]. Der Myondetektor ist durchgehend in eine obere und eine untere Hälfte unterteilt, da die erforderliche Antwortzeit und die hohe Dichte der Teilchenspuren eine Höhe von unter $3\,\mathrm{m}$ erzwingen.

Die Lagen MU3 und MU4 bestehen jeweils aus einer Driftkammerlage, deren Drähte auf 0° ausgerichtet sind. Diese Driftkammern sind mit einer Kathodenpadauslese ausgerüstet. Die Pads haben in der MU3-Lage eine Querschnittsfläche von etwa $12,2 \times 10,0\,\mathrm{cm}^2$, in der MU4-Lage von $12,2 \times 10,2\,\mathrm{cm}^2$ [18] und haben jeweils einen vertikalen Abstand von 2 mm voneinander. Es befinden sich zwei Padlagen hintereinander, wobei jeweils die zusammengehörenden Pads in beiden Lagen um eine halbe Driftzellenbreite gegeneinander verschoben sind und im logischen Sinn auf Ausleseebene verodert wurden. Dies stellt mit hoher Wahrscheinlichkeit sicher, daß es keinen insensitiven Bereich zwischen den Pads gibt und erhöht zudem die Effizienz der Pads. Zwischen den beiden Padlagen befinden sich Vorverstärker und Auslesekabel. Abbildung 2.4 zeigt eine schematische Darstellung der Detektorlage MU3. Rot eingezeichnet sind dort die Pads. Die Pads bestehen aus Phenolpapier, welches mit Kupfer überzogen ist. Sie werden mit Kunststoff-Abstandhaltern auf dem Aluminiumprofil gehalten.

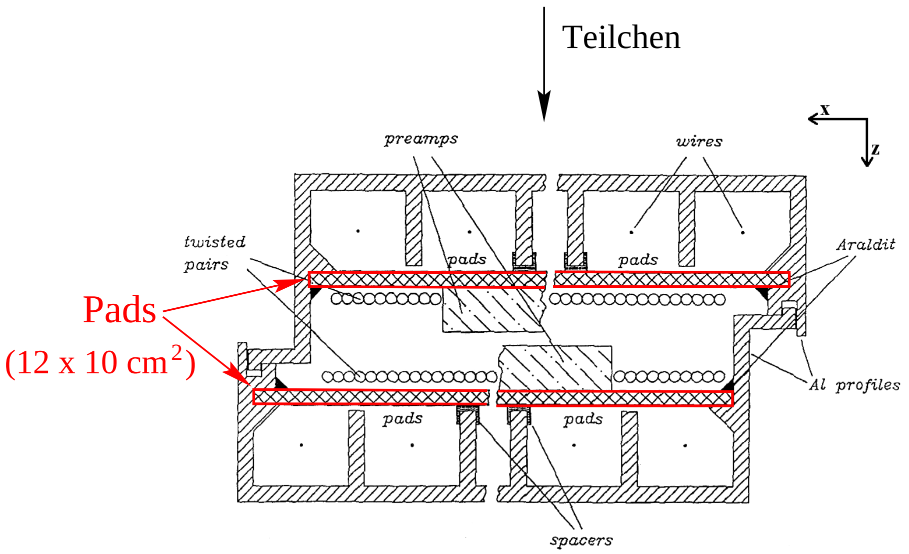


Abbildung 2.4: Aufbau des Padsystems in der Detektorlage MU3. Die Pads sind rot umrandet, schraffiert eingezeichnet ist das Aluminiumprofil. Im inneren Bereich befinden sich Auslesekabel und Vorverstärker.

Die Bereiche nahe dem Strahlrohr, wo hohe Spurdichten vorliegen, sind in allen vier Superlagen des Myondetektors mit Gaspixelkammern instrumentiert. Eine Zelle im Pixelsystem wird durch vier Potentialdrähte gebildet, die einen Signaldraht umgeben. Die Drähte sind in z-Richtung, also parallel zur Strahlröhre, gespannt. Die Grundfläche einer Zelle ist $9 \times 9\,\mathrm{mm}^2$. Für den Myon-Pretrigger werden 6×4 dieser Pixelzellen zu einem Pseudopad zusammengefaßt (Abbildung 2.5). Das Padsystem besteht in MU3 aus 66 Spalten mit jeweils 60 Pads,

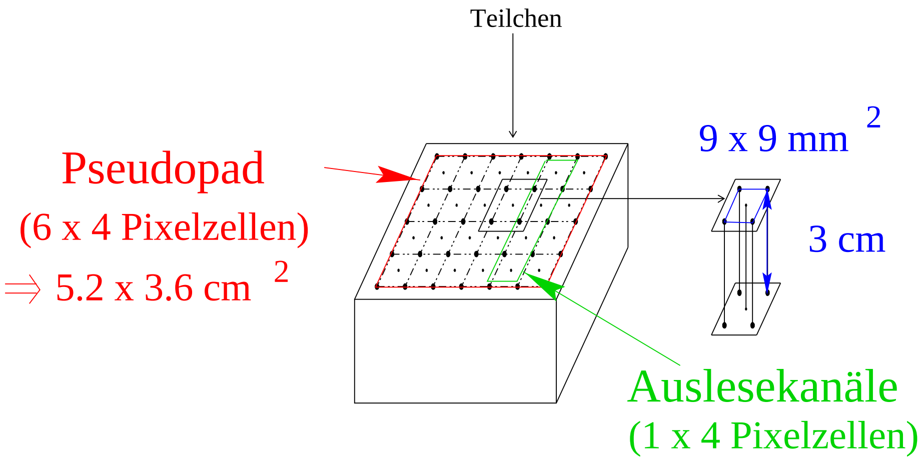


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Pixelsystems anhand eines für den Myon-Pretrigger definierten Pseudopads. Die Vergrößerung zeigt eine Pixelzelle.

in MU4 aus 66 Spalten mit 58 Pads. Das Pixelsystem besteht aus 16 Zeilen mal 45 Spalten von Pseudopads in MU3 und 9 Zeilen mal 48 Spalten in MU4. In beiden Systemen fehlen Pads in der Nähe des Strahlrohrs.

2.4 Die Triggerkette

Die sehr hohe Datenrate bei HERA-B macht ein effizientes Triggersystem notwendig. Ein Trigger hat die Aufgabe, aus einer Grundmenge von Ereignissen diejenigen auszuwählen, die für eine genauere Untersuchung in Betracht kommen. Für den goldenen Zerfall bedeutet dies, daß zunächst die Zerfälle im Detektor gefunden werden sollen, die auf ein J/ψ schließen lassen. Erst später wird dann untersucht, ob dieser Zerfall auf ein B-Meson zurückzuführen ist. Der HERA-B-Trigger [16] ist in vier Stufen aufgebaut.

Die Aufgabe des First-Level-Triggers (FLT), der ersten Triggerstufe, ist es, J/ψ-Mesonen zu finden, wobei an dieser Stelle egal ist, woher die J/ψ stammen. Der J/ψ-Kandidat wird durch die Bestimmung der invarianten Masse jeweils zweier Myon- bzw. Elektronspurkandidaten identifiziert. Die Myon- bzw. Elektronspurkandidaten bezieht der FLT von den Pretriggersystemen. Es gibt drei Pretriggersysteme bei HERA-B:

1. Der Myon-Pretrigger benutzt Informationen des Myonpadsystems, um Spurkandidaten zu definieren.

2. Der Elektron-Pretrigger benutzt „Cluster-Energien“ aus dem elektromagnetischen Kalorimeter zur Definition von Elektron- und Positronkandidaten.

3. Der High-p_T-Pretrigger benutzt eine dreilagige Kombination von Pad- und Pixelsystem innerhalb des Magneten, um geladene Teilchen mit hohem Transversalimpuls zu finden.

Der FLT geht von den Spurkandidaten aus und verfolgt die Spur von hinten nach vorne. Dabei wird jedesmal von der hinteren auf eine der vorderen Lage des Detektors eine „Region Of Interest“ (ROI) , eine Zone, in der Interessantes vermutet wird, definiert, in der die Spur dann weiterverfolgt wird. Auf diese Weise kann der FLT mit einem kleinen Teil der Informationen einer Lage die Spur verfolgen. Zentraler Bestandteil des FLT sind die „Track-Finding-Units“ (TFU). Sie bekommen die Parameter der zu untersuchenden ROI in einer Lage von dem Pretrigger oder einer vorgeschalteten TFU in Form einer Nachricht (Message) übermittelt. Die Aufgabe der TFU ist es, die Messages zu decodieren, zu überprüfen, ob es Detektortreffer in einer spezifischen Lage gibt, die Spurkandidaten zu extrapolieren und schließlich die aktualisierte Message mit den Parametern der ROI in der nächsten zu untersuchenden Lage an die dafür zuständige TFU weiterzuschicken. Dieses Verfahren ermöglicht es, eine hohe Datenmenge in minimaler Zeit zu bearbeiten. Ist der Spurkandidat etabliert, werden seine kinematischen Parameter von der „Track-Parameter-Unit“ (TPU) und die invariante Masse jeweils zweier geladener Leptonen von der „Track-Decision-Unit“ (TDU) berechnet. Ist die Trigger-Entscheidung aufgrund der Masse von der TDU getroffen worden, initiiert das „Fast-Control-System“ (FCS) die Übertragung der zu Beginn gespeicherten Daten an die nächsten Triggerebene. Abbildung 2.6 stellt diesen Ablauf schematisch dar. Der FLT ist in der Lage, die Ereignisrate um einen Faktor 200 zu senken.

Der Second-Level-Trigger (SLT), die zweite Triggerstufe, soll die Ereignissrate, die vom FLT geliefert wird, um einen Faktor 25 drücken. Er berechnet die kinematischen Parameter der vom FLT bestimmten Spurkandidaten mit höherer Präzision unter Verwendung von Informationen aus dem Silizium-Vertex-Detektor. Die vom SLT akzeptierten Ereignisse werden anschließend von den höheren Triggerstufen weiter untersucht.

Der Third-Level-Trigger (TLT), die dritte Stufe des Triggers, ergänzt den SLT in den Fällen, in denen der SLT nicht genügend Informationen hat, die Ereignisrate zu senken, ohne dabei übermäßig an Effizienz für das Signal zu verlieren und bietet eine zusätzliche Unterdrückung. Dies wird dadurch ermöglicht, daß der TLT einen schnellen lokalen Zugriff auf die gesamten Daten des Ereignisses hat,

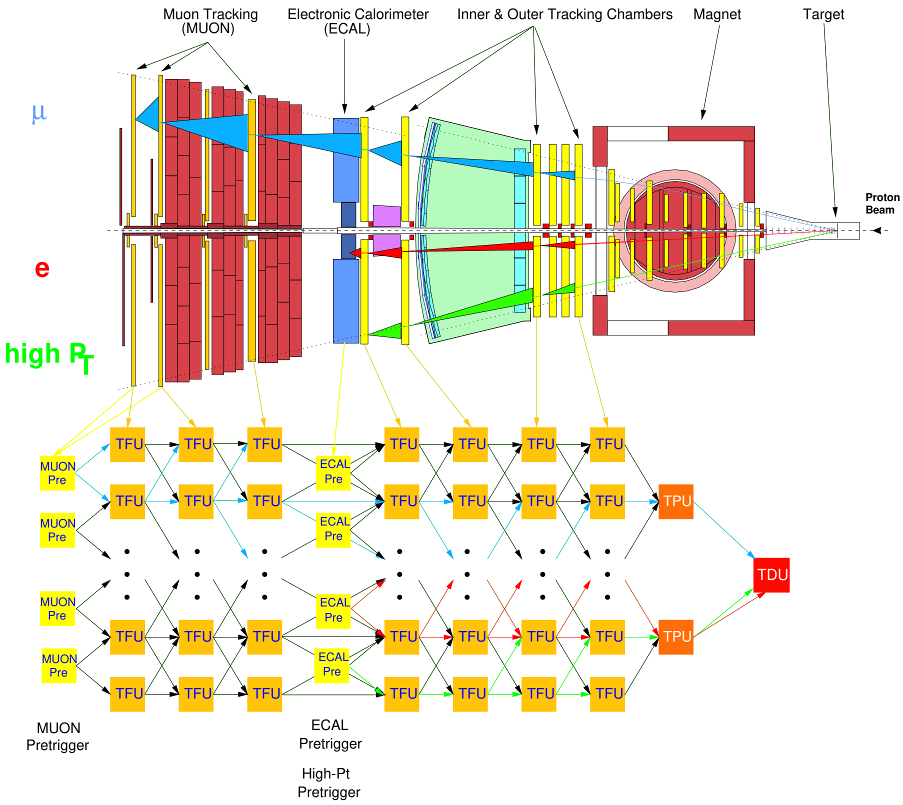


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des HERA-B-Detektors und des First-Level-Trigger. In der Abbildung sind jeweils die Daten liefernden Lagen mit den entsprechenden TFUs verbunden. Es werden drei Strategien der Spurverfolgung durch die Bestimmung von ROIs gezeigt, entsprechend den drei Pretriggern.

und nicht, wie der SLT, auf die Informationen aus den ROIs beschränkt ist. Die Datenrate des TLT beträgt zwischen 50 und 500 Hz.

Der Fourth-Level-Trigger (4LT), die vierte Triggerstufe, ist kein Trigger im eigentlichen Sinne. Um eine sofortige Analyse interessanter Ereignisse zu ermöglichen, werden diese online rekonstruiert, bevor sie auf Band gespeichert werden. Auch wird eine Klassifizierung der rekonstruierten Ereignisse durchgeführt. Die erwartete Archivierungsrate von 20 Ereignissen pro Sekunde führt bei angenommenen 100 kB/Ereignis auf ein Datenaufkommen von 20 TB in einem Jahr (10^7s Datennahme).

Kapitel 3

Der HERA-B-Myon-Pretrigger

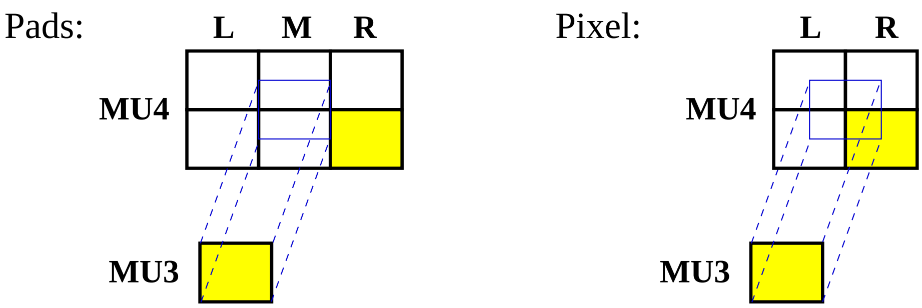


Abbildung 3.1: Das gesuchte Koinzidenzmuster in MU4 im Padsystem (links) und dem Pixelsystem (rechts). Zu einem Treffer in der MU3-Lage werden jeweils Treffer in den 6 bzw. 4 dahinterliegenden Pads in MU4 gesucht.

Der HERA-B-Myon-Pretrigger (z.B. [19]) ist Bestandteil des FLT des HERA-B-Experiments. Seine Aufgabe ist es, Regionen (ROI) für den FLT zu definieren, in denen Myonspurkandidaten vermutet werden. Dabei soll die Latenzzeit des Pretriggers nicht mehr als 1 μs betragen. Die zu verarbeitende Datenrate liegt bei ungefähr 10 GByte/s. Um diese mit der vorgegebenen Latenzzeit zu erreichen, wurde der Myon-Pretrigger durch ungefähr 100 Module realisiert, die stark parallelisiert arbeiten. Um die ROI zu definieren, sucht der Myon-Pretrigger in den Myonkammerlagen MU3 und MU4 nach räumlich-zeitlichen Koinzidenzen von Treffern in beiden Lagen. Wird ein Treffer in der Myonkammerlage MU3 gefunden, sucht der Pretrigger nach Treffern in den dem MU3-Pad zugeordneten Pads der MU4-Lage (siehe Abbildung 3.1). Im Padsystem benutzt das System dazu eine Fläche von 3×2 Pads, im Pixelsystem eine Fläche von 2×2

Pseudopads. Die beiden in MU4 übereinander liegenden Pads werden jeweils verodert.

3.1 Aufbau des HERA-B-Myon-Pretriggers

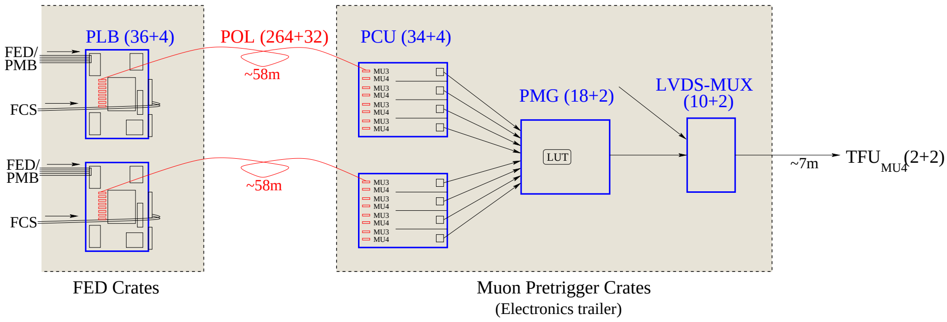


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des HERA-B-Myon-Pretriggers. Links befinden sich die direkt am Detektor befindlichen Crates (Einbaurahmen für Elektronikkarten) mit den PLBs. Über optische Übertragungsstrecken (POL) gelangen die Daten in den für auch während der Datennahme zugänglichen Bereich. Dort sind die Karten zur Berechnung der Koinzidenzen (PCU), zum Bilden der Messages (PMG), und der Multiplexer, der die Nachrichten an die TFUs des FLT weitergibt, untergebracht.

Der HERA-B-Myon-Pretrigger besteht aus vier unterschiedlichen Komponenten (Abbildung 3.2). Die erste Stufe des Pretriggers bilden die Pretrigger-Link-Boards (PLB) [20]. Das PLB hat die Aufgabe, Detektordaten von den Front-End-Drivern (FED) bzw., im Falle des Pixelsystems, den Pixel-Mapping-Boards (PMB), welche die Pseudopadzuordnung der Pixelinformation durchführen, und dem Fast-Control-System (FCS) zu übernehmen [21, 22]. Sie sind direkt in den FED-Crates (Einbaurahmen für Elektronikkarten) am Detektor untergebracht. Die entgegengenommenen Daten werden serialisiert und über optische Übertragungsstrecken unter Einsatz der Pretrigger-Optical-Links (POL) [23] zur Pretrigger-Coincidence-Unit (PCU) [24] übertragen. Auf der PCU findet die Berechnung der gesuchten Koinzidenzen statt, aus denen dann die ROIs (Regionen, in denen der FLT die Spursuche durchführt) bestimmt werden. Die ermittelten Koinzidenzinformationen werden über Flachbandkabel an den Pretrigger-Message-Generator (PMG) [25] weitergereicht. Der PMG erzeugt die für den FLT benötigten Messages aus den Koinzidenzinformationen. Der Multiplexer sorgt zum einen dafür, das Elektroniksignal von PECL auf LVDS umzusetzen, da sich der Standard mit der Entwicklung des FLT geändert hat. Wichtiger jedoch ist die Aufgabe, die von den PMGs erzeugten Messages auf die zugehörigen TFUs zu verteilen. Die PCUs befinden sich zusammen mit den PMGs in

Crates in der Elektronikhütte des Experiments. Jedes Crate enthält drei PMGs und sechs PCUs. Jeder PMG ist dabei für die Verarbeitung der Daten von jeweils zwei PCUs zuständig, daher sind die Crates in drei logische Segmente eingeteilt. Auf die Komponenten PLB, PCU und PMG wird in den folgenden Kapiteln noch genauer eingegangen.

3.2 Funktionsweise des HERA-B-Myon-Pretriggers

3.2.1 Funktionsweise des Pretrigger-Link-Boards

Von den FEDs werden mit einer Rate von 10,4 MHz 32 Bit an Detektorinformationen jeweils einer Spalte übermittelt, wobei jedem Pad ein logisches Bit zugeordnet wird. Die Bits 0 und 31 in MU3 sowie 0, 16 und 31 in MU4 sind mit sogenannten Dummybits aufgefüllt, da sie keinem Pad entsprechen. Diese Informationen werden kombiniert und für das Padsystem in zwei Zyklen aufgeteilt. Diese Aufteilung der Daten ist notwendig, da der für die Serialierung verwendete Chip maximal 32 Bit an Daten in einem Schritt serialisieren kann. Durch die Aufteilung der Daten in zwei Zyklen ist es erforderlich, bei MU4 das letzte Bit des ersten Zyklus (Bit 15) auf die Position des ersten Bit des zweiten Zyklus (Bit 16) zu kopieren. In Abbildung 3.3 ist die Aufteilung der Daten über die 32 Bit eines Zyklus dargestellt. Die 32 Bit werden in vier Blöcke zu je acht Bit unterteilt. Jeder Block beginnt mit einem Synchronisationsbit. Für die Daten des Pixelsystems ist die Aufteilung in zwei Zyklen nicht notwendig. Die 16

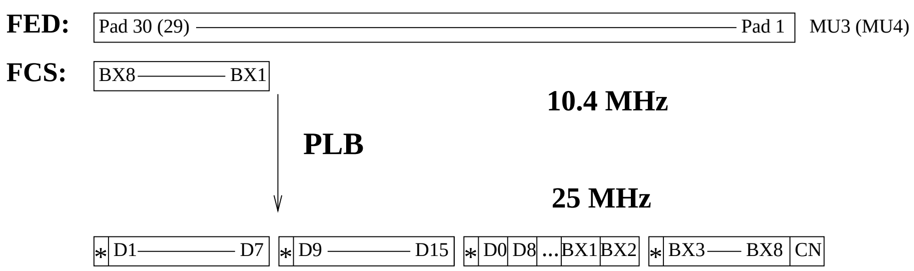


Abbildung 3.3: Das Datenformat auf dem PLB. Die Daten eines Zyklus sind in vier Blöcke unterteilt. Jeder Block hat ein führendes Synchronisationsbit, hier mit einem * gekennzeichnet. Zu den Datenbits und BX-Bits kommt noch ein Zyklusbit. Die Datenrate des PLB ist 25 MHz.

untereinanderliegenden Pseudopads werden in einem Arbeitsschritt serialisiert und übertragen. Die Übertragung erfolgt über die POLs, von denen sich auf jeder Karte acht befinden, da jedes PLB acht Spalten bearbeitet.

3.2.2 Funktionsweise der Pretrigger-Coincidence-Unit

Die Aufgabe der PCU besteht darin, in den Informationen der Spalten der Kammerlagen MU3 und MU4 Koinzidenzen von Treffern zu bestimmen. Die gefundenen Koinzidenzen werden geeignet kodiert und an den Pretrigger-Message-Generator übergeben. Die PCU (Abbildung 3.4) erhält ihre Daten über POLs.

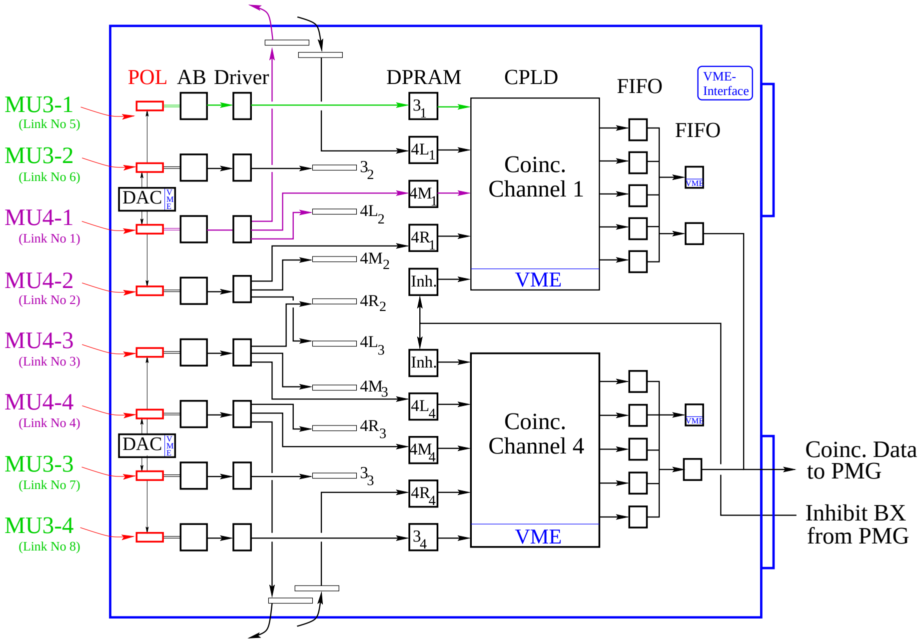


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Pretrigger-Coincidence-Unit (PCU). Es ist nur die Hauptplatine, nicht die Mezzanine-Karte dargestellt. Die Daten kommen über die optischen Links auf die PCU. Anhand des Kanals MU4-2 läßt sich der Datenweg (violett) bis zur Koinzidenzfindung erkennen. Die Daten des Kanals werden sowohl in einen Speicherbaustein (DPRAM), als auch als Randspalte auf eine benachbarte PCU und die Mezzanine-Karte geschrieben. In dem programmierbaren Logikbaustein (Coinc. Channel) werden die Koinzidenzen ermittelt und danach in die FIFOs geschrieben. Von dort werden die Koinzidenzinformationen an den PMG übertragen.

Auf jeder PCU befinden sich vier POLs, welche die Daten von vier MU3-Spalten erhalten und ebenso vier POLs für MU4-Spalten. Jedem POL wird auf der PCU ein Kanal zugeordnet. Zur Koinzidenzberechnug benötigt eine PCU pro MU3-Spalte die Informationen dreier MU4-Spalten. Die Daten der MU4-Spalten, deren Kanäle sich nicht auf der PCU befinden, werden von benachbarten PCUs über Flachbandkabel übertragen (Randspaltenübertragung). Für jeden MU3- und MU4-Kanal, der für die Koinzidenzberechnung benötigt wird, befindet sich ein DPRAM (Dual-Ported-Random-Access-Memory) auf der PCU. Das DPRAM stellt einen Datenpuffer da, der dazu dient, die Daten der entsprechenden MU3- und MU4-Spalten, welche jeweils in ein DPRAM, unter der BX-Nummer als Adresse, geschrieben werden, gemäß dieser BX-Nummer zu synchronisieren. Bevor die MU3-Daten in das DPRAM geschrieben werden, werden die Bits in jedem Zyklus um eine Stelle nach rechts verschoben. Um das Koinzidenzmuster zu berechnen, werden die zu einer MU3-Spalte benötigten MU4-Spalten nach dem Muster in Abbildung 3.5 bestimmt. Der MU4-Kanal

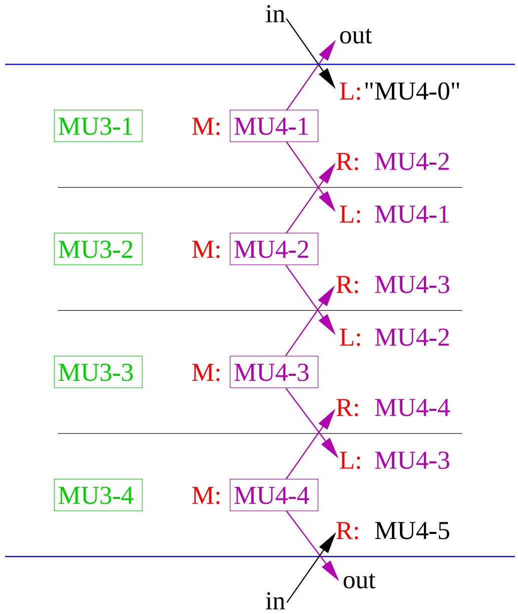


Abbildung 3.5: Zu einem MU3-Kanal gehören drei MU4-Kanäle. Die Bezeichnungen L, M und R bestimmen die Position des Bits in dem Koinzidenzmuster, wobei „L“ das höchste Bit bezeichnet und „R“ das niedrigste.

mit gleicher Kanalnummer wie der MU3-Kanal wird für die Bestimmung des mittleren der drei Bits im Koinzidenzmuster genommen. Der auf der PCU relativ zum MU3-Kanal obere MU4-Kanal wird zur Bestimmung des niedrigstwertigen Bits benutzt, der untere zur Bestimmung des höchstwertigen Bits. Wird zu einem Treffer in einem MU3-Pad in den drei dahinterliegenden, paarweise veroderten MU4-Pads ein Treffer gefunden, so ist dies eine der gesuchten Koinzidenzen (Abbildung 3.1). Um die Datenmenge zu reduzieren, werden auf der PCU für die gefundenen Koinzidenzen zwei Auswahlregeln „2 aus 4“ und „5 aus 8“ angewendet. Zur Anwendung der Auswahlregeln wird die Spalte in Bereiche von jeweils 4 Pads eingeteilt. Aus jedem Bereich wird die erste und die letzte Koinzidenz ausgewählt, die anderen werden verworfen. Von den acht Koinzidenzen, die durch das erste Auswahlkriterium gekommen sind, werden die fünf ausgewählt, die am nächsten zur Strahlröhre liegen. Dieses Verfahren wird durch die verwendete Hardware erzwungen und beeinträchtigt die Effizienz des Myon-

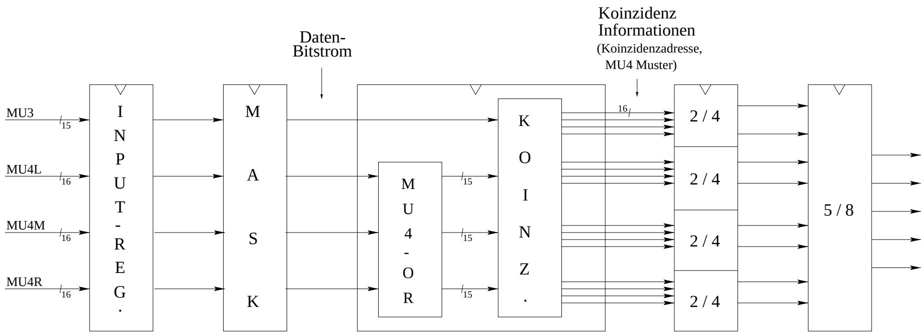


Abbildung 3.6: Der Datenfluß durch die PCU anhand des Padsystems. Die Daten in den Eingangsregistern werden zunächst maskiert. Danach werden die MU4 Daten verodert und anschließend die Koinzidenzmuster gebildet. Gefundene Koinzidenzen werden mit Koinzidenzadresse und Koinzidenzmuster weitergegeben. Die Auswahlregeln lassen maximal 5 Koinzidenzen durch, die an den PMG geschickt werden.

Pretriggers nur marginal, wie Monte-Carlo-Studien zu diesem Problem gezeigt haben [33]. Sind Probleme mit einem Pad bekannt, so besteht auf der PCU die Möglichkeit, einzelne Pads oder auch eine ganze Spalte zu maskieren. Unter Maskierung versteht man hier, daß dieses Pad nicht in die Betrachtung mit einfließt. Eine Maske ist eine Integerzahl, die mit einer anderen zu maskierenden Zahl logisch verundet wird. In der binären Darstellung der beiden Zahlen führt das dazu, daß das Ergebnis nur an Stellen eine Eins aufweist, an denen beiden Zahlen eine Eins hatten. Das Beispiel zeigt die Verundung der beiden Zahlen 23 und 35.

	Dezimaldarstellung	Binärdarstellung
	23	010111
UND	35	100011
	3	000011

Dies ist möglich, da in den Spalteninformationen, die von der PCU verarbeitet werden, einem bestimmten Bit genau ein Pad zugeordnet werden kann. Der Datenfluß durch die PCU ist in Abbildung 3.6 nochmal zusammengefaßt.

3.2.3 Beschreibung des Pretrigger-Message-Generators

Der Pretrigger-Message-Generator, welcher nicht Gegenstand der Untersuchungen ist, erzeugt aus den gefundenen Koinzidenzen die Messages für den FLT. In den Messages wird die „Region Of Interest" in Form von Winkelinformation kodiert. Zu jeder gefundenen Koinzidenzadresse sucht der PMG in einer assoziativen Tabelle (LUT, Look Up Table) nach der entsprechenden Message, die dort hinterlegt ist, und sendet sie an den FLT. Befindet sich die Koinzidenzadresse in der Region nahe des Strahlrohrs und im Padsystem, so werden mehrere Messages ausgelesen und verschickt, um so eine größere ROI für den FLT zu definieren. Dies ist notwendig, da für die Informationen des Myon-Pretriggers in den Messages nur ein beschränkter Platz vorgesehen ist, der nicht ausreicht, um größere Flächen zu definieren.

3.3 Auslese von Daten über die VME-Schnittstelle

VMEbus (Versa Module Eurocard) ist eine durch IEEE-1014 definierte Busarchitektur (siehe z.B.: [26]).

Die PCU und der PMG können über VMEbus angesprochen werden. Dies ist zum einen für die Inbetriebnahme der Karten nötig, bietet aber zum anderen auch die Möglichkeit, Daten im laufenden Betrieb direkt aus den Bausteinen der einzelnen Karten auszulesen, um so ein Fehlverhalten des Systems erkennen und analysieren zu können. Die VME-Schnittstelle ermöglicht den Zugriff auf folgenden Daten: Auf PCUs besteht ein Zugriff auf die Daten aus den DPRAMs und aus den FIFOs (First-In-First-Out-Speicher), die sich hinter dem Baustein, welcher die Koinzidenzen berechnet, befindet. Auf der PMG ermöglicht VME den Zugriff auf die Messages, bevor sie an den FLT geschickt werden. Die Möglichkeiten der Auslese über VME sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Auf der PCU

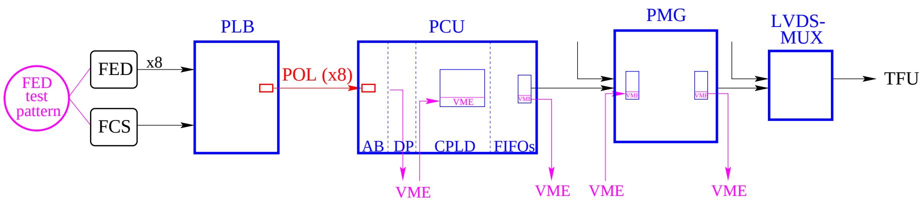


Abbildung 3.7: Testmöglichkeiten des Myon-Pretriggers über VME bestehen auf der PCU, DPRAM und FIFO und auf dem PMG in Form des Message-FIFOs.

werden die Rohdaten, welche von der PLB gesandt worden sind, zur Verfügung gestellt. Dafür werden die sich auf dem Board befindenden DPRAM-Bausteine vor dem programmierbaren Logikbaustein ausgelesen, also bevor die Koinzidenzen berechnet werden. Im DPRAM findet keine Unterdrückung von „leeren“ Myonspalten statt. Gibt es in einer Spalte im Myondetektor keine Treffer, so werden in den Datenbits des DPRAMs entsprechend Nullen gesetzt sind.

Die zweite Schnittstelle zur PCU ist die Auslese des Test-FIFOs. Hier finden sich die von der PCU berechneten Koinzidenzdaten. Die Koinzidenzdaten bestehen aus der gefundenen Koinzidenzadresse und den Treffermustern in MU4 (vgl. Kapitel 3.2).

Die dritte Möglichkeit, Daten aus dem System per VME zu erhalten, ist die Auslese des FIFOs auf der PMG. Die dort ausgelesenen Informationen sind identisch mit den Informationen, die in den Messages für den FLT kodiert werden.

Kapitel 4

Die Analyseumgebung ARTE in HERA-B

Die hier vorgestellten Untersuchungen mit Hilfe der ARTE-Umgebung stützen sich auf simulierte Daten (Monte-Carlo-Daten).

4.1 Grundlagen der Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Methode ist ein numerisches Verfahren, um Wahrscheinlichkeiten durch eine Folge zufälliger Zahlen zu berechnen (z.B.: [27]). Betrachtet man den Spezialfall einer einzigen Zufallsvariabel, kann das Verfahren in drei Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt wird die Folge gleichmäßig verteilter Zufallszahlen $r_1, r_2, \ldots$ im Intervall $0 < r < 1$ erzeugt. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion $g(r)$ ist gegeben durch

$$g(r) = \begin{cases} 1 & 0 < r < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad .$$

Als nächstes wird die erzeugte Folge benutzt, um eine andere Folge $x_1, x_2 ...$ zu erzeugen, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x)$ derart ist, daß sie das Modell beschreibt, welches untersucht wird. Somit werden die Werte von x behandelt wie simulierte Messungen, und es kann ermittelt werden, wie sich die Verteilungen von x in bestimmten Regionen verhalten, was dem Integral von $f(x)$ über diesen Bereich entspricht. Das Potential dieses Verfahrens wird offensichtlich bei der Betrachtung mehrdimensionaler Problemstellungen, in denen die Bestimmung des Integrals über $f(x, y, z, \ldots)$ nicht oder nur mit enormen

Aufwand möglich ist. Berechnet man ein Integral über die Trapezregel, wächst die Genauigkeit der Berechnung mit $\frac{1}{n^{2/d}}$, wobei d die Anzahl der Dimensionen ist und n die Anzahl der Werte, wohingegen die Genauigkeit der Monte-Carlo-Methode mit $\frac{1}{\sqrt{n}}$für beliebige Dimensionen wächst.

In der Teilchenphysik findet die Monte-Carlo-Methode eine Anwendung in der Simulation von experimentellen Daten, da die physikalischen Gesetze in der Quantenmechanik auf Wahrscheinlichkeiten basieren. Sie wird zum einen für die Erzeugung von Ereignissen genutzt und zum anderen, um den Detektor zu simulieren. Der in HERA-B eingesetzte Event-Generator ist LUND, ein Paket das aus mehreren Generatoren besteht, welche optimiert sind für spezielle Aufgaben [28].

JETSET ist der Rahmen für die LUND-Programme und ist für allgemeine Aufgaben wie Teilchenzerfälle zuständig.

FRITIOF simuliert Wechselwirkungen zwischen Hadronen und Nukleonen, kann aber nicht zur Erzeugung schwerer Quarks eingesetzt werden. Es wird in HERA-B hauptsächlich eingesetzt, um die Wechselwirkung der Protonen mit dem Atomkern desTargetdrahtes zu simulieren.

PYTHIA wird im besonderen dafür eingesetzt, c- und b-Quarks zu erzeugen. Der Generator kann allerdings keine Proton-Kern-Wechselwirkungen simulieren.

Da jeder der Generatoren seine Stärken und Schwächen hat, werden sie in einem engen Verbund eingesetzt.

Die in HERA-B verwendete Detektorsimulation HBGEAN[29] basiert auf GEANT [31].

4.2 Beschreibung der ARTE-Umgebung

ARTE (Analysis and Reconstruction Tool) [28] ist die gemeinsame Umgebung für die Offline- und einen Teil der Onlineprogrammierung in HERA-B. ARTE wird sowohl in der vierten Triggerstufe eingesetzt als auch in der Offline- und Online-Rekonstruktion, der Monte-Carlo-Simulation und der Analyse physikalischer Prozesse. Die ARTE-Umgebung beinhaltet Werkzeuge zum Lesen und Schreiben von Daten, für das Speicher-Management und bietet interaktiven Zugriff über eine KUIP-Schnittstelle (Kit for a User Interface Package, ein Kommandozeilen-Interpreter).

ARTE stellt Datenstrukturen in Form von zweidimensionalen Tabellen zur Verfügung, welche alle Eigenschaften des Detektors und der Ereignisse beinhalten. Das Programm ermöglicht über Schnittstellen in den Programmiersprachen C/C++ und Fortran Zugriff auf die Datenstrukturen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit sind die folgende ARTE-Tabellen wichtig:

MVER: Monte Carlo Vertices In dieser Tabelle werden die von der Monte-Carlo-Simulation generierten Vertices eingetragen. Die Einträge beinhalten unter anderem Informationen über den Ort des Zerfalls, das Teilchen, aus dem der Vertex hervorgeht, die entstehenden Teilchen in Form von Monte-Carlo-Spuren und Informationen über den Teilchentyp.

MIMP: Monte Carlo Impact Points Bei dem Durchgang einer Monte-Carlo-Spur durch eine Komponente des Detektors wird der Punkt des Durchgangs erfaßt. Ein MIMP (Monte Carlo Impact Point) stellt dies dar. Die Informationen beinhalten den Ort des Durchgangs, welcher Subdetektor in welcher Superlage getroffen wurde und welche Hits im Detektor daraus rekonstruiert wurden.

MTRA: Monte Carlo Tracks Hier werden alle Monte-Carlo-Spuren verzeichnet. Die Informationen beinhalten die Art des Teilchens, das Mutterteilchen, kinematische Variablen, Monte Carlo Impact Points und korrespondierende rekonstruierte Spuren.

HITB: In dieser Tabelle werden die Hits im Detektor verzeichnet. Es gibt noch eine korrespondierende Tabelle, HITC, die Treffer im elektromagnetischen Kalorimeter beschreibt. Werden die Daten in HITB aus einer Monte-Carlo-Simulation erzeugt, dann ist jedem HITB mindestens ein MIMP Eintrag zugeordnet, aus dem dieser HITB-Eintrag entstanden ist. Die Einträge in HITB werden zur Rekonstruktion der Spuren verwendet.

RTRA: Reconstructed Tracks Die RTRA verzeichnet sämtliche rekonstruierten Spuren eines Ereignisses. Die wichtigsten Einträge sind die Steigung der Spur vor dem Magneten, der erste gefundene Punkt der Spur, die Anzahl der Treffer in den verschiedenen Subdetektoren und Wahrscheinlichkeiten für veschiedene Teilchenhypothesen verschiedener Detektoren.

RVER: Reconstructed Vertices In dieser Tabelle werden die rekonstruierten Vertices verwaltet. Vorhanden sind unter anderem Informationen über den Ort, die beteiligten Spuren und die invariante Masse der Vertices.

In den ARTE-Tabellen existieren jeweils Verweise zu Elementen anderer ARTE-Tabellen. So finden sich beispielsweise in einem MTRA-Eintrag Verweise auf zugehörige Einträge in RTRA, MVER, MIMP, etc. Dies soll dem Benutzer bei der Analyse das Auffinden zusammengehörender Strukturen erleichtern.

Kapitel 5

Analyse der FCS-Testmuster

Für die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen wird auf die von der Hardware zur Verfügung gestellten Testmöglichkeiten zurückgegriffen, um Aussagen über den Betrieb der installierten Myon-Pretrigger-Komponenten machen zu können.

5.1 Ziel der Untersuchung

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, bietet die PCU die Möglichkeit, Daten aus den DPRAMs und dem TestFIFO über VME-Zugriff auszulesen. Die Funktion der optischen Übertragungsstrecken kann anhand der LinkOK-Signale überprüft werden.

Durch Analyse der DPRAM-Daten kann eine Aussage über die Übertragung der Daten zu den PLBs, der Kodierung der Daten auf den PLBs und die optische Übertragungsstrecke gemacht werden. Durch Vergleich der Daten aus den DPRAMs der MU4-Spalte kann die Verteilung der MU4-Daten überprüft werden. Durch Informationen aus den TestFIFOs der PCU wird die Berechnung der Koinzidenzinformationen überprüft. Die richtige Anwendung der Auswahlregeln (Kapitel 3.2.2) wird durch das ermittelte Muster der Koinzidenzadressen in einer Spalte geprüft.

5.2 Beschreibung der ausgelesenen Daten

Die Generierung von bekannten Eingangsmustern erlaubt es, den Datenfluß innerhalb des laufenden System beobachten zu können. Das FCS initiiert per

Software das Senden von Testmustern. Die FED-Tochterkarten [31] befinden sich in den gleichen Crates wie die PLBs, und jeweils eine FED-Tochterkarte ist über Flachbandkabel mit einem PLB verbunden. Die Testmuster werden von den FED-Tochterkarten erzeugt und in das PLB eingespeist.

Dadurch, daß keines der Myon-Pretrigger-Module in den Datenfluß eingreifen muß, um die Muster zu erzeugen, ist eine Verhaltensanalyse des gesamten Myon-Pretriggers möglich. Es werden drei verschiedene Testmuster erzeugt. Das jeweilige Muster wird alle 32 BX (Bunchcrossings, siehe Kapitel 1.3) geschickt. Dazwischen erzeugt das FED keine Daten und leitet auch keine Detektordaten weiter. Die einzelnen Muster unterscheiden sich voneinander durch die in den Daten gesetzten Bits. Der Wert „Eins" eines Bits entspricht dabei einer elektrischen Spannung, die über einem von der verwendeten Logikfamilie abhängigen Schwellenwert liegt. Ist die Spannung unter diesem Schwellenwert, ist der Wert des Bits „Null". Das Muster ODD (vgl. Abbildung 5.1 a)) besteht aus einem 32-

BIT 31 BIT 0

1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0

(a) ODD

BIT 31 BIT 0

0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1

(b) EVEN

BIT 31 BIT 0

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

(c) ALL

Abbildung 5.1: Darstellung der Testmuster: (a) Es sind alle ungeraden (ODD), (b) alle geraden (EVEN), c() alle Bits (ALL) auf den Wert Eins gesetzt, jeweils alle anderen auf Null.

Bit-Wort, in dem alle ungeraden Bits auf „Eins“ und alle geraden Bits auf „Null“ gesetzt sind. Das Muster EVEN (vgl. Abbildung 5.1 b)) wiederum besteht aus einem 32-Bit-Wort in dem alle geraden Bits auf „Eins“ und alle ungeraden auf „Null“ gesetzt sind. Im Muster ALL (vgl. Abbildung 5.1 c)) sind alle Bits auf „Eins“ gesetzt. Aufgrund der Bitoperationen auf dem PLB und der PCU (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.2) kommen die Spalteninformationen, wie in Abbildung 5.2 für MU3- und MU4-POLs gezeigt, im DPRAM der PCU an.

Der Myon-Pretrigger ist so konzipiert, daß an verschiedenen Stellen mittels VME-Zugriff relevante Informationen von den einzelnen Modulen ausgelesen werden können (siehe 3.3).

5.3 Beschreibung der Messung

Die Daten wurden zwischen dem 25. und 27. November 1999 genommen. Das System befand sich in diesem Zeitraum in der Aufbauphase und war nur teilweise bestückt. Ein Myon-Pretrigger-Crate ist in drei Segmente unterteilt, die von Null bis Zwei numeriert werden. Das vollständige System beinhaltet sieben Crates, von denen vier voll und drei Crates teilweise bestückt sind (siehe [32]). Zu jedem Segment gehören zwei PCUs und ein PMG. Zum Zeitpunkt der Datennahme war Crate 4 vollständig mit drei PMGs und sechs PCUs und Crate 5 mit einer PMG und zwei PCUs ausgerüstet. Die Konfiguration dieser beiden Crates ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Doppellinie von einer PCU zu einer anderen stellt dabei eine installierte Randspaltenübertragung dar. Die gepunktete Verbindung stellt die Verbindung zwischen den PCUs und der PMG dar. Die Randspaltenübertragung in Crate 5 Segment 2 zwischen den beiden PCUs war nicht installiert. Auf einer PCU existierten jeweils nur die beiden Kanäle, welche direkt auf der Hauptplatine bearbeitet werden. Die Mezzanine-Karten, welche ebenfalls Bestandteil des Pretriggers sind und die Koinzidenzberechnung für die anderen beiden Kanäle einer PCU übernehmen, waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt. Die vier installierten Kanäle, zwei jeweils auf einer PCU-Hauptplatine, haben die Kanalnummer Eins, Vier, Fünf und Acht. Vor Beginn einer Messung werden für den Myondetektor Belegungsmasken ermittelt, um zu bestimmen, welche Pads des Myondetektors aufgrund von Problemen in der Pad-Auslese-Elektronik überproportional viele Signale liefern, damit diese während der Datennahme des Detektors ausmaskiert werden können. Auf Basis der Belegungsmasken wird dann festgelegt, von welchen Pads Daten verarbeitet werden. Ebenfalls wurden in dieser Datennahme diejenigen POLs, von denen bekannt war, daß sie nicht funktionierten, oder kurze Zeit nach der Initialisierung ausfielen, ausmaskiert. Während der Datennahme werden dann

EVEN

BIT 31 BIT 0

1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0

ODD

BIT 31 BIT 0

0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1

ALL

BIT 31 BIT 0

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

(a) MU3

EVEN

BIT 31 BIT 0

0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1

ODD

BIT 31 BIT 0

1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0

ALL

BIT 31 BIT 0

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

(b) MU4

Abbildung 5.2: Die Testmuster nachdem die Bitoperationen auf der PLB (Kapitel 3.2.1) und der PCU (Kapitel 3.2.2) angewendet wurden a) in MU3, b) in MU4.

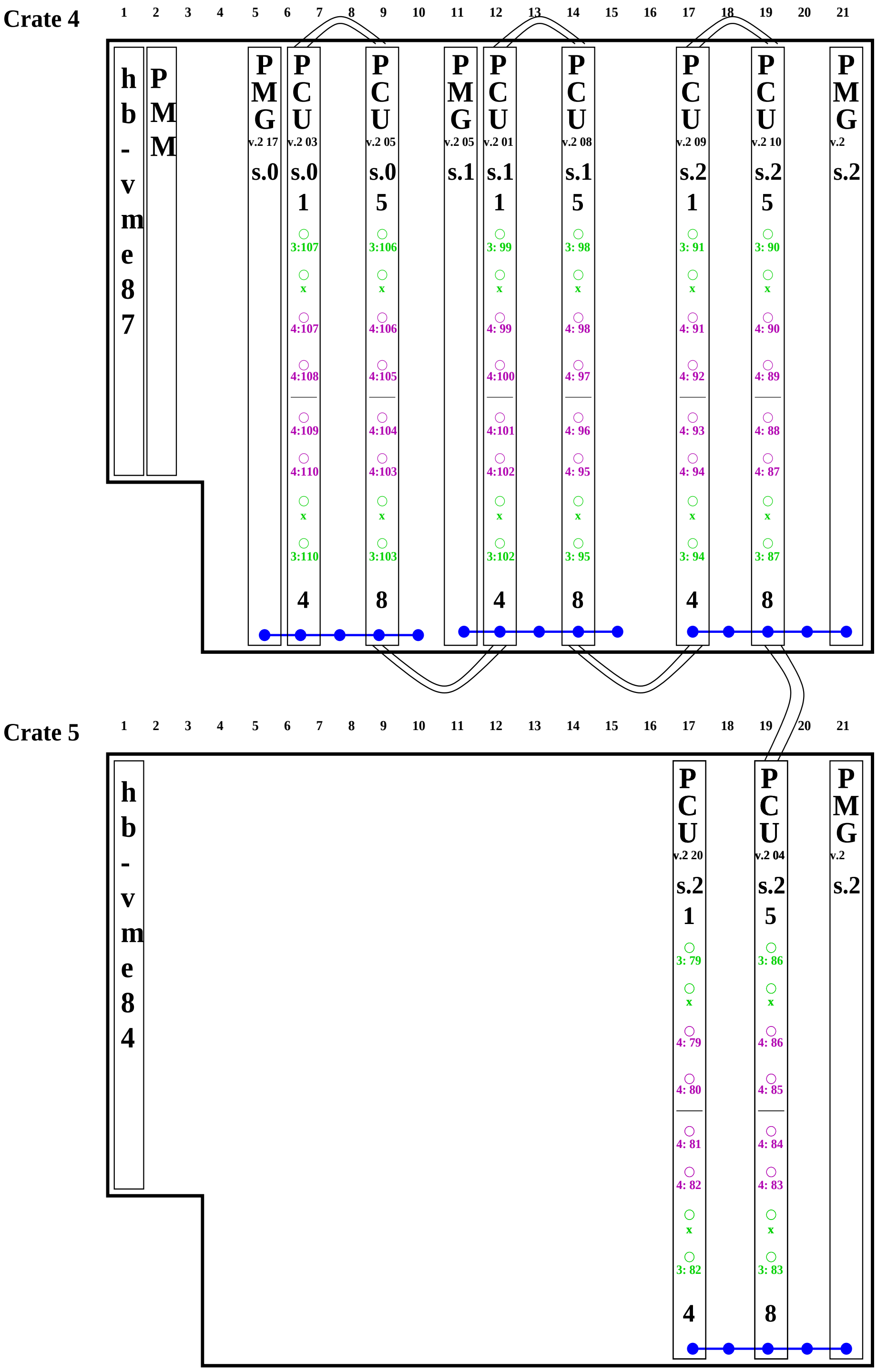


Abbildung 5.3: Installierte PCU- und PMG-Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems während der Messung zwischen dem 25. und 27. November 1999. Die doppelt gezogenen Bögen sind Randspaltenverbindungen zwischen den PCUs (siehe Kapitel 3.2.2) Die gepunktete Linie ist die Verbindung von jeweils einer PCU zu dem zugehörigen PMG. In Crate Vier sind alle Segmente installiert. MU3-POLs haben im Namen ein führendes „3:“, MU4-POLs ein „4:“. Die mit „x“ markierten MU3-POLs liefern Daten, die die Mezzanine-Karte verarbeiten wird und deshalb nicht angeschlossen sind. Links im Crate ist die Cetia, über die die Karten angesprochen werden, eingezeichnet.

noch weitere defekte POLs ausmaskiert. Infolge des zu diesem Zeitpunkts noch nicht standardisierten Protokollierens der vorgenommen Änderungen am System, läßt sich nicht vollständig nachvollziehen, welche POLs als defekt erachtet wurden. Schon in der nächsten Datennahme war das Verfahren überarbeitet und das Problem gelöst. Für die Entscheidung werden die Steuerungsdateien herangezogen. In diesen Dateien sind explizit die Befehle aufgeführt, welche benutzt werden, um das System zu maskieren, aber es ist nicht nachzuvollziehen, zu welchen Zeitpunkt welche Steuerungsdatei eingesetzt wurde. Während die Testmuster-Daten genommen wurden, war kein Pad ausmaskiert. Somit muß im Nachhinein zuerst ermittelt werden, welche POLs nicht funktionierten, um diese von der eigentlichen Beurteilung des Systems auszuschließen. Um die Daten auszulesen, müssen mit dem Steuerprogramm, welches jeweils die Module in einem Crate ansprechen kann, die zu untersuchenden Komponenten ausgewählt werden. Die ausgelesenen DPRAM-Inhalte wurden in Dateien mit dem Dateinamenmuster *dpr-c[CRATE]_[YYMMDD]_[RUNNINGNUMBER].dat*, die FIFO-Inhalte nach *pcu_c[CRATE]_[YYMMDD]_[RUNNINGNUMBER].dat*, geschrieben (CRATE steht für das Crate, in dem die Daten genommen wurden, YYMMDD für das Datum und RUNNINGNUMBER ist eine laufende Nummer). Insgesamt wurden 93 DPRAM- und 2 PCU-Auslesen vorgenommen. Ein Datensatz besteht aus dem vollständigen Inhalt aller DPRAMs auf einer PCU bzw. aus dem Inhalt des Test-FIFOs des PMG. Es wurden jeweils 100 DPRAM-Datensätze und 60 PCU-Datensätze pro Datei ausgelesen, wobei in Crate 5 nur die ersten vier Datensätze lesbar sind, siehe Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Anzahl der genommen Daten, aufgeschlüsselt nach Typ, Crate und Testmuster

Testmuster		Anzahl Dateien(Datensätze) DPRAM		PCU	
		Crate 4	Crate 5	Crate 4	Crate 5
ODD		33(660)	20(2000)	-	-
EVEN		23(460)	10(1000)	-	-
ALL		5(100)	3(300)	1(60)	1(4)

5.4 Auswertung der Testdaten

5.4.1 Ermittlung der Funktionstüchtigkeit der zu untersuchenden optischen Links

Um die Funktion der POLs zu überprüfen, werden die von den jeweiligen MU3- und MU4- DPRAMs ausgelesen Daten für jedes zu untersuchende Muster einzeln betrachtet. Ein DPRAM ist ein Ringspeicher, der aus 64 jeweils 16 Bit breiten Registern besteht. Zwei aufeinanderfolgende Register beinhalten die vollen 32 Bit an Daten für eine Kammerspalte. Die Daten eines Zyklus werden in dem Register mit der Adresse $[(BX \cdot 2 + CN) \bmod 64]$ gespeichert, wobei CN für das Zyklusbit und BX für die BX-Nummer steht. Da die FCS-Daten immer zu einer BX-Nummer $[BX \bmod 32 = 0]$ gesendet werden, ist das gesuchte Muster immer in den Registern Null und Eins zu finden.

Jedes Diagramm in den Abbildungen 5.4-5.6 interpretiert den Inhalt eines DPRAMs. In dieser Darstellung entspricht ein Eintrag auf der x-Achse jeweils einem in den Daten gesetzten Bit. Die Positionen von 0 bis 32 entsprechen dabei dem jeweiligen Bit in den Daten. Die beiden Zyklen sind in den Darstellungen zusammengefaßt worden. Der zweite Zyklus beginnt mit Bit 16. Bit 34 ist als Referenz gedacht und zählt die Anzahl der Auslesen des DPRAMs mit.

Abbildung 5.4 stellt die MU3-DPRAMs in Crate 4 in den Segmenten 0 und 1, welche das erwartete Bild zeigen, exemplarisch für einen funktionierenden POL dar.

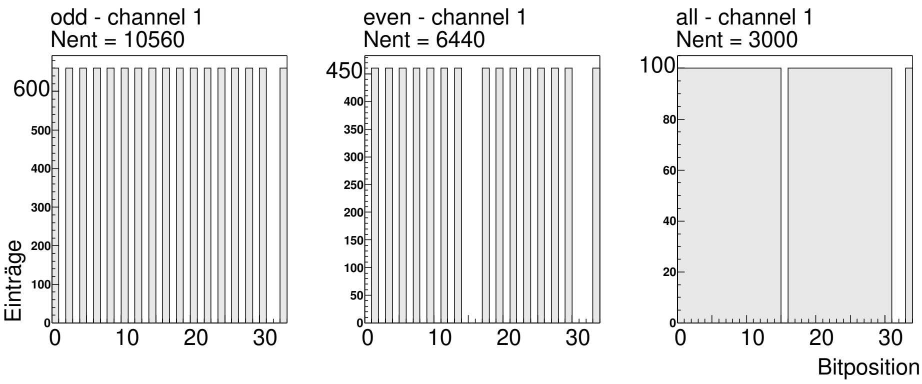


Abbildung 5.4: Richtige Auslese eines MU3-DPRAM (3:91). Die Abszisse beschreibt dabei das Bit im Datenwort. Der letzte Eintrag, $x = 34$, ist ein Zähler für die Anzahl der Auslesen. Alle Muster sind um ein Bit in Richtung Bit Null verschoben. Die Muster EVEN und ALL zeigen richtig das nicht gesetzte Bit 15, welches durch die Trennung der Daten in zwei Zyklen entsteht. Bit 16, welches genau genommen Bit Null im zweiten Zyklus ist, kann nicht auf Bit 15 im ersten Zyklus verschoben werden.

In Crate 4, Segment 2 (Abbildung 5.5) ist das Muster des Links mit der Kanalnummer 8 falsch. Hier sind Abweichungen in den Bits 10 und 26 zu sehen. Zudem entspricht die Anzahl der ermittelten Auslesen nicht der Erwartung. Genau wie bei allen anderen DPRAMS in Crate 4 sollte hier die Anzahl jedes Bits 660 betragen. Dieser Wert ergibt sich aus der Anzahl der DPRAM-Auslesen, in einem Auslesezyklus wird der Speicher 20 mal ausgelesen, multipliziert mit der Anzahl der ausgelesenen Dateien, 33. Für die Testmuster EVEN sind keine Auffälligkeiten zu entdecken.

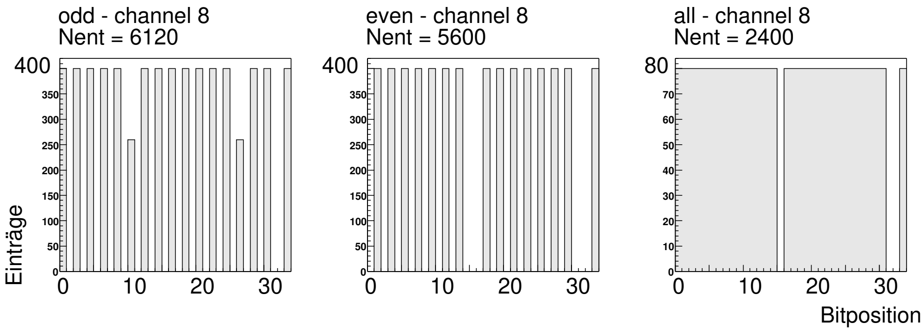


Abbildung 5.5: Crate 4, Segment 2, Kanal 8, MU3-DPRAM 3:87. Es ist ein Fehler im ODD-Muster auf Bit 10 und 26 zu sehen. Die Menge der gefundenen Auslesen für ODD- und ALL-Muster entspricht nicht der Erwartung. Die Beschreibung der Achsen entnimmt man Abbildung 5.4.

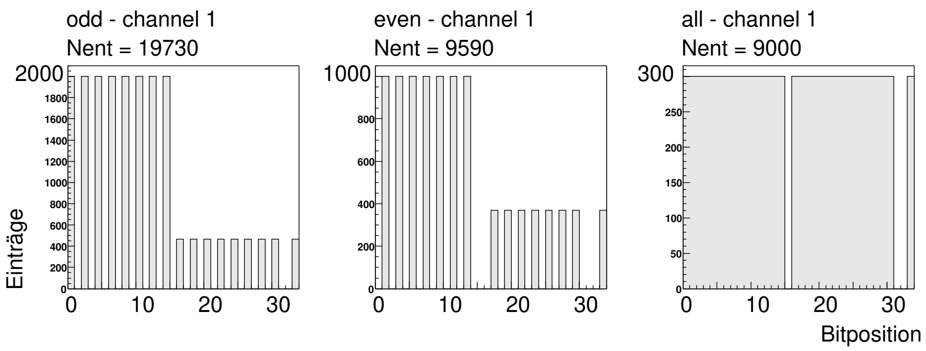
In Crate 5 ist nur das Segment 2 installiert. In Kanal 1 (Abbildung 5.6) ist ein Fehlverhalten in den Mustern ODD und EVEN zu beobachten. Der Fehler beschränkt sich auf den zweiten Zyklus und ist ebenfalls in dem korrespondierenden MU4M-DPRAM (4:79) zu finden. Alle anderen MU3-DPRAMs sind nicht zu bemängeln.

Abbildung 5.7 zeigt den Inhalt von MU4L-DPRAM in Crate 4, Segment 0, Kanal 4 als Beispiel für fehlerfreie MU4-DPRAMs. Dieses DPRAM entspricht dem POL 4:109.

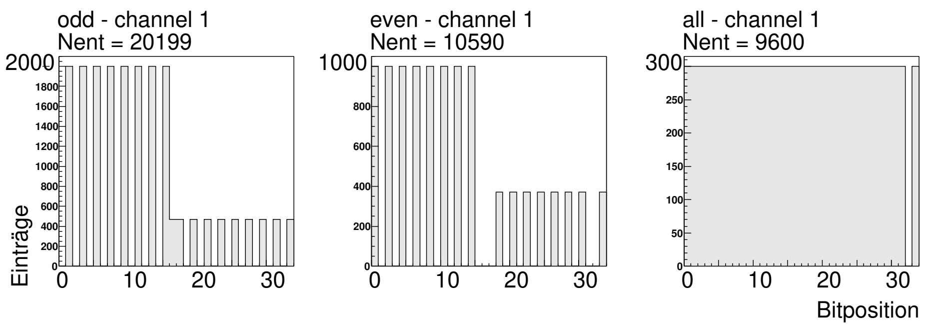
Tabelle 5.2 listet die Kanäle mit fehlerhaftem Verhalten auf.

Tabelle 5.2: Zuordnung der DPRAMs mit falschen Einträgen zu den Kanälen auf den PCUs.

Crate 4	MU3-Kanal	MU4L-Kanal	MU4M-Kanal	MU4R-Kanal
Segment 0	-	1, 4, 5, 8	1, 4, 5, 8	1, 4, 5, 8
Segment 1	-	1, 5	1, 5	1, 4, 5
Segment 2	8	8	-	8
Crate 5				
Segment 0	nicht installiert	n. i.	n. i.	n. i.
Segment 1	nicht installiert	n. i.	n. i.	n. i.
Segment 2	1	1, 5	1, 5, 8	1, 4, 8



(a) MU3



(b) MU4

Abbildung 5.6: Crate 5, Segment 2 a) MU3-DPRAM (3:79) b) MU4M-DPRAM (4:79). Die EVEN- und ODD-Muster sind jeweils im zweiten Zyklus falsch. Das ALL-Muster ist perfekt. Siehe auch Abbildung 5.4.

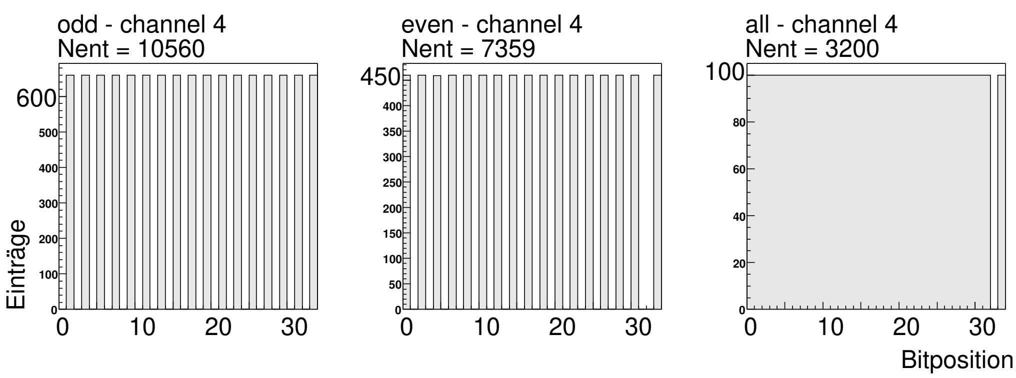


Abbildung 5.7: Crate 4 Segment 0 Kanal 4 MU4L (4:109). Dieses DPRAM zeigt die richtigen Muster in der richtigen Anzahl. Die Bitkopieroperation, die von der PLB vorgenommen wird, wirkt sich nicht auf das Muster aus, da von einer ungeraden auf eine ungerade Bitposition kopiert wird. Siehe auch Abbildung 5.4.

5.4.2 Diskussion der gefundenen Fehler bei der Betrachtung der DPRAM-Auslesen

Zum Zeitpunkt der Datennahme war von einigen POLs bekannt, daß sie überhaupt nicht, oder nur instabil liefen. Instabil bedeutet hier, daß der POL nach kurzer Zeit, maximal 20 Minuten nach der Initialisierung, wieder ausfiel. Es war von keinem MU3-POL bekannt, daß er instabil war. Von den MU4-POLs waren Probleme bei 4:86, 4:97, 4:98, 4:99, 4:106 und 4:107 in Crate 4 und bei 4:86, 4:81 in Crate 5 bekannt. Da zu jedem MU4-POL mehrere DPRAMs gehören, ist es notwendig, die Zuordnung der physikalischen POLs der PCUs zu den DPRAM-Bezeichnungen herzustellen (siehe Tabelle 5.3). In Abbildung 5.3 sieht man, daß die Randspaltenübertragung zwischen PCU a) und b), beide im Segment 2 des Crates 5, nicht vorhanden war. Als Folge dessen sind die DPRAM-Inhalte des POL 4:82 in MU4R-DPRAM und des POL 4:83 im MU4R-DPRAM Zufallswerte. Hier befinden sich die Werte in den Registern, die beim Einschalten zufällig gesetzt wurden. Neue konnten nicht hineingeschrieben werden, da der POL nicht funktionierte. Somit sind diese Abweichungen erklärt. Die bekannten nicht funtionierenden POLs erzeugen ebenfalls in allen zugeordneten DPRAMs falsche Muster. Somit reduziert sich das Feld der noch zu erklärenden Fehler auf die MU4 Links 4:103 und 4:110, welche auf der gleichen PCU liegen und das gleiche Fehlverhalten zeigen, und die Links 4:79 und 4:83.

Die Fehler in den MU4-DPRAMs zu den POLs 4:103 und 4:110 sind auf ein falsch eingestelltes PLB zurückzuführen. Die Entscheidung, ob ein PLB Daten einer MU3-Spalte oder Daten aus einer MU4 -Spalte verarbeitet, wird durch einen auf der PLB befindlichen Stecker getroffen. Bei dieser PLB war diese Einstellung falsch, und die Daten dieser MU4-Spalten wurden dann wie die einer MU3-Spalte behandelt. Wird dies berücksichtigt, sind die ausgelesenen Daten richtig. Der Fehler, der in POL 4:83 übertragen wird, ist auf ein defektes Flachbandkabel zurückzuführen. Die Bits 0, 2, 12, 16, 18, 28 fehlen in jedem Muster.

Das Verhalten des POL 3:87 ist durch eine Kontrolle der LinkOK-Signale (Kapitel 3.2.2) und eine genaue Ansicht der Daten dieses POL zu erklären. Beim Start und am Ende der Auslese einer PCU wird überprüft, ob noch alle POLs laufen, indem ihre LinkOK-Signale überprüft werden. Insgesamt ist in dem betroffenen Kanal mindestens einer der POLs fünfmal ausgefallen. Hiervon betroffen sind die POLs 3:87 und 4:87. Im Protokoll der Datennahme ist zudem ein häufiges Ausfallen des POL 4:87 vermerkt.

In den Daten, die zu den POLs 3:79 und 4:79 gelesen wurden, blieb an einem Punkt die BXCN-Nummer in den ausgelesenen Datei stehen

Tabelle 5.3: Zu jedem MU4-POL ist verzeichnet, zu welchem Kanal auf welcher PCU er in welches DPRAM geschrieben wird. R, M, L sind Kurzbezeichnungen für MU4L(M,R)-DPRAM. Die PCU a) ist jeweils für die Kanäle Eins und Vier, die PCU b) für die Kanäle 5 und 8 zuständig.

MU4	Zugehörige Kanäle in Crate 4												Crate 5			
Link	Segment 0				Segment 1				Segment 2				Segment2			
	1	4	5	8	1	4	5	8	1	4	5	8	1	4	5	8
4:79													M			
4:80													R			
4:81														L		
4:82														M		R
4:83														R		M
4:84																L
4:85															R	
4:86												R			M	
4:87												M			L	
4:88												L				
4:89											R					
4:90									L		M					
4:91									M		L					
4:92									R							
4:93										L						
4:94								R		M						
4:95								M		R						
4:96								L								
4:97							R									
4:98					L		M									
4:99					M		L									
4:100					R											
4:101						L										
4:102				R		M										
4:103				M		R										
4:104				L												
4:105			R													
4:106	L		M													
4:107	M		L													
4:108	R															
4:109		L														
4:110		M														

(Datei dpr_c5_991125_036.dat.gz, Auslesezyklus 70). Der Eintrag, der als BX-CN-Nummer interpretiert wird, ist ein vom Datenausleseprogramm gesetzter Zähler, der die Adresse der auszulesenden Daten in dem DPRAM setzt. Wird dieser nicht in das dafür vorgesehene Register auf der PCU geschrieben oder nicht hochgezählt, werden die Daten ständig unter derselben Adresse aus dem DPRAM ausgelesen. Der Fehler tritt in diesem Fall bei MU3 als auch bei MU4 auf. Bei der späteren Datennahme des ALL-Testmusters kann der Fehler nicht gesehen werden, was eine weitergehende Analyse unmöglich macht. In Effizienzmessungen des Myon-Pretriggers [33] wird für diese PCU kein auffälliges Verhalten festgestellt.

5.5 Untersuchung des Auslaufens von Daten in die Bunchcrossing-Nummer *Eins*

In einer früheren Untersuchung [34] wurde das Phänomen entdeckt, das von unserer Arbeitsgruppe „Leakage" (Auslaufen) getauft wurde. Wie vorher beschrieben sollte sich in den DPRAMs nur in den Adressen Null und Eins Daten finden, in denen Bits auf Eins gesetzt sind. Es stellte sich jedoch heraus, daß bei hoher Belegung der Daten mit auf Eins gesetzen Bits, Daten in der DPRAM-Adresse Zwei, also BX-Nummer *E*ins auftauchen. Das Auslaufen tritt nur bei dem FCS-Muster ALL auf, ein Fall, der so aber nicht während der Datennahme mit dem Detektor auftreten kann. Es wurde jeweils die DPRAM-Adresse Zwei und Drei untersucht und die gefundenen Einträge von Einsen gezählt, wobei in Adresse 3 nichts gefunden wurde. Es sind nahezu keine Einträge in den FCS-Mustern EVEN und ODD zu finden. Der Anteil von gesetzten Bits in BX-Nummer Eins im Verhältnis zu allen Bits, die im DPRAM gesetzt sind, liegt für das FCS-Testmuster ODD bei unter 10^{-3} und für EVEN bei unter 10^{-5}, jedoch bei ALL wesentlich höher, nämlich ungefähr $\frac{1}{10}$.

Die Kabel, die zum Datentransport zwischen FED und PLB benutzt werden, sind 34-adrige Flachbandkabel mit 32 Signalleitungen und zwei Erden. Beide Erden befinden sich an der gleichen Seite des Kabels. Untersuchungen [35] haben gezeigt, daß der Effekt der Signalverbreiterung (RC des Kabels) größer wird, je weiter eine Signalader von der Erde entfernt ist. Werden wenige Adern benutzt, verschwindet der Effekt. Es wäre sinnvoll, jeder Signalader eine Erde zuzuordnen, um diesen Effekt zu vermeiden, wie zum Beispiel die Untersuchungen der Testmuster EVEN und ODD zeigen. Andererseits wird es niemals diese Bedingungen in einer echten Datennahme so geben, da der Fall, daß nahezu alle Pads einer Spalte gemeinsam einen Treffer anzeigen, in höchstem Maße unwahrscheinlich ist (siehe auch Abbildung 5.8).

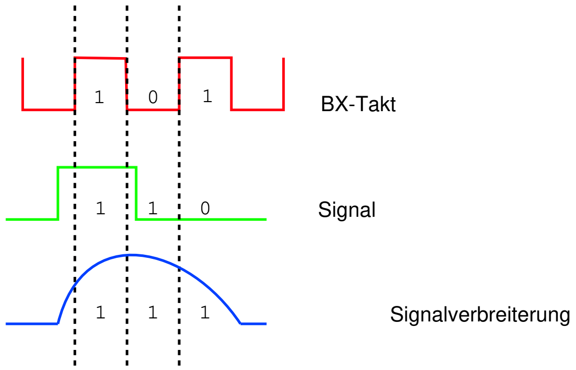


Abbildung 5.8: Durch die Signalverbreiterung auf den Flachbandkabeln werden Signale von der Elektronik beim nächsten BX-Takt noch als gesetzt interpretiert.

5.6 Analyse der gefundenen Koinzidenzen

Um zu untersuchen, ob die Koinzidenzen von den PCUs richtig verarbeitet werden, dürfen die defekten POLs nicht mit einbezogen werden. Insgesamt sind sieben Spalten in MU3 und MU4 so stabil, das heißt während der Datennahme lief der MU3-POL und zwei der zugehörigen MU4-POLs, daß die Koinzidenzbildung untersucht werden kann.

Nach der Anwendung der Auswahlregeln „2 aus 4“ und „5 aus 8“, wird das ALL-Testmuster, wie in Abbildung 5.9 dargestellt, in die Test-FIFOs geschrie-

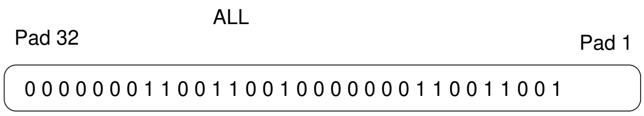


Abbildung 5.9: Idealbild des Testmusters ALL nach der Berechnung der Koinzidenzen. Die Padnummer einer Spalte entspricht der Koinzidenzadresse, welche gefunden wurde. Die Auswahlregeln „2 aus 4“ und „5 aus 8“ führen zu dem prägnanten Muster. Bis einschließlich Pad 16 sind die Daten des ersten Zyklus dargestellt, ab Pad 17 die des zweiten Zyklus.

ben. Hier bezeichnen die Stellen des Musters nicht wie vorher das Bit in dem Datenwort, sondern direkt die gefundene Koinzidenzadresse. Da die Zuordnung zu den Spalten im Myondetektor über den POL beschrieben wird, reicht zur eindeutigen räumlichen Identifizierung die Nummer des Pads in MU3 aus, für welches die Koinzidenz gefunden wurde. Aufgrund der ausgefallenen POLs ist eine Untersuchung des Treffermusters in MU4 nicht sinnvoll. Stattdessen wird die Richtigkeit der Koinzidenzadressen überprüft. Die FIFOs speichern jeweils 4096 Koinzidenzadressen. Somit lassen sich dort 409 mal die aus den Testdaten produzierten 10 Koinzidenzadressen pro BX-Nummer ablegen. Zu einer BX-

Nummer werden nur 6 Koinzidenzadressen gespeichert. Die Erwartung, wie oft man eine bestimmte Koinzidenzadresse findet, muß also auf die Bedingungen des Speicherplatzes angepaßt werden. Abbildung 5.10 stellt die gefundenen Ko-

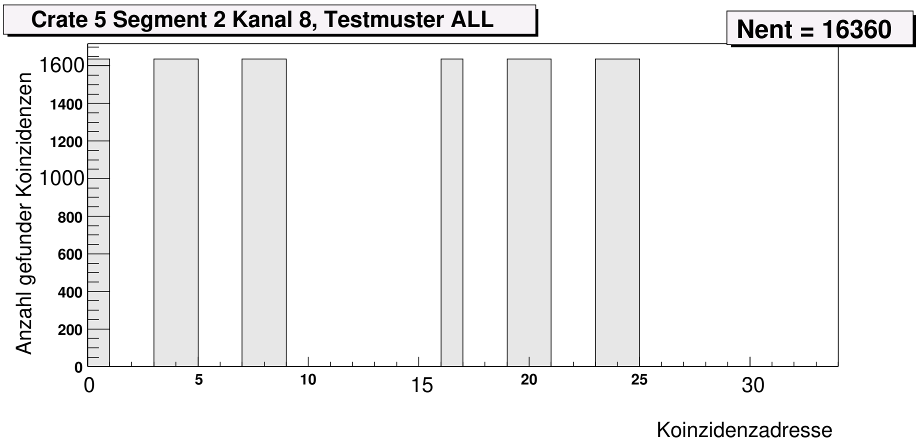
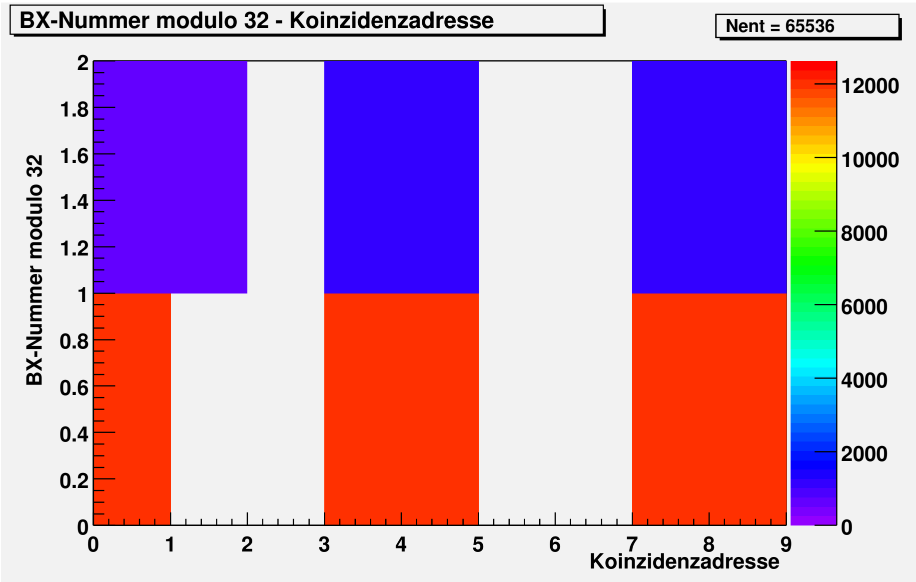


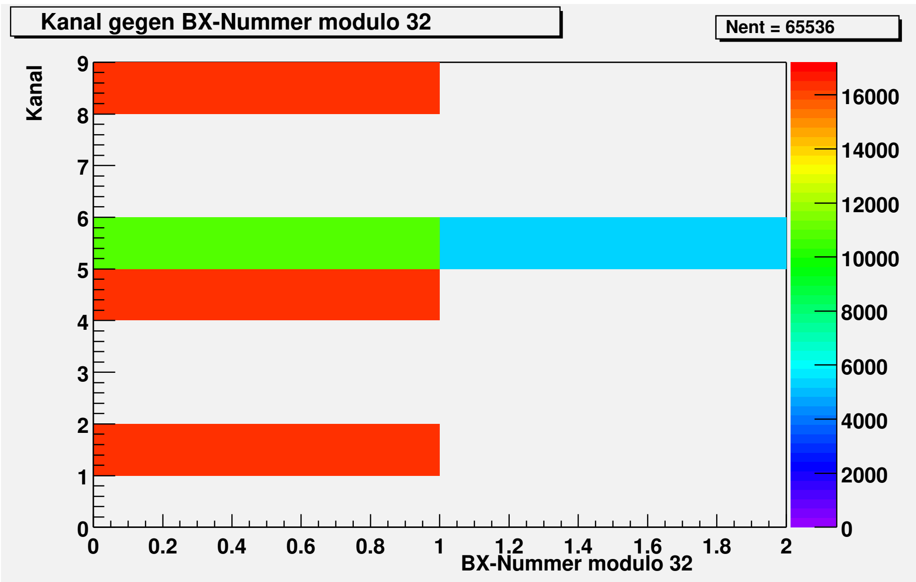
Abbildung 5.10: Die in Spalte 83 gefundenen Koinzidenzen dargestellt gegen die Koinzidenzadresse, die identisch ist zu der Nummer des Pads in der Spalte. Der dargestellte Test-FIFO wurde viermal ausgelesen. Die Anzahl der Einträge in einem Balken des Histograms beträgt, wenn der FIFO N_{Auslese} mal ausgelesen wurde: $N_{\mathrm{bin}} = N_{\mathrm{Auslesen}} \cdot (4096 - 6)/10$. Für den hier gezeigten Fall von vier Auslesen sieht man in jeder Koinzidenzadresse, in der man Einträge erwartet, die richtige Anzahl von 1636 Einträgen.

inzidenzen in Spalte 83 dar. Das Auslaufen (Kapitel 5.5) hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Anzahl der Koinzidenzen. Hat das Auslaufen des Signals sowohl in den MU3-Daten als auch in einem dazugehörenden MU4-POL stattgefunden, oder ist einer der MU4-POLs defekt, so werden Koinzidenzen zur BX-Nummer Eins gefunden. Diese nehmen Platz im FIFO in Anspruch und mindern so die Anzahl der gesuchten Koinzidenzen. Dies trat zum Beispiel in Crate 5 Segment 2 Kanal 5 auf. Trägt man in Crate 5 den Wert $[BX \bmod 32]$ gegen die gefundene Koinzidenzadresse auf (Abbildung 5.11 a)), so erkennt man, daß für die Koinzidenzadresse Null weniger Einträge zu $[BX \bmod 32 = 0]$ bestehen als man erwartet, dafür aber für $[BX \bmod 32 = 1]$ Einträge vorhanden sind. Abbildung 5.11 b) zeigt, daß die Beiträge zum Auslaufen alle aus dem Kanal 5 stammen. Wie man in Abbildung 5.12 sieht, verteilen sich die Koinzidenzen so, daß sowohl in Crate 4 als auch in Crate 5 etwa 89% der Koinzidenzen in BX-Nummer Null und ungefähr 0,1% in BX-Nummer Eins zu finden sind.

Die Datei für Crate 5 ist nicht vollständig. Nach der 4. von geplanten 60 Auslesen der FIFOs endet die Datei mitten in der 5. Auslese. Dadurch wird die Anzahl der zu untersuchenden Koinzidenzen reduziert. Beschränkt man die Untersuchung



(a) BX-Nummer - Koinzidenzadresse



(b) Kanal - BX-Nummer

Abbildung 5.11: PCU-FIFO: a) BX-Nummer mod 32 gegen die Koinzidenzadresse am Beispiel des Segments 2 in Crate 5. Die Einträge in der oberen Zeile dürften nicht vorhanden sein. b) Kanalnummer gegen BX-Nummer. Die Darstellung zeigt, daß nur der Kanal 5 zum Auslaufen in den Koinzidenzen beiträgt.

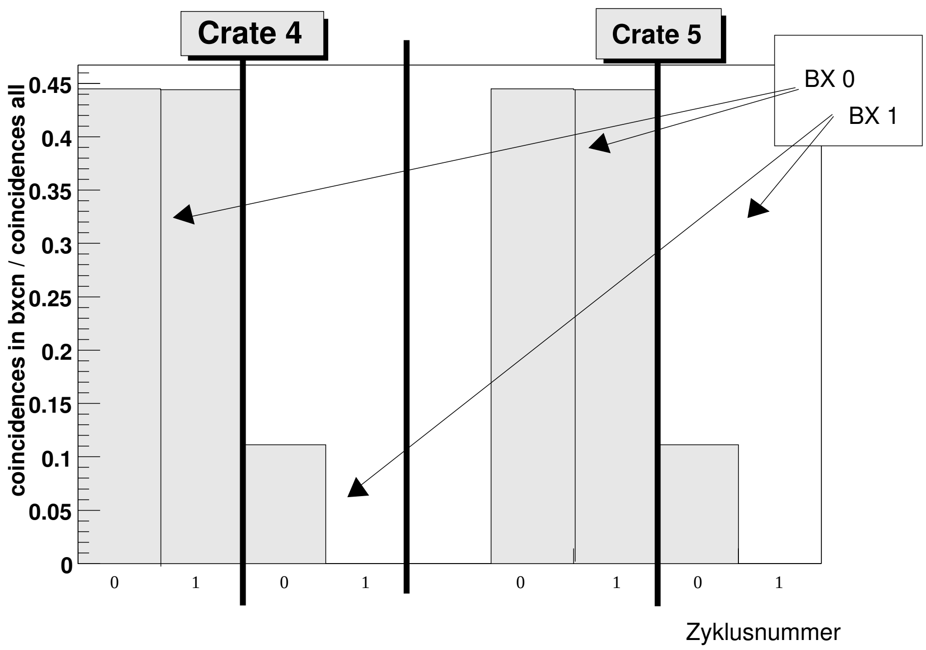


Abbildung 5.12: Verhältnis der Anzahl der Koinzidenzen in den Bunchcrossing-Nummern 0 und 1, jeweils unterteilt in die Zyklen 0 jeweils links in einem BX und 1 auf der rechten Seite der BX. Das Auslaufen in die nächste BX-Nummer findet nur im ersten Zyklus statt. Von dem Schwund betroffen sind beide Zyklen in $[BX = 0]$, da dieser durch die beschränkte Tiefe des FIFO verursacht wird.

auf die Kanäle, bei denen nur wenige Koinzidenzen verlorengegangen sind und nimmt die Kanäle heraus, die sich in der Voruntersuchung als instabil erwiesen, so findet man in allen Segmenten in beiden Crates $\approx 100\%$ der Koinzidenzen wieder, die aufgrund des Testmuster erzeugt werden.

5.7 Zusammenfassung und Aussicht

Untersuchungen [35] haben ergeben, daß das Auslaufen von Daten nicht geschieht, wenn weniger als 3/4 der Bits gesetzt sind. Vergleiche mit Detektordaten [36] zeigen, daß die Trefferrate pro Spalte nicht hoch genug ist, um die Funktionalität des Myon-Pretriggers zu beinträchtigen.

Somit kann festgestellt werden, daß die beiden Komponenten PLB und PCU, auch im Detektor eingebunden, den Designerwartungen entsprechen. Die geringe Abweichung ($< 1\%$) in den gefundenen Koinzidenzen, wird wahrscheinlich durch nicht zur Kenntnis genommene Schwankungen in der Stabilität der POLs verursacht. Bei der Auslese der Test-FIFOs auf der PCU wurde die Stabilität des POLs nicht mehr überprüft. Daher kann ein ausgefallener Link das Ergebnis verfälschen.

Die Untersuchungen geben wichtige Hinweise für die Inbetriebnahme des Myon-Pretriggers und spätere Tests der installierten Komponenten des Myon-Pretriggers. Es konnten Fehler im Aufbau identifiziert und behoben werden, sowie defekte Kabel erkannt und ausgetauscht werden.

Kapitel 6

Die geometrische Akzeptanz des Myon-Pretriggers

6.1 Untersuchung des Zerfalls $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

Das Myon-Pretrigger-System befand sich zum Zeitpunkt dieser Untersuchung noch im Aufbau. Daher war es nötig, eine Entscheidungsmöglichkeit zu haben, welche Bereiche des Myondetektors zuerst von dem Myon-Pretrigger-System abgedeckt werden sollten, um eine möglichst hohe geometrische Akzeptanz für Myonen aus dem J/ψ-Zerfall zu erreichen.

Unter der geometrischen Akzeptanz g_{acc} versteht man das Verhältnis der Anzahl n_{geo} der zu untersuchenden Teilchen, deren Spuren durch die für die Rekonstruktion benötigten Komponenten des Detektors laufen, zur Anzahl n_{all} der Gesamtheit der zu untersuchenden Teilchen,

$$g_{\mathrm{acc}} = \frac{n_{\mathrm{geo}}}{n_{\mathrm{all}}}. \tag{6.1}$$

Von einer Spur, die in die Anzahl n_{geo} einfließt, wird in jeder detektierenden Detektorkomponente eine Mindestanzahl an MIMPs (Monte-Carlo-Impact-Points) verlangt. Die Anzahl der MIMPs ist abhängig von der Konstruktion der Detektorkomponente.

6.1.1 Erzeugung und Beschreibung des Datensatzes

Zur Bestimmung der geometrischen Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems wird ein Monte-Carlo-Datensatz, bestehend aus 1001 Ereignissen der direkten Produktion von J/ψ-Mesonen und des anschließenden Zerfalls in zwei Myonen untersucht. Zur Erzeugung wurde die ARTE-Version 02-08-r2 [37] mit der Geometrie 0.0707 [38] verwendet. Die Daten werden nicht rekonstruiert, da zu einer Bestimmung der geometrischen Akzeptanz eines Detektors im allgemeinen nur die Monte-Carlo-Wahrheit benötigt wird.

6.1.2 Beschreibung der Messung

Für die Untersuchung werden verschiedene Konfigurationen des Myon-Pretrigger-Systems benutzt. Für jede der 132 Spalten in der Superlage MU3 ist ein MU3-POL, für jede Spalte in MU4 ein MU4-POL auf den PCUs verantwortlich. Im Februar 2000 waren die PCUs folgendermaßen über die Geometrie des Myondetektors verteilt: In Crate 4 wurden die Spalten 75-90, in Crate 5 die Spalten 91-94 und in Crate 6 die Spalten 95-102 verarbeitet. Um zu bestimmen, wie der weitere Ausbau des Myon-Pretriggers aussehen muß, um die maximale geometrische Akzeptanz zum Nachweis von Zerfällen $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ zu erreichen, wird die Februarkonfiguration jeweils erweitert. Untersucht werden folgende Konfigurationen des Myon-Pretriggers:

1. Februarkonfiguration: Die Spalten 75-102 werden von den Modulen des Myon-Pretriggers abgedeckt.

2. Abdeckung der Spalten 75 bis 126. Alle Spalten befinden sich in der unteren Hälfte des Myondetektors.

3. Die zu der Abdeckung hinzugekommene Spalten 29-52 und 75-126 befinden sich in der oberen Hälfte des Myondetektors, um das Strahlrohr herum.

4. Alle Spalten des Padsystems sind in den Myon-Pretrigger integriert.

Es wird in jedem Schritt die bis dahin definierte Konfiguration erweitert. Abbildung 6.1 veranschaulicht die jeweilige Abdeckung des Myondetektors durch das Myon-Pretrigger-System.

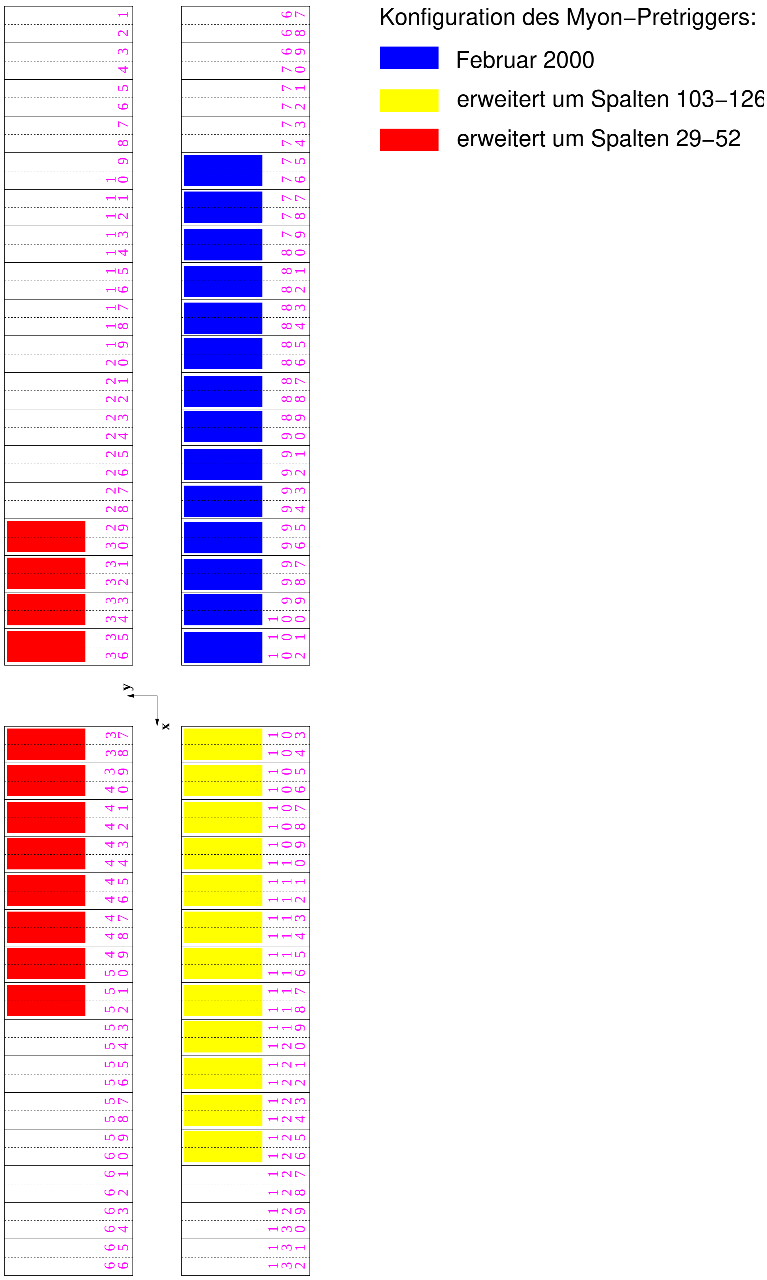


Abbildung 6.1: Abdeckung des Myondetektors in den Ebenen MU3 und MU4 durch den Myon-Pretrigger Ende Februar 2000 (blau), und der Erweiterungen um die Spalten 103-126 (gelb) und 29-52 (rot). Jedes Feld entspricht einer Spalte des Myondetektor. Die Numerierung der Spalten entspricht der Kanalnumerierung auf den PCUs [32]. Die Strahlröhre verläuft bei Spalte 99. Die Aufteilung spiegelt die Unterteilung in eine obere und eine untere Detektorhälfte wider.

6.1.3 Ergebnisse der Untersuchung

Die Entscheidung, ob eine Monte-Carlo-Spur innerhalb des Detektors liegt oder nicht, wird aufgrund der Anzahl der MIMPs im Padsystem des Myondetektors getroffen. Es wird gefordert, daß Myonen aus dem J/ψ-Zerfall MIMPs in den Pads der Myondetektorlage MU3 und MIMPs in den Pads der Myondetektorlage MU4 haben. Hat eine Spur dieses Kriterium erfüllt, wird überprüft, ob die Spur innerhalb der gewählten Konfiguration liegt. In Abbildung 6.2 ist dargestellt, wie viele Myonspuren aus dem Zerfall MIMPs in dem Myondetektor in der gewählten Konfiguration haben.

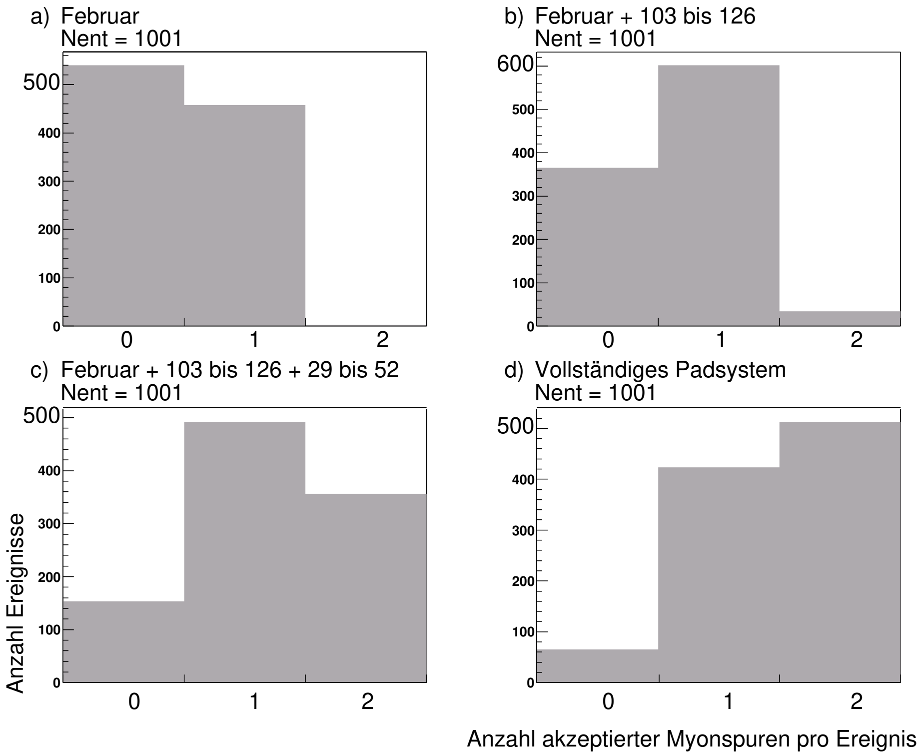


Abbildung 6.2: Anzahl der Ereignisse gegen die Anzahl gefundener Myonspuren pro Ereignis für die Konfigurationen a) Februar, b) Spalten 75-126, c) Spalten 29-52 und 75-126, d) das vollständige Padsystem.

In dem vollständig bestückten Padsystem wurden 936 Ereignisse gefunden, in denen mindestens ein Myon im Padsystem gesehen wird. Zwei Myonen zu einem Ereignis wurden 513 mal gesehen. Im Vergleich dazu wurden in der Februarkonfiguration 3, in der ersten Erweiterung 34, und in der zweiten Erweiterung 356 Ereignisse gefunden, in denen zwei Myonen im Padsystem gesehen wurden.

Obwohl die Anzahl detektierter Myonen bei der ersten Erweiterung der Konfiguration angewachsen ist, von 49,3% auf 67,9% der insgesamt 936 Myonen die im Padsystem akzeptiert wurden, ist der Zuwachs an Ereignissen, in denen beide Myonen gefunden wurden, gering. Von den 513 Ereignissen, in denen beide Myonen des J/ψ im Padsystem akzeptiert wurden, wurden im ersten Fall 0,6 % gefunden, im zweiten Fall 6,6%. Mit dem Ausbau des Systems um die Strahlröhre herum wuchs die Akzeptanz auf 69,4% der im gesamten Padsystem akzeptierten Paare.

Die Untersuchung führt zu dem Resultat, daß, gerade in Hinsicht auf die anstehende Datennahme mit dem Myon-Pretrigger, die vorhandenen Module des Pretriggers in dem untersuchten Bereich in der Nähe des Strahlrohrs zu integrieren sind.

6.1.4 Geometrische Akzeptanz im April

Bis April 2000 sind 76% des Myon-Pretrigger-System in den Detektor integriert worden. In diesem System sind die Spalten 13-60 und 75-126 durch den Myon-Pretrigger abgedeckt [39].

Das System befand sich in einer noch instabilen Phase, in der es des öfteren zu Ausfällen von PCU-Kanälen durch defekte MU3-POLs, aber auch zu viele defekte MU4-POLs bei funktionierendem MU3-POL, kam [40]. In dieser Untersuchung wird geprüft, welchen Einfluß die Ausfälle auf die geometrische Akzeptanz des Systems haben. Zu diesem Zeitpunkt stand nicht das gesamte integrierte System für die Datennahme zur Verfügung, 15 PCU-Kanäle waren nicht verfügbar. Die geometrische Abdeckung des Myondetektors durch Komponenten des Myon-Pretriggers entnimmt man Abbildung 6.3.

Die Messungen wurden an demselben Monte-Carlo-Datensatz anhand von 1000 Ereignissen vorgenommen, wie auch schon die vorherigen Untersuchungen. Abbildung 6.4 zeigt die Anzahl der akzeptierten Myonen in der Konfiguration von April.

In der Konfiguration, in der der gesamte installierte Myon-Pretrigger betrachtet wird, werden 482 Ereignisse gefunden, in denen nur eine Myonspur durch das Padsystem geht, und es werden 154 Ereignisse gefunden, in denen zwei Myonspuren durch das Padsystem gehen. Schließt man die ausgefallenen Kanäle von der Akzeptanzbetrachtung aus, findet man 478 Ereignisse, in denen nur eine Myonspur durch das Padsystem geht, und 399 Ereignisse, in denen zwei Myonspuren durch das Padsystem gehen. Durch die ausgefallenen Spalten verliert das System um 61,4% an geometrischer Akzeptanz, um beide Myonspuren des J/ψ-Zerfalls innerhalb des Padsystems des Myondetektors zu finden.

Abbildung 6.3: Geometrische Abdeckung der Konfiguration im April 2000 (blau) wie geplant und wie sie sich durch ausgefallene Kanäle (hellblau) ergab.

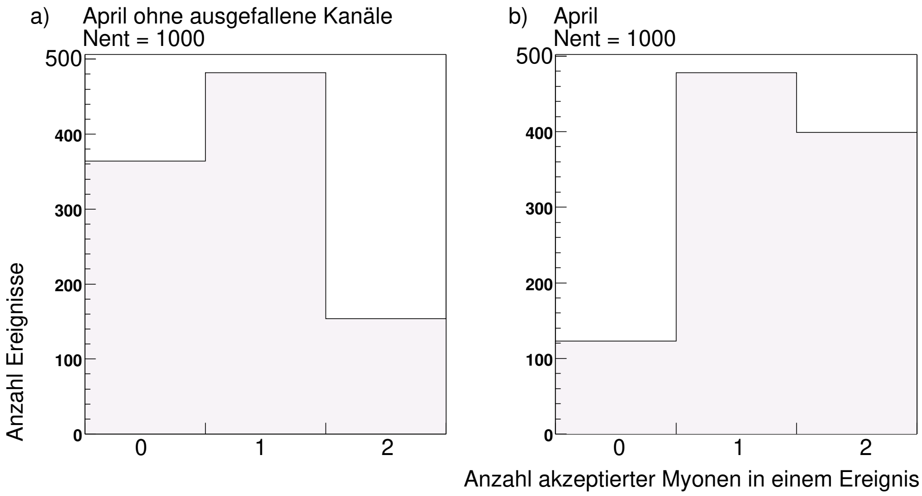


Abbildung 6.4: Akzeptierte Myonen pro Ereignis in der Konfiguration von April. Auf der Abszisse sind die für ein Ereignis gefunden Myonen abgetragen. Das Bild links zeigt die Akzeptanz für die Konfiguration, an der gemessen wurde, das Bild rechts zeigt die Akzeptanz der Konfiguration im April wie sie bei voll funktionierendem System gewesen wäre.

Die Untersuchung zeigt, daß in dieser Phase des Aufbaus die Akzeptanz des Pretriggers starken Schwankungen unterlag. Obwohl ein Großteil des Systems installiert war, konnten einige nicht für die Koinzidenzsuche geeignete Kanäle, durch ihre ausgezeichnete geometrische Lage, die Funktion des Pretriggers stark beeinträchtigen.

6.2 Geometrische Akzeptanz mit Berücksichtigung des Myonpixelsystem

Die bisherigen Untersuchungen bezogen sich allein auf das Padsystem des Myondetektors. Die Akzeptanz des Pixelsystems für Myonen aus dem Zerfall von $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ist Gegenstand der nächsten Untersuchung. Die Integration des Pixelsystems in den Myon-Pretrigger wäre mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden gewesen. So hätte zusätzliche Arbeit in die Installation und Testen der Hardware, die Integration des Pixelsystems in die Online-Software und die Schaffung von Analyseprogrammen fließen müssen. Eine klare Verschiebung der Prioritäten in Richtung des Pixelsystems hätte die Komplettierung des Padsystems stark behindert. Da zum gleichen Zeitpunkt, zu dem die Integration vorangetrieben werden sollte, die Datennahme mit dem Myon-Pretrigger-System lief, sollte auf Basis der geometrischen Akzeptanz für Myonen aus dem Zerfall

$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ entschieden werden, inwieweit die Datennahme von der Integration des Pixelsystems in den Myon-Pretrigger profitieren würde, solange auch der ITR nicht in der Trigger- und Rekonstruktionskette verwendet wird.

Die Monte-Carlo-Daten des Zerfalls $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ werden mit der ARTE-Version 03-06-r6 erzeugt. Für die Analyse wird die Geometrie-Version 0.0811 benutzt. Die Forderung, wann ein Zerfallsvertex als geometrisch akzeptiert gilt, wird folgendermaßen formuliert:

1. Beide akzeptierten Myonen stammen aus dem Zerfall des J/ψ.

2. Beide Myonspuren haben MIMPs sowohl in der Myondetektorlage MU3 als auch in der Lage MU4.

3. Eine Myonspur wird in beiden Lagen im Padsystem nachgewiesen, oder sie wird im Pixelsystem nachgewiesen. Spuren, die in der einen Lage durch das Padsystem gehen, in der anderen Lage aber durch das Pixelsystem, werden nicht als akzeptiert gewertet.

4. Jede der beiden Spuren besitzt mindestens einen MIMP im OTR, da zur Zeit der Untersuchung der ITR nicht zur Verfügung steht.

Die ausschließliche Bedingung, daß eine Spur nicht durch Pixel- und Padsystem laufen soll, begründet sich dadurch, daß ermittelt werden soll, wieviel Akzeptanz der Myon-Pretrigger verliert, wenn das Pixelsystem nicht zur Verfügung steht.

6.2.1 Auswertung der Daten

Die Ergebnisse der Analyse werden in den Tabellen 6.1 und 6.2 angegeben. Insgesamt werden 1001 Zerfälle und 2002 resultierende Myonen untersucht.

Die Akzeptanz für einzelne Myonen liegt bei 87%. Die Forderung, daß zwei Myonen aus einem Ereignis stammen müssen, senkt die Akzeptanz auf 71%. Fordert man noch, daß die Myonspur durch den OTR geht, sinkt die Akzeptanz auf 36,9%. Von diesen 369 Ereignissen sind 93,2% nur mit dem Padsystem des Myondetektors detektierbar. Nimmt man das Pixelsystem dazu, so erhöht sich die Akzeptanz bezogen auf alle in OTR und Myondetektor nachgewiesenen Spuren um 6,8%, was einer Erhöhung der geometrischen Akzeptanz für Myonpaare von 34,4% auf 36,9% entspricht. Die Akzeptanz für die beiden Myonen aus dem J/ψ-Zerfall wäre durch die Integration des Pixelsystems nur leicht gesteigert. Dies rechtfertigt die Entscheidung, dem Padsystem und der Datennahme mit diesem höchste Priorität einzuräumen.

Tabelle 6.1: Analyse der beiden Myonspuren eines Ereignisses, angegeben ist jeweils die Anzahl der Ereignisse. Es sind die Durchgänge durch die relevanten Detektorkomponenten angegeben. Die relativen Angaben für das Padsystem und das Pixelsystem sind auf der Grundlage der im Myondetektor akzeptierten Ereignisse angegeben. Die Myonen im Überlapp zwischen Pad- und Pixelsystem werden in beiden Systemen gezählt und müssen in die Summe aller Teilchen im Myondetektor negativ einfließen.

Beide Myonen im OTR	660±26	(66,0±2,6)%
Beide Myonen im Myondetektor	369±19	(36,9±1,9)%
Beide Myonen im Padsystem	344±18	(93,2±6,8)%
Beide Myonen im Pixelsystem	1±1	(0,3±0,3)%
Ein Myon im Padsystem, das andere im Pixelsystem	29±5	(7,9±1,4)%
Ein Myon im Überlapp zwischen Pad- und Pixelsystem	5±2	(1,3±0,6)%
Beide Myonen im Myondetektor aber nicht im OTR	341±18	(34,0±1,8)%

Tabelle 6.2: Verteilung der einzelnen Myonen über den Myondetektor. Die relativen Angaben für das Padsystem und das Pixelsystem sind auf der Grundlage der im Myondetektor akzeptierten Ereignisse angegeben.

Myonen im OTR und im Myondetektor	1740±41	(87,0±2,0)%
Myonen im Padsystem	740±27	(37,0±1,8)%
Myonen im Pixelsystem	32±6	(1,6±0,3)%
Myonen im Myondetektor aber nicht im OTR	968±31	(48,4±1,5%

6.3 Untersuchung der geometrischen Akzeptanz für verschiedene Geometriebeschreibungen in ARTE

Die Umgebung ARTE mit all ihren zugehörigen Modulen befindet sich in einem stetigen Fluß der Entwicklung. Für die Untersuchung der geometrischen Akzeptanz ist besonders die Entwicklung des Moduls GEO [41] wichtig. In diesem Modul werden die Geometriebeschreibungen zusammengefaßt. Die Geometriebeschreibung, basierend auf GEANT, ist modular aufgebaut. Die Schachtelung der einzelnen Module wird durch Einträge in Textdateien realisiert.

Die Version der Geometrie wird durch den Namen der in dieser Hierarchie äußersten Datei beschrieben. In dieser Datei werden dann die Namen der Dateien genannt, in welchen die Geometrien für die Subdetektoren stehen. In den nächsten Dateien werden diese dann genauer beschrieben. Auf diese Art ist es möglich, die Geometrie innerhalb eines der Detektoren zu ändern, ohne die übrigen Komponenten ändern zu müssen.

Untersuchungen [42], haben einen Hinweis darauf gezeigt, daß die geometrische Akzeptanz für Myonen aus dem J/ψ-Zerfall eine starke Abhängigkeit von der verwendeten Geometriebeschreibung des Gesamtdetektors zeigt. Um dies genauer zu untersuchen, wird die vorherige Untersuchung zusätzlich auf ältere Geometriebeschreibungen des HERA-B-Detektors ausgeweitet. Es wurden jeweils 1001 Ereignisse analysiert.

6.3.1 Beschreibung der verwendeten Geometrien

Um die Abhängigkeit der geometrischen Akzeptanz von der Geometriebeschreibung zu untersuchen, werden folgende Geometriebeschreibungen verwendet, die jeweils die gleiche Akzeptanzanalyse durchlaufen:

0.0708 ist die älteste untersuchte Geometriebeschreibung. Sie beschreibt den Detektor zum Ende Juni 1999. Alle für die Akzeptanzstudie relevanten Detektoren sind implementiert.

0.0809 ist eine Konfiguration, die für die Datennahme 2000 geschaffen wurde und stellt das Wissen über die Detektorgeometrie Anfang 2000 dar. Im Vergleich zu der Version 0.0708 hat sich in den betroffenen Detektorkomponenten die Beschreibung des ITR geändert. Die Größe und Position der Superlagen MS10 bis MS15 wurde angepaßt und hat somit Einfluß darauf, wie sich die Akzeptanz des OTR ändert.

0.0811 Diese Geometrie beschreibt den Detektor im April 2000. Es finden sich viele Änderungen in Größe und Position der Superlagen des ITR und OTR.

Eine vollständige Beschreibung der jeweiligen Geometrien findet sich unter [38].

6.3.2 Ergebnisse aus der Untersuchung verschiedener Geometrien

Die durchgeführte Untersuchung ist identisch mit der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen. Es sind mit den verschiedenen Geometrien die folgenden Ergebnisse für die Anzahl akzeptierter Vertices ermittelt worden:

Tabelle 6.3: Eigenschaften der Ereignisse mit zwei akzeptierten Myonen. Die relativen Angaben für Pad- und Pixelsystem beziehen sich auf die im Myondetektor gefunden Ereignisse.

	Version 0.0708		Version 0.0809		Version 0.0811	
Beide Spuren im OTR	615±25	(61,5±2,5)%	727±27	(72,7±2,7)%	660±26	(66,0±2,6)%
Beide Myonen im Myondetektor	303±17	(30,3±3,4)%	408±20	(40,8±3,5)%	369±19	(36,9±1,9)%
Beide Spuren im Padsystem	302±17	(99,6±8)%	383±20	(93,8±7)%	344±18	(93,2±6,8)%
Beide Spuren im Pixelsystem	0±0	(0±0)%	0±0	(0±0)%	1±1	(0,3±0,3)%
Ein Myon im Padsystem, ein Myon im Pixelsystem	3±2	(0,9±0,6)%	32±6	(7,8±1,5)%	29±5	(7,9±1,4)%
Spuren gehen nicht durch den OTR	395±20	39,5±2,0%	273±17	(27,3±1,7)%	341±18	(34,1±1,8)%
Akzeptiert im Myondetektor (ITR+OTR)	698±26	(69,8±2,6)%	681±26	(68,1±2,6)%	710±26	(71.0±2,6)%

Im Rahmen der statistischen Fehler ändert sich die geometrische Akzeptanz für den vollständigen Myondetektor nicht. Erst wenn man Spuren nach ihrem Durchgang durch den OTR untersucht, zeigt sich eine Änderung der Akzeptanz. Die Akzeptanz für Ereignisse, in denen beide Myonspuren durch den OTR gegangen sind, steigt um 10,5% im Vergleich der Version 0.0708 zu 0.0809. Die Änderung der Positionen und Größe der ITR-Superlagen ist dafür verantwortlich, daß in Geometrie 0.0809 mehr der gesuchten Spuren durch den OTR laufen als noch in Geometrie 0.0708. Auch der Vergleich mit der ermittelten Akzeptanz für die Geometrie 0.0811, (hier sind von 1001 Vertices 710 im Myondetektor gefunden worden) zeigt eine Änderung bei Betrachtung der Myonspuren, die durch den OTR laufen. Verzichtet man auf das Pixelsystem und den ITR, und berücksichtigt für die Akzeptanzstudie nur Spuren im Padsystem und im OTR, dann ergibt sich eine signifikante Änderung der Akzeptanz. Die geometrische Akzeptanz für Padsystem und OTR ändert sich von 30,2% mit der Geometrie 0.0708 über 38,3% mit der Geometrie 0.0809 zu 34,4% mit der Geometrie 0.0811. Der Einfluß der Güte der Geometriebeschreibung kann also nicht vernachlässigt werden.

Weitere Einflüsse auf die Untersuchung haben die insensitiven Regionen der Detektoren. In die Beschreibung der Geometrie gehen Bereiche ein, die keine Signale liefern, so zum Beispiel Tragekonstruktionen der Detektoren. Aufgrund des größeren Aufwands ist dies nicht mit in die Betrachtung eingeflossen.

Die Untersuchung widerlegt das in der vorherigen Untersuchung [42] gefundene Ergebnis.

Kapitel 7

Monte-Carlo-Studien zum Zerfall $\mathrm{B}^0 \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^{*^0}$

7.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Monte-Carlo-Untersuchungen ist die Erstellung einer Analysekette für den seltenen Zerfall $\mathrm{B}^0 \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^{*^0} \to \mu^+\mu^-\pi^-\mathrm{K}^+$. Hierfür werden zunächst in einer Monte-Carlo-Simulation generierte Zerfälle als Ereignisansichten im HERA-B-Detektor betrachtet, um einen Überblick darüber zu bekommen, welche Möglichkeiten sich bieten. Es werden Schnitte auf die Kinematik dieses speziellen Zerfalls durchgeführt, um ihn vom kombinatorischen Untergrund zu trennen. Außerdem ist es notwendig, ein Kriterium zu entwickeln, um den durch den konkurrierenden Zerfall $\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K}^{*^0}$ erzeugten Untergrund zu unterdrücken. Der Untergrundzerfall ist etwa 1000 mal häufiger als der hier gesuchte seltene Zerfall.

7.2 Beschreibung des Zerfalls und seiner Besonderheiten

Die bisher unbeobachteten seltenen Zerfälle $\mathrm{B} \to \mathrm{X_s}\,\ell^+\ell^-$ sind FCNC-Prozesse (flavour changing neutral current), die im Standardmodell der Elementarteilchenphysik auf Born-Niveau verboten sind. Sie werden vom theoretischen Standpunkt her ausführlich in [43]-[45] diskutiert, und man erwartet von diese Zerfällen brauchbare Tests des Standardmodell und seiner Erweiterungen. Der dominante Mechanismus für diese Zerfälle wird durch einen Pinguin-Graphen mit einem intermediären Top-Quark und einer W-Boson-Schleife beschrieben. Die Zerfälle zeigen eine deutliche experimentell zu erfassende Signatur (Abbildung 7.2), durch die es möglich sein sollte, den Untergrund effektiv zu unterdrücken. Die vorhergesagte Zerfallsbreite von $(2,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$ für den Zerfall $B^0 \to \mu^+\mu^- K^{*^0}$ ist relativ groß gemessen an der Zerfallsbreite aller Zerfälle $B^0 \to \mu^+\mu^- X$ von $(5,7 \pm 1,1) \cdot 10^{-6}$. Eine der zu untersuchenden Observablen ist die invariante Zwei-Myon-Masse des Zerfalls, welche ein Kontinuum zeigt. Sie muß unterschieden werden von der invarianten Masse der Zerfälle, die über $c\bar{c}$-Resonanzen verlaufen. Eine andere wichtige Observable ist die Lepton-Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie A_{FB}, die durch

$$A_{\mathrm{FB}}(\hat{s}) = \frac{\int_0^1 \mathrm{d}\cos\theta \frac{\mathrm{d}^2\mathrm{Br}}{\mathrm{d}\cos\theta \mathrm{d}\hat{s}} - \int_{-1}^0 \mathrm{d}\cos\theta \frac{\mathrm{d}^2\mathrm{Br}}{\mathrm{d}\cos\theta \mathrm{d}\hat{s}}}{\int_0^1 \mathrm{d}\cos\theta \frac{\mathrm{d}^2\mathrm{Br}}{\mathrm{d}\cos\theta \mathrm{d}\hat{s}} + \int_{-1}^0 \mathrm{d}\cos\theta \frac{\mathrm{d}^2\mathrm{Br}}{\mathrm{d}\cos\theta \mathrm{d}\hat{s}}}$$

definiert ist, wobei θ der Winkel zwischen dem Impuls des B_d^0 und dem μ^+ im Schwerpunktssystem der beiden Myonen und $\hat{s} = (p_{\mu^+} + p_{\mu^-})^2/M_B^2$ der skalierte Impulstransfer und M_B die B-Meson-Masse ist (siehe Abbildung 7.1). Eine Messung von $A_{\mathrm{FB}} < 0$ im Bereich kleiner $\hat{s}$ oder eine Verschiebung des Übergangs vom positiven zum negativen Bereich ist ein deutlicher Hinweis für Neue Physik außerhalb des Standardmodells [46].

In Abbildung 7.2 ist ein Beispiel für den Zerfall $B^0 \to \mu^+\mu^- K^{*^0}$ anhand der Ereignisansicht PRISM [48] der ARTE-Umgebung gezeigt. Im oberen Teil der Abbildung ist der gesamte Detektor dargestellt. Links in der Abbildung ist das Drahttarget, auf der rechten Seite ist das Myondetektorsystem (siehe auch Abbildung 2.2) zu sehen. Durch die kurze Lebensdauer des K^*, $\tau_{K^*} \approx 1,3 \cdot 10^{-23}$ s (berechnet aus der Breite des K^*, welche ebenso wie die noch folgenden Massen und Breiten aus [49] stammt), ist der Zerfallsvertex des B^0 ein effektiver Vierfachvertex. Es ist möglich, sowohl die beiden Myonspuren als auch das Kaon und das Pion aus dem Zerfall des K^* auf einen gemeinsamen Vertex zu bringen, wie in der Abbildung 7.2 b) gezeigt wird.

7.3 Beschreibung der Arbeitsumgebung Grover

Mit Grover [50] bietet die ARTE-Umgebung ein Analysewerkzeug zur Suche von primären und sekundären Vertices. Grover ist seit Version 03-07-r8 fester Bestandteil der ARTE-Umgebung. Es handelt sich dabei um eine Sammlung von C++-Klassen zur Beschreibung von Vertices, Teilchenspuren, Targetdrähten,

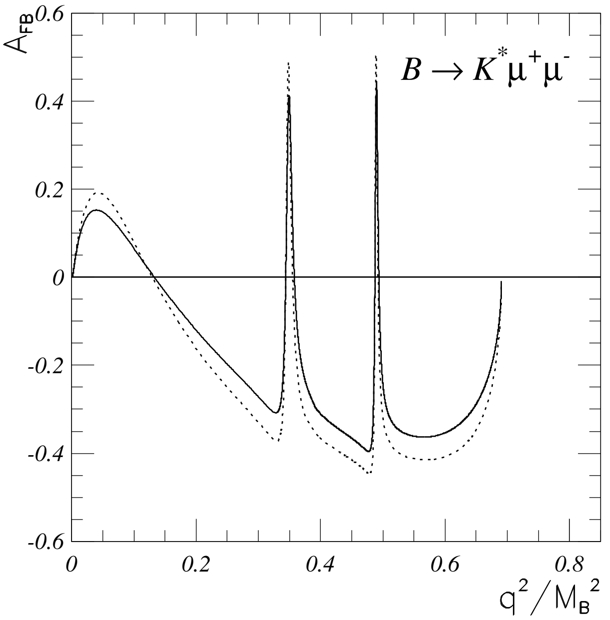
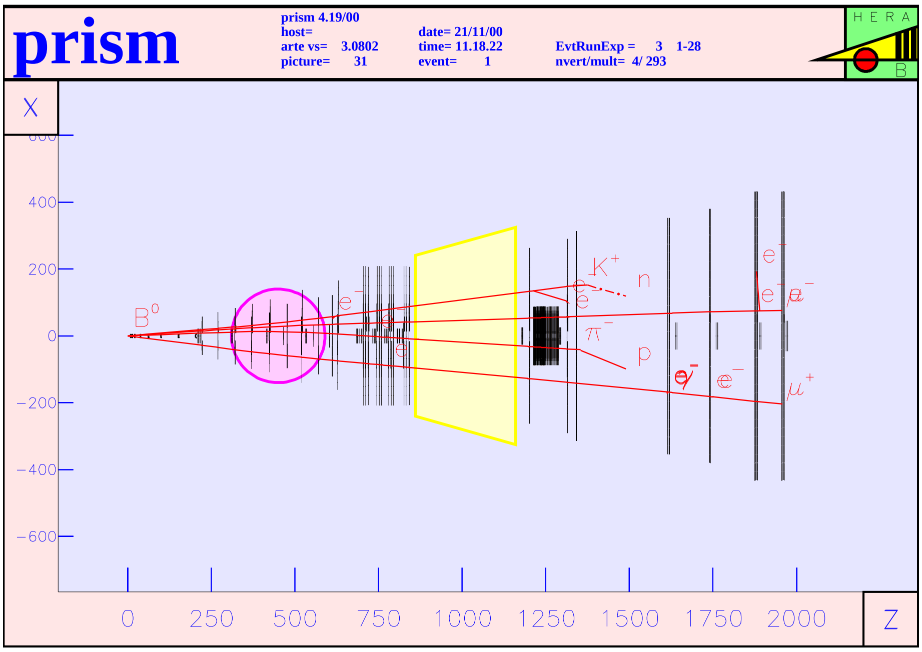
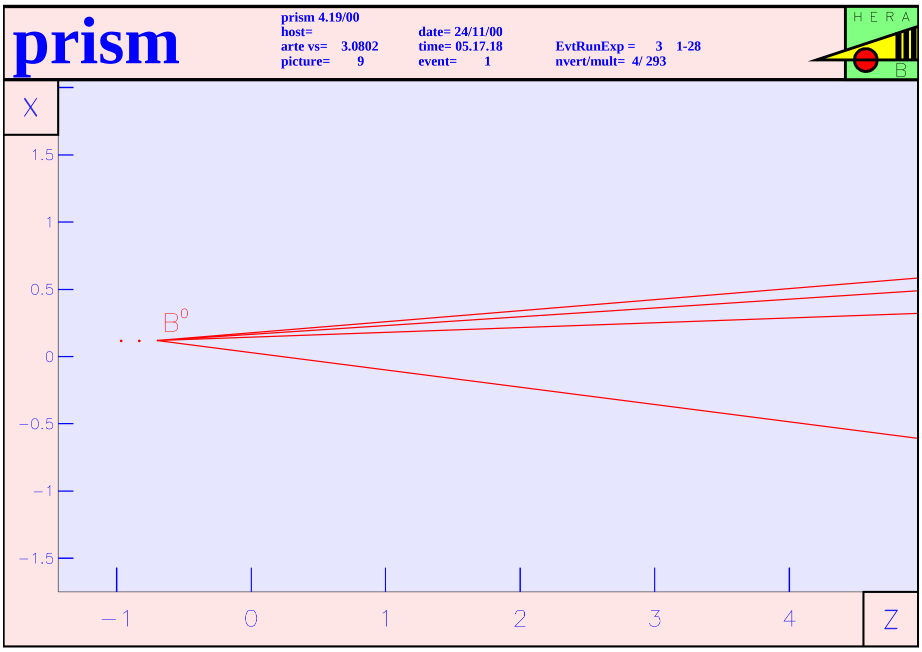


Abbildung 7.1: Vorwärts-Rückwärts-Asymetrie des Zerfalls $B^0 \rightarrow K^{*^0}\mu^+\mu^-$ im Standardmodell als eine Funktion von $\hat{s} = \frac{q^2}{M_B^2}$ mit $q^2 = (p_{\mu^+} + p_{\mu^-})^2$ in verschiedenen Modellen [47].

etc. Die Informationen der ARTE-Tabellen lassen sich so in leichter zu handhabenden Objekten strukturieren. Diese Klassen bieten Funktionen zur Bestimmung von Vertices, unter anderem auch eine Reihe von Abstandsfunktionen, die in der Analysekette intensiv genutzt werden. Die wichtigsten der genutzten Algorithmen werden in den Kapiteln, die sich mit der Parameteranpassung der Vertices beschäftigen, skizziert.



(a) Der Zerfall im Detektor



(b) Vergrößerung in der Umgebung des Zerfallsvertex

Abbildung 7.2: Ereignisansicht der ARTE-Umgebung PRISM. Dargestellt ist der Zerfall $\mathrm{B}^0 \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^{*^0} \to \mu^+\mu^-\pi^-\mathrm{K}^+$. Links in dem Bild ist das Drahttarget, rechts der Myondetektor angeordnet. Zu sehen sind die vier Spuren, die von dem Vertex ausgehen. Das Kaon und Pion werden im elektromagnetischen Kalorimeter absorbiert. Die Elektronen sowie das Proton und das Neutron entstehen aus Wechselwirkungen in der Materie. Die Myonen gelangen beide in den Myondetektor.

7.4 Erzeugung der Daten

Um das Verhalten der Analysekette zu untersuchen, wird zunächst ein Monte-Carlo-Datensatz erzeugt, der nur das zu untersuchende Ereignis enthält. Ebenfalls wird ein Monte-Carlo-Datensatz mit Untergrund-Ereignissen erzeugt, in denen kein Ereignis besonders hervorgehoben ist. Im nächsten Schritt werden die beiden Datensätze durchmischt, so daß ein Datensatz untersucht werden kann, der sowohl das gesuchte Ereignis als auch den störenden Untergrund enthält. Auf die gleiche Weise wird ein Datensatz für den Zerfall $\mathrm{B}^0 \rightarrow \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K}^{*^0}$ mit Untergrund erzeugt. Um die Datenmenge zu reduzieren, wird vor der Rekonstruktion ermittelt, ob das zu rekonstruierende Signalereignis innerhalb der Geometrie des Detektors liegt, und nur wenn es dort akzeptiert wurde, wurde es auch rekonstruiert. Die Akzeptanzbedingung wurde dabei folgendermaßen formuliert:

1. Jede der Spuren, die aus dem Vertex hervorgehen, gilt als akzeptiert, wenn sie mindestens 6 MIMPs im Silizium-Vertex-Detektor, mindestens 10 MIMPs in den Spurkammern und mindestens ein MIMP im RICH hat.

2. Jede Myonspur muß zusätzlich mindestens 4 MIMPs im Myondetektor haben.

3. Alle vier Spuren des Vertex müssen geometrisch akzeptiert sein.

Ist ein Zerfall geometrisch akzeptiert, wurde er mit der Standardrekonstruktion für das Jahr 2000 [51], ergänzt um das ARTE-Modul MuonID [53], rekonstruiert.

Alle Datensätze wurden mit der Geometriebeschreibung 0.0813 erzeugt. Die zu untersuchenden Monte-Carlo-Daten wurden mit der ARTE-Version 03-07-r7 erzeugt. Der Untergrund wurde mit der ARTE-Version 03-07-r5 und die Monte-Carlo-Daten zur Untersuchung des Untergrundes $\mathrm{B}^0 \rightarrow \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K}^{*^0}$ wurden mit der ARTE-Version 03-07-r9 erzeugt. Die Mischung Signal-Untergrund wurde mit der ARTE-Version 03-07-r7 rekonstruiert. Das mittlere Mischungverhältnis beträgt $\frac{1}{2,3}$, was bedeutet, daß die Anzahl der Untergrundereignisse einer Poissonverteilung mit dem Erwartungswert $\lambda = 2,3$ folgt. Das Mischungsverhältnis läßt sich mit dem HERA-BX-Takt $\nu_{\mathrm{HERA}} = 10,4\,\mathrm{MHz}$ und der Kenntnis, daß von 220 Bunches 180 gefüllt sind [16], in die mittlere Wechselwirkungsrate von

$$\frac{180}{220} \cdot \lambda \cdot \nu_{\mathrm{HERA}} = 19,57\,\mathrm{MHz}$$

umrechnen.

7.5 Beschreibung der Schnitte und deren Effizienz

Ob ein Ereignis im Sinne der Monte-Carlo-Wahrheit richtig oder falsch ist, wird anhand der Zuordung der Spuren, die zu dem rekonstruierten Ereignis gehören, zu den Spuren, die von dem Monte-Carlo-Vertex ausgehen, bestimmt. Eine rekonstruierte Spur wird einer Monte-Carlo-Spur zugeordnet, wenn mindestens 70% der zu der Spur gehörenden HITB(Liste der digitalisierten Treffer)-Einträge von den MIMPs dieser einen Monte-Carlo-Spur stammen [52]. Sind alle vier Spuren, die zu einer getesten Kombination gehören, den vier Spuren des Monte-Carlo-Vertex zugeordnet, wird das rekonstruierte Ereignis als richtig rekonstruiert erkannt. Ist die Zuordnung zur Monte-Carlo-Wahrheit nicht möglich, ist die Kombination Bestandteil des Untergrundes. Diese Festlegung des Signals wird in den folgenden Untersuchung des Signals und Untergrunds durchgängig verwendet. Bei der Analyse zur Bestimmung der Myonvertices, bei der jeweils zwei Spuren kombiniert werden, werden nur zwei Spuren berücksichtigt, um das Signal zu identifizieren.

Um die gesuchten Ereignisse vom Untergrund zu trennen, werden Schnitte in geeigneten Parametern gemacht. Der Schnitt soll richtige Spurkombinationen von falschen und nicht gesuchten Untergrundkombinationen trennen. Es ist notwendig, zu erkennen, ob das gesuchte Ereignis sich in einem zu bestimmenden Bereich eines Parameters deutlich von dem Untergrund abhebt. Hierzu muß, bei Anwendungen des Schnitts, die Anzahl der Untergrundkombinationen signifikant mehr abnehmen als die Anzahl der Signalereignisse. Gleichzeitig soll die absolute Zahl der Signalereignisse nur moderat abnehmen.

7.5.1 Schnitt auf die MuonID

Der erste Schritt der Suche ist das Auffinden des Myonvertex. Zunächst werden dafür Myonspurkandidaten bestimmt. Dies läßt sich mit dem Standardrekonstruktionsweg mit Hilfe des ARTE-Moduls MuonID [53] erreichen. Dieses ARTE-Modul ermittelt auf Basis der Einträge in der RTRA-Tabelle eine Likelihood (Wahrscheinlichkeit) dafür, daß es sich bei dem RTRA-Eintrag um ein Myon handelt. Abbildung 7.3 zeigt das Signal- zu Untergrund-Verhältnis der von MuonID ermittelten Likelihood für die Hypothese, daß es sich bei der untersuchten Spur um ein Myon handelt. Aus allen von der ARTE-Standardrekonstruktion gefundenen Spuren werden jeweils zwei zu einem Myonvertexkandidaten kombiniert. Haben beide Myonspurkandidaten eine Myon-Likelihood, die größer ist als der Schnitt, dann überlebt die Kombination den

Schnitt. In der Abbildung erkennt man, daß eine Likelihood größer Null ungefähr die Hälfte des Signals wegnimmt. Obwohl gleichzeitig der Untergrund um drei Größenordnungen sinkt, wird die Bestimmung eines Myonkandidaten auf einem anderen Weg im folgendem beschriebenen Weg durchgeführt, bei dem der Verlust an Signal geringer ist.

7.5.2 Schnitt auf die Anzahl der Treffer im Myonsystem

Zur Ermittlung der Myon-Likelihood wird von MuonID ermittelt, wie viele Treffer eine betrachtete Spur im Myonsystem hat. Somit bietet dieses Modul eine weitere Möglichkeit, Myonspurkandidaten zu bestimmen. In der folgenden Betrachtung wird analog zur Vorgehensweise in Kapitel 7.5.1 das Verhalten des Signals im Vergleich zum Untergrund bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Untersucht werden 1750 Vertices, von denen 1393 in allen vier Spuren Zuordnungen zur Monte-Carlo-Wahrheit zulassen. Mit der Forderung eines einzigen Hits im Myonsystem sinkt das Signal auf 1108 Einträge, und es gibt 65412 Untergrundkombinationen. Bis zu einem Schnitt von zehn Treffer im Myonsystem verläuft die Signalkurve flach, danach nimmt der Verlust an Signal zu. Fordert man zehn Treffer im Myonsystem, gibt es 1090 Signalereignisse und 58645 Untergrundkombinationen. Das Verhältnis Signal zu Untergrund liegt bei $1,858 \cdot 10^{-2}$. Es ist daher eine vernünftige Forderung, 10 Treffer im Myonsystem für den Schnitt zur Bestimmung von Myonspurkandidaten zu verlangen.

7.5.3 Schnitt auf den Impuls des Myons

Mit der in Kapitel 7.5.2 gefundenen Einschränkung für Myonspurkandidaten läßt sich ein geeigneter Schnitt auf den Impuls dieser Kandidaten ermitteln. Die Forderung ist, daß beide Spuren einer Kombination zweier Myonspurkandidaten einen Impuls besitzen müssen, der kleiner ist als der für den Schnitt vorgegebene, damit diese Kombination den Schnitt überlebt. Liegt der Impuls bei ungefähr 25 GeV, zeigt das Signal-Untergrundverhältnis ein Maximum von 0,023. Das Signal hat bei diesem Wert 836 von 1090 Einträgen, der Untergrund 36221 von 58645 Einträgen. Die Anwendung des ermittelten Schnitts in der Analysekette führt allerdings zu dem Schluß, daß dieser Schnitt unwichtig gegenüber anderen ist, die noch untersucht werden. Der Anteil an der Unterdrückung des Gesamtuntergrundes rechtfertigt nicht den Signalverlust. Daher wird dieser Schnitt in der Analysekette auf 150 GeV geöffnet. Dies filtert unsinnig hohe Impulse für die Myonspurkandidaten heraus.

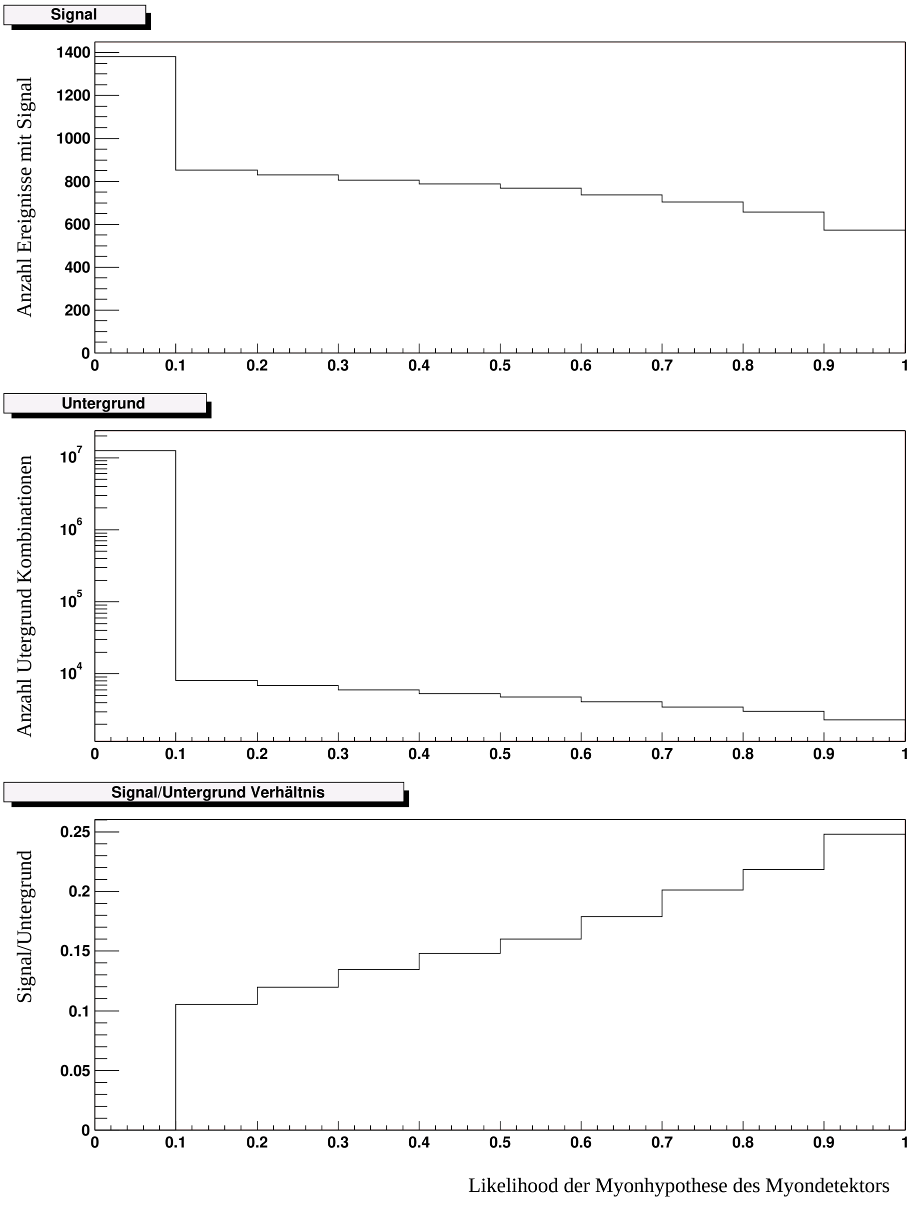


Abbildung 7.3: Signal-Untergrund-Betrachtung der Likelihood für die Myonhypothese durch das ARTE-Modul MuonID. Auf der Abszisse ist die gefundene Likelihood, daß es sich bei der ausgewählten Spur um ein Myon handelt, abgetragen. Im ersten Diagramm ist auf der Ordinate die Anzahl der Events aufgetragen, die nach dem Schnitt immer noch den Referenzvertex beinhaltet haben. Im zweiten Diagramm ist die Anzahl der „überlebenden“ falschen Kombinationen von Spuren aufgetragen. Im dritten Diagramm ist das Verhältnis von Signal- zu Untergrundeinträgen aufgetragen.

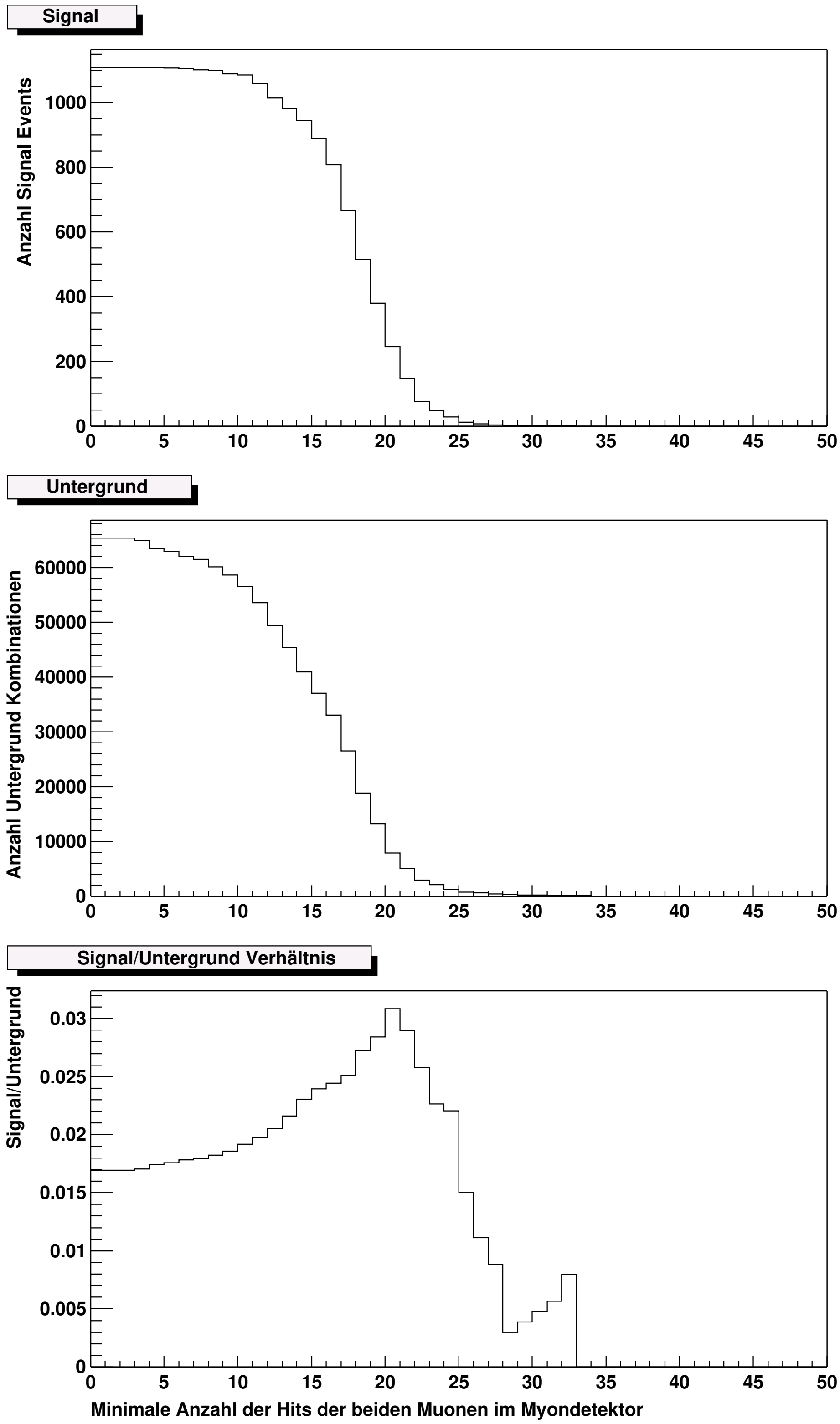


Abbildung 7.4: Signal-Untergrund-Betrachtung der Treffer, die einem Myonspurkandidaten im Myonsystem durch das ARTE-Modul MuonID zugeordnet werden. Auf der Abszisse ist die minimale Anzahl an Treffern in beiden Myonspurkandidaten aufgetragen, mit denen die Kombination dieser beiden Spuren überlebt. Die Bedeutung der Ordinate entnimmt man Abbildung 7.3.

7.5.4 Bestimmung des Myonvertex

Sind zwei Kandidaten für die Myonspuren gefunden, wird anhand des Abstandes der beiden Spuren entschieden, ob dieser Vertex ein Kandidat für die weitere Untersuchung ist.

Der Abstand D zweier Spuren wird errechnet durch:

$$D = \left| \frac{\left(\vec{P}_1 - \vec{P}_2\right) \cdot (\vec{u} \times \vec{v})}{|\vec{u} \times \vec{v}|} \right| .$$

$\vec{P}_1$ und $\vec{P}_2$ sind Punkte auf den Spuren, und $\vec{u}$ und $\vec{v}$ sind die jeweiligen Richtungsvektoren.

Die Kovarianz σ_D für den Abstand zweier Spuren a und b ist:

$$\sigma_D^2 = \sum_{i,j} \frac{\partial D}{\partial x_i^a} \frac{\partial D}{\partial x_j^a} cov_{ij}^a + \sum_{i,j} \frac{\partial D}{\partial x_i^b} \frac{\partial D}{\partial x_j^b} cov_{ij}^b , \tag{7.1}$$

wobei $cov^{a/b}$ die Kovarianzmatrix der jeweiligen Spur ist und die Fehler in den Ortskoordinaten und den Steigungen der Spur in x- und y-Richtung beschreibt.

Zudem wird gefordert, daß die Spuren nicht mehr als 3σ auseinander liegen, was gleichzusetzen ist mit $\sqrt{\frac{D^2}{\sigma_D^2}} \leq 3$.

Es werden Abstände im Bereich $0,01\,\text{mm} < D < 1\,\text{mm}$ untersucht. Der Abstand für die beiden Spuren, der als Schnitt genutzt wird, ist $0,3\,\text{mm}$.

7.5.5 Abstand des Vertex vom nächstgelegenen Draht

Das B^0 hat ein mittlere Lebensdauer von $(1,548 \pm 0,032) \cdot 10^{-12}\,\text{s}$. Das ergibt eine mittlere Flugstrecke von $\approx 11\,\text{mm}$. Eine physikalisch sinnvolle Annahme ist daher, auf eine Entfernung des B^0 vom Draht von $5\,\text{mm}$ zu schneiden. Für die Berechnung des Abstandes wird der Draht durch eine Gerade, die parallel zu einer der Achsen liegt, approximiert. Für die Untersuchung wurden sämtliche Spuren, die mehr als 5 Treffer im VDS haben, in Quadrupel kombiniert, auf einen Vertex angepaßt und aus dem Vertex und den Impulsen der eingeflossenen Spuren die Spurparameter berechnet. Ausgenommen werden Kombinationen, in denen nicht zwei Myonkandidaten vorkommen, in denen die Myonkandidaten nicht die Gesamtladung Null haben und in denen die beiden anderen Spuren nicht die Gesamtladung Null haben. Außerdem werden alle Spuren, die Grover zu einem Primärvertex zählt, nicht berücksichtigt. Bis ungefähr $1,5\,\mathrm{mm}$ hinter dem Draht ist das Signal vollständig erhalten (Abbildung 7.5). Ab da fällt es linear bis $D = 1\,\mathrm{cm}$ um 17% ab. In dem gleichen Bereich fällt der Untergrund nicht erkennbar ab, sondern ist nahezu konstant bei $\approx 1,7 \cdot 10^7$ Kombinationen. Dieses Kriterium ist somit ungeeignet für einen Schnitt.

7.5.6 Schnitt auf den Raumbereich, in dem der Vertex gesucht wird

Alternativ zu dem zuerst angedachten Schnitt auf eine minimale Entfernung vom Draht, zielt diese Untersuchung auch auf eine maximale Entfernung des Vertex vom Draht. Es wird ein Bereich in z bestimmt, in dem sich das Signal vom Untergrund trennen läßt. Für die Untersuchung werden jeweils zwei Myonspurkandidaten kombiniert und untersucht. Der untersuchte Bereich erstreckt sich auf $-4\,\mathrm{cm} < z < 4\,\mathrm{cm}$. Die ermittelten Grenzen sind so festgelegt, daß das Verhältnis zwischen Signal und Untergrund maximal ist. Es zeigt sich, daß die Position für z auf den Bereich $-1,5\,\mathrm{cm} \leq z \leq 1\,\mathrm{cm}$ eingeschränkt werden kann. Dieser Schnitt ist auf die Kombination von verwendeten Drähten festgelegt und muß für andere Datensätze angepaßt werden.

7.5.7 Schnitt auf die J/ψ-Masse

Ein wichtiger Untergrund wird durch das Ereignis $\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K}^{*^0}$ gebildet. Die Zerfallsbreite für diesen Zerfall ist mit $(1,5 \pm 0,17) \cdot 10^{-3}$ um einen Faktor 1000 größer als die des gesuchten Zerfalls. Die Lebensdauer des J/ψ ($\tau_{\mathrm{J}/\psi} = 7,6 \cdot 10^{-21}\,\mathrm{s}$) ist klein genug, um diesen Zerfall ebenfalls als effektiven Zerfall in vier Teilchen zu betrachten. Er läßt sich nicht mit topologischen Annahmen von dem gesuchten Zerfall trennen. Daher wird ein Massebereich um die Masse des J/ψ ($(3,096 \pm 0,087)\,\mathrm{GeV}$) im Spektrum der invarianten Masse der zwei Myonen herausgeschnitten, der 6σ entspricht, wobei σ das Auflösungsvermögen für die Masse des J/ψ ist.

Um das Auflösungsvermögen zu ermitteln, wird ein Monte-Carlo-Datensatz des Ereignisses $\mathrm{B}^0 \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K}^{*^0}$ erzeugt und mit dem gleichen Untergrund gemischt wie schon vorher der Datensatz des Zerfalls $\mathrm{B}^0 \to \mu^+\mu^-\mathrm{K}^{*^0}$. Die invariante Masse der Myonspurkombination wird nach den Schnitten auf die Myonkandidaten mit Funktionen für die Parameteranpassung sekundärer Vertices in Grover, die auf dem Kalman-Filter beruhen [54], berechnet. Eine Parameteranpassung der

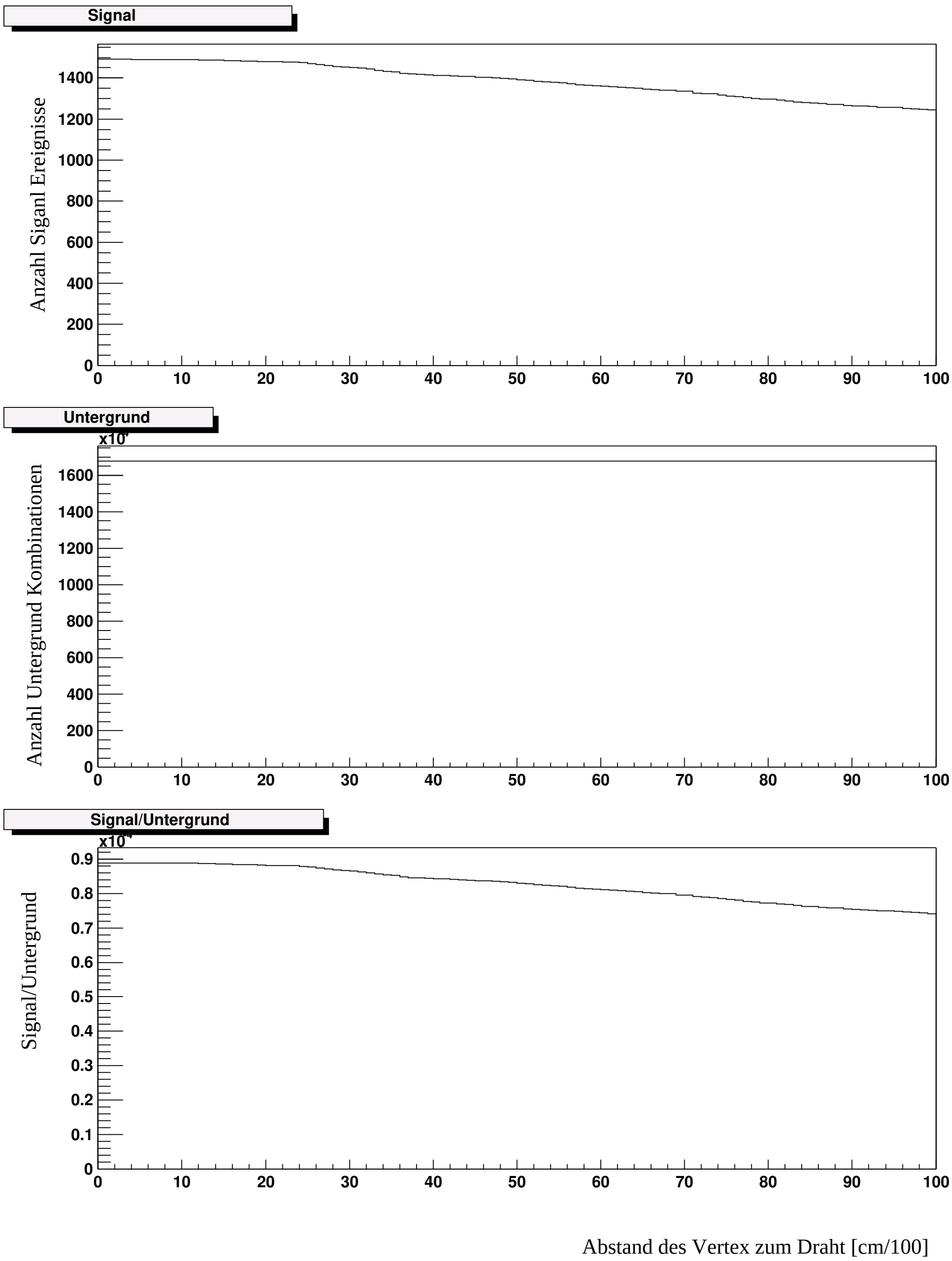


Abbildung 7.5: Abstand des Vertex vom nächstgelegenen Drahttarget. Auf der Abszisse ist der Abstand, auf den geschnitten wurde, aufgetragen. Die Bedeutung der jeweiligen Ordinate entnimmt man Abbildung 7.3. In dem untersuchten Bereich sinkt das Signal ab 1,5mm linear ab, der Untergrund bleibt aber nahezu erhalten.

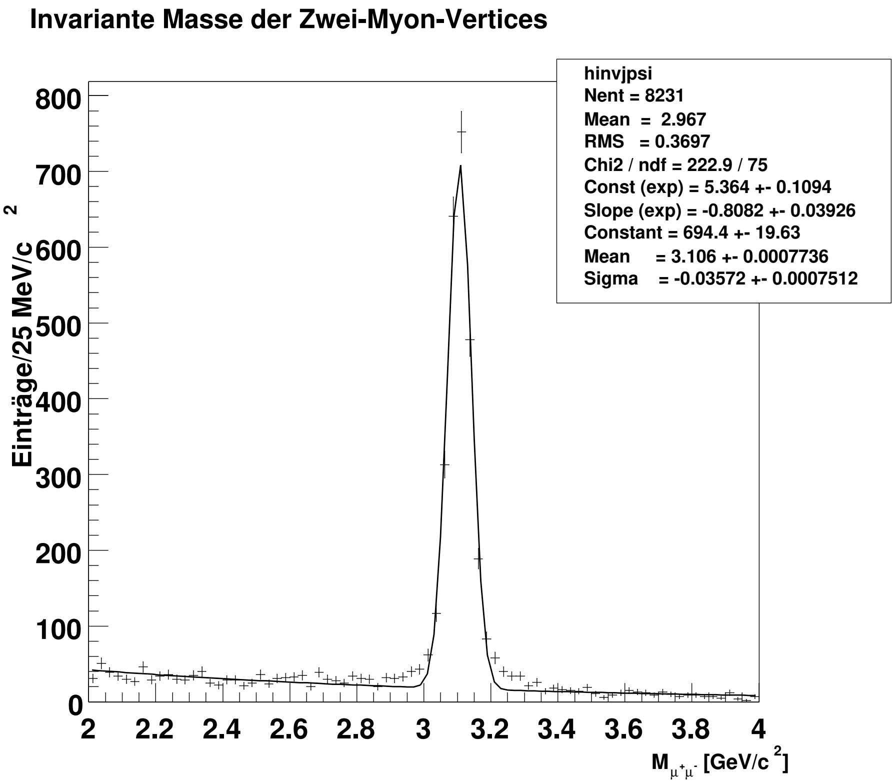


Abbildung 7.6: Invariante Masse der Zwei-Myon-Vertices. Die Parameteranpassung wurde nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt. Angepaßt wurden die Parameter a_i der Funktion $f(x) = exp[a_0 + a_1 x] + a_2 \cdot exp[-0,5 \cdot \frac{x-a_3}{a_4}^2]$, welche in dieser Reihenfolge in der zum Bild gehörenden Statistik angegeben sind.

Funktion

$$f(M_{\mu^+\mu^-}) = e^{a_0 + a_1 M_{\mu^+\mu^-}} + a_2 \cdot e^{-0,5 \cdot (\frac{M_{\mu^+\mu^-} - a_3}{a_4})^2},$$

nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ergibt $\sigma = 0.036 \pm 0,001$ GeV.

Untersucht wurden 9800 Ereignisse. Es wurden 2460 Ereignisse innerhalb der geforderten Subdetektoren gefunden, wobei die geometrische Akzeptanz identisch zu der Suche nach $B^0 \to K^{*^0} \mu^+\mu^-$ formuliert ist, und 2139 Vertices haben für alle vier Spuren auch wieder Relationen zu der Tabelle der rekonstruierten Spuren und werden somit als Signalereignisse des Zerfalls $B^0 \to \mu^+\mu^- K^{*^0}$ erkannt. Von dem Algorithmus zur Bestimmung des Zerfalles $B^0 \to \mu^+\mu^- K^*$ werden noch 19 Vertices des Zerfalls $B^0 \to J/\psi\, K^{*^0}$ gefunden. Entfernt man den Schnitt auf die J/ψ-Masse, werden 345 Vertices gefunden. Die Akzeptanz für den hier untersuchten Zerfall $B^0 \to J/\psi\, K^{*^0}$ wurde durch den Schnitt um 95% gesenkt.

Im Vergleich zu $\frac{Br(B^0 \to \mu^+\mu^- K^{*^0})}{Br(B^0 \to J/\psi\, K^{*^0})} \approx 10^{-3}$ ist das Verhältnis $\frac{19}{345}$ viel zu groß, um eine ausreichende Unterdrückung darzustellen. Mit dieser Methode werden auf ein Ereignis $B^0 \to \mu^+\mu^- K^*$ ungefähr 55 Ereignisse $B^0 \to J/\psi\, K^{*^0}$ identifiziert. Andere Kriterien, wie zum Beispiel die Untersuchung der Verteilung des Transversalimpulses der Zwei-Myon-Vertices der beiden konkurrierenden Zerfälle, konnten ihm Rahmen der Diplomarbeit nicht mehr angegangen werden.

7.5.8 Schnitt auf die RICH-Likelihood

Zwei der nachzuweisenden Spuren dieses Zerfalls sind ein Kaon und ein Pion. Diese Endprodukte müssen ebenso zur Bestimmung des goldenen Zerfalls $B^0 \to J/\psi\, K_S{}^0$ identifiziert werden, um herauszufinden, ob es sich bei dem assoziierten Meson um ein B^+ oder ein B^- handelt, woraus sich wiederum schließen läßt, ob es sich um den Zerfall eines B^0 oder eines $\overline{B}^0$ handelt. Hierfür wurde der RICH optimiert. Er ermöglicht eine Separation von Pionen und Kaonen, aufgrund der Anzahl der in einem von der Cherenkov-Strahlung eines geladenen Teilchens erzeugten Rings detektierten Photonen [55]. Das Ergebnis der Separation wird in Form der Likelihood für eine Hypothese, welche Masse das zu identifizierende Teilchen hat, zur Verfügung gestellt. Da der RICH fünf Hypothesen für die Teilchentypen Pion, Kaon, Proton, Elektron und Myon erstellt, ist die Likelihood für jede dieser Hypothesen, wenn keine von ihnen zutrifft, genau 0,2, so daß die Summe der Likelihoods 1 ergibt. Die Untersuchung kombiniert zwei Spuren und überprüft das „Überleben" dieser Kombination unter der Voraussetzung, daß eine der Spuren eine Likelihood für die jeweilige Hypothese hat, die größer ist als der geforderte Schnitt. Untersucht wurden 1750 Vertices. Fordert man eine Likelihood größer Null, verliert man einen wesentlichen Anteil an Signal, nämlich rund die Hälfte für beide untersuchten Hypothesen. Daher wird die Likelihood des RICH-Detektors nicht als Schnitt verwendet. Allerdings fließt sie bei der Zuordnung der Massen ein, um die invariante Masse einer Kombination von vier Spuren zu berechnen. Ist die Likelihood der Pion-Hypothese größer als die der Kaon-Hypothese, wird dem Teilchen die Masse eines Pions, ansonsten die Masse eines Kaons zugeordnet.

7.5.9 Schnitt auf den Abstand der beiden Myonspuren und der hinzugenommenen Spuren

Dem identifizierten Myonvertex werden zwei weitere rekonstruierte Spuren hinzugefügt und der Abstand jeder dieser Spuren zu dem Vertex überprüft. Auch hier ist die in Kapitel 7.5.4 formulierte Forderung sinnvoll, daß die hinzugenommenen Spuren nicht weiter als 3σ entfernt sind. Der Abstand wird durch die Betrachung des Verhaltens des Signals und Untergrunds für diesen Schnitt gemacht. Dabei werden alle vorherigen Schnitte (vergleiche Tabelle 7.1 und 7.2) mit einbezogen, um die kombinatorischen Möglichkeiten zu reduzieren.

Der Abstand D zwischen Vertex und Spur ist:

$$D = \frac{\overrightarrow{u} \times (\overrightarrow{V} - \overrightarrow{P})}{|\overrightarrow{u}|},$$

mit $\overrightarrow{V}$: Vertex, $\overrightarrow{P}$: Punkt auf der Spur, $\overrightarrow{u}$: Richtungsvektor der Spur.

Der Fehler des Abstands wird nach Gleichung 7.1 bestimmt, wobei die Indizes a und b für die Spur und den Vertex stehen. Die fehlerbehafteten Parameter des Vertex sind dessen Koordinaten. Die Untersuchung wurde in dem Bereich $0.01\,\mathrm{mm} < D < 0,1\,\mathrm{mm}$ durchgeführt.

Der ermittelte Abstand der Spuren von dem existierenden Zwei-Myon-Vertex, an dem der Schnitt angesetzt wird, ist $0,3\,\mathrm{mm}$.

7.5.10 Schnitt auf die Masse der beiden hinzugekommenen Spuren

Da die beiden neu hinzugenommenen Spuren Kandidaten für den K^*-Vertex sind, wird ein Schnitt auf die invariante Masse dieser beiden Spuren gemacht.

Der Bereich, in dem die invariante Masse akzeptiert wird, ist ±300 MeV um die Masse des K^*(891,66 MeV). Dieser Wert kann nicht wie vorher aus einer Messung bestimmt werden, da die beiden Spuren nicht vernünftig gegen den Untergrund abgegrenzt werden können, wie das vorher bei den Myonen der Fall war. Die Breite des ausgeschnittenen Bereichs wird über die Breite des K^*, $\Gamma = 50,7$ MeV und einer geschätzten Verbreiterung durch die Detektor- und Rekonstruktionsauflösung bestimmt.

7.5.11 Die Bestimmung der B^0-Masse

Alle vier Spurkandidaten zusammen sollen die invariante Masse des B^0 besitzen. Für die Myonkandidaten wird in der Parameteranpassung die Masse des Myons verwendet, für die anderen beiden Spuren die eines Pions. Der angewendete Schnitt begrenzt den akzeptierten Massebereich auf ±300 MeV um die B^0-Masse (5369,6 MeV). Ebenso wie der Bereich um die K^*-Masse ist der Bereich durch die Breite des B^0 und einer Verbreiterung durch die Detektor- und Rekonstruktionsauflösung abgestimmt.

7.5.12 Abstand der Spur des Vertex vom nächstgelegenen Draht

Die Berechnung der Kinematik des Mutterteilchens des rekonstruierten Vertex ergibt eine Trajektorie auf einen der Drähte, wenn der Vertex aus den richtigen rekonstruierten Spuren entstanden ist. Um dies zu überprüfen, wird der Abstand der Teilchenspur zum nächstgelegenen Draht geprüft. Hierfür werden alle rekonstruierten Spuren zu einem Vierfachvertex kombiniert. Um die Vielfalt an Kombinationen etwas zu drücken, wurden als Vorauswahl die gleichen Kriterien angelegt wie bei der Bestimmung des Abstands des Vertex vom nächstgelegenen Draht. Das günstigste Signal-Untergrund-Verhältnis ergibt sich bei $0,01$ mm mit ungefähr $0,9 \cdot 10^{-3}$, wobei die Unterdrückung des Untergrunds bei $\approx 88\%$ liegt.

7.6 Anwendung der Analysekette

Zunächst wird ein Qualitätskriterium an die von den Standardrekonstruktionsalgorithmen gefundenen Spuren gestellt. Spuren, die weniger als fünf Treffer im Silizium-Vertex-Detektor haben, werden nicht berücksichtigt.

`GroverPrimaries`, ein Modul innerhalb ARTE/Grover, welches topologische Schnitte verwendet, um primäre Vertices am Draht-Target zu finden [50], wird hier benutzt. Alle Spuren, welche von diesem Modul zu einem primären Vertex zugehörig erkannt werden, werden als solche markiert und stehen für die Suche nach sekundären Vertices nicht mehr zur Verfügung. Spuren, deren Impuls nicht betimmt werden konnte, werden aus der Analyse herausgenommen.

Die Analysekette besteht zunächst aus folgenden Schritten, um Kandidaten für den Zwei-Myon-Vertex zu finden:

1. Es werden jeweils zwei Spuren kombiniert, überprüft, ob die Gesamtladung Null ist und verlangt, daß jede der beiden Spuren mehr als 10 Treffer im Myondetektor hat.
2. Es werden nur Zwei-Myon-Vertices weiter analysiert, in denen die beiden Myonkandidaten nicht mehr als einen Millimeter auseinander liegen und sich die Spuren in einem Bereich von 3σ schneiden.
3. Myonkandidaten mit einem Impuls größer 150 GeV werden verworfen.
4. Der ermittelte Vertex wird nur weiter betrachtet, wenn die z-Position des Vertex im Bereich $-0,5\,\mathrm{cm} < z < 1,5\,\mathrm{cm}$ liegt.
5. Vertices mit einer invarianten Masse in einem Bereich von 108 MeV um die invariante Masse des J/ψ fallen heraus.

Mit den bisherigen Schnitten sind Kandidaten für Zwei-Myon-Vertices bestimmt worden. Da zwei Spuren in diesen Kombinationen zur Verfügung stehen, werden auch nur jeweils zwei Spuren des Monte-Carlo-Vertex, von dem eigentlich vier Spuren ausgehen, gesucht. Über diese wird eine Aussage getroffen, ob es eine Kombination von rekonstruierten Spuren gibt, welche sich dem Monte-Carlo-Vertex zuordnen lassen. Die Effizienz dieser Schritte ist in Tabelle 7.1 dargestellt, indem jeweils das erhaltene Signal und die Anzahl übriggebliebener Untergrundkombinationen aufgezählt wird.

Tabelle 7.1: Anzahl der Signalkombinationen und aller Kombinationen bei den Schnitten zur Bestimmung des Zweimyonvertex. Die Anzahl der Kombinationen bezieht sich auf die Möglichkeiten, zwei Spuren zu kombinieren.

Schnitt	Signal	Alle Kombinationen
Vor den Schnitten		$(56139 \pm 7) \cdot 10^3$
Treffer im Myonsystem	1552±39	38519±196
Impuls	1539±39	36673±191
Abstand der Spuren	1488±39	11515±107
Position	1267±36	7313±85
J/ψ-Masse	1185±34	7110±84

Die Suche nach dem Myonvertex senkt den Untergrund insgesamt um einen Faktor von ≈ 7900.

Ausgehend von den Zwei-Myon-Vertices werden die Schnitte zur Identifizierung des B_0 in der folgenden Reihenfolge ausgeführt:

1. Zwei neue Spuren werden zu dem bestehenden Vertex hinzugefügt, und die Kombination wird akzeptiert, wenn die Gesamtladung des Vertex Null ist.

2. Alle Kombinationen, in denen der Impuls des Pion- oder Kaonkandidaten größer als 100 GeV ist, werden entfernt.

3. Beide neuen Spuren dürfen nicht weiter als 0,3 mm von dem alten Vertex entfernt sein und den Vertex innerhalb von 3σ berühren.

4. Mit den vier zu einem Vertex gehörigen Spuren wird die Parameteranpassung des Vertex wiederholt und wiederum gefordert, daß keine der Spuren weiter als $0,3\,\mathrm{mm}$ von dem gemeinsamsen Vertex entfernt ist.

5. Der Abstand der Spur, die sich für den Vertex aus der Kinematik der vier Spuren ergibt, soll von dem nächstgelegenen Draht nicht weiter als $0,002\,\mathrm{cm}$ entfernt sein.

6. Die z-Position des Vertex muß im Bereich $-0,5\,\mathrm{cm} < z < 1,5\,\mathrm{cm}$ fallen.

7. Die invariante Masse der Kombination aus dem Pion- und dem Kaonkandidaten muß in einem Bereich von ± 300 MeV um die K^*-Masse liegen.

8. Die invariante Masse aller vier Spuren muß in einem Bereich von ± 300 MeV um die B^0-Masse liegen.

Tabelle 7.2 listet für die Schnitte zur Bestimmung des B^0-Vertex die Anzahl gefundenener Signale und aller Kombinationen auf.

Von den in einem Ereignis übriggebliebenen Kombinationen wird diejenige ausgewählt, welche die beste Parameteranpassung zur Bestimmung des Vertex hat. Man erhält 460 Ereignise, die als B^0-Vertex identifiziert werden, von denen 182 zum Signal beitragen. Abbildung 7.7 zeigt die Verteilung der invarianten Masse der Vertices. Mit diesen Schnitten wird eine B^0-Masse von $M_{B^0} = (5,2 \pm 0,13)\,\mathrm{GeV}$ bestimmt.

Tabelle 7.2: Anzahl der Signale und aller nach dem Schnitt übriggebliebenen Kombinationen bei den Schnitten zur Bestimmungen des B^0-Vertex.

Schnitt	Signal	Alle Kombinationen
Bilden des Quadrupels	867±29	$(18058 \pm 4) \cdot 10^3$
Impuls des Pions und Kaons	850± 29	$(17288 \pm 4) \cdot 10^3$
Abstand der neuen Spuren vom Vertex	555±24	345783 ± 588
Abstand aller Spuren vom Vertex	555±24	335694±579
Abstand der „Vertexspur“ zum Draht	226±15	75649±275
K^*-Masse	217±15	67244±259
Position des Vertex	215±15	63322±251
B^0-Masse	182±13	1850±43

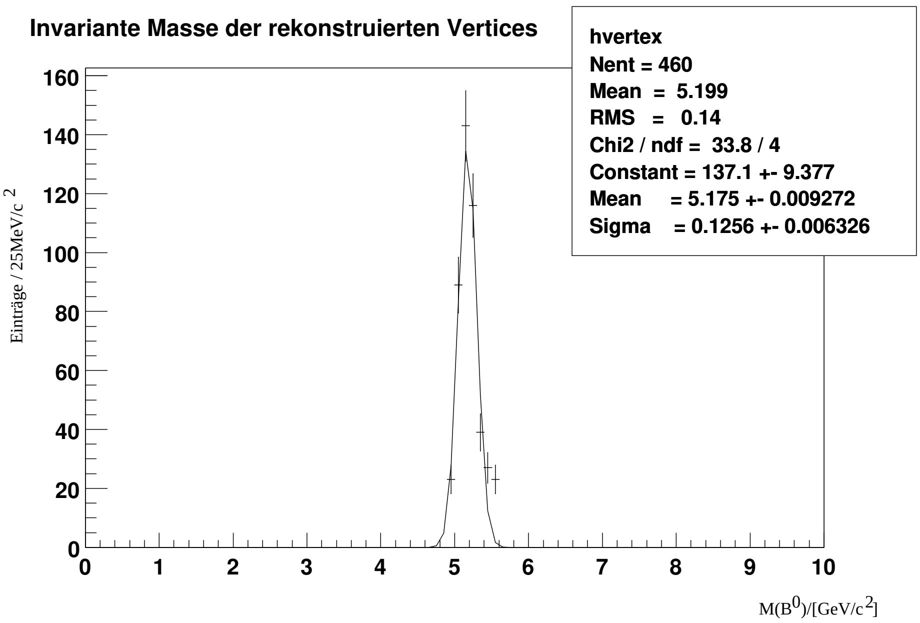


Abbildung 7.7: Die invariante Masse aller Kombinationen nach allen Schnitten. Die Parameteranpassung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate einer Exponentialfunktion ergibt für die Masse des B^0: $M_{B^0} = (5{,}2 \pm 0{,}13)$GeV.

7.7 Schlußfolgerungen

Es ist somit möglich, mit der vorgestellten Analysekette den Zerfall $B^0 \to \mu^+\mu^- K^{*^0}$ vom Untergrund zu trennen. Von 1879 Ereignissen, in denen alle vier Spuren von dem Standardrekonstruktionsalgorithmus erkannt wurden, werden 182 richtig identifiziert. Es werden 278 Kombinationen falsch identifiziert.

Die Identifikationsmethode, die für die Signalereignisse gewählt wurde, gibt eine eher konservative Abschätzung der gefundenen Signalereignisse wieder. Ersetzt man die Erkennung, welche momentan auf Relationen der HITB-Einträge zu den MIMP Einträgen basiert, durch eine Identifikation durch den Vergleich der kinematischen Parameter der Spuren, entspricht das eher dem Ergebnis, daß auch im Detektor gemessen wird, da dieser nicht unterscheidet zwischen Geisterspuren, welche gut in die kinematischen Vorgaben passen, und dem, was per Relation für wahr gehalten wird. Durch das geänderte Kriterium sollten sich dann auch die ermittelten Schnitte ändern und besser auf die physikalischen Gegebenheiten anpassen lassen.

Ansätze zur Verbesserung der Analysekette zeigen sich vor allem in der Teilchenidentifikation und Impulsbestimmung. Die momentan vorhandenen Methoden zur Teilchenidentifikation über den RICH-Detektor und den Myondetektor konnten nicht verwendet werden. Trotzdem erscheint es sinnvoll, nach der Bestimmung der Vertices durch topologische Schnitte die Qualität durch geeignete Anwendung der bestehenden Likelihoods zu verbessern. Eine Impulsbestimmung an der Standardrekonstruktion vorbei, zum Beispiel mit Methoden, die im SLT verwendet werden, führte auch schon in anderen Untersuchungen [56] zu entsprechenden Verbesserungen des Resultats.

Letztendlich muß der Schnitt auf den $B^0 \to J/\psi\, K^{*^0}$-Untergrund verbessert werden. Dieser Zerfall dominiert aufgrund der um einen Faktor 1000 größeren Zerfallsbreite das Signal.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Analyse von Testmustern des Fast-Control-Systems, der geometrischen Akzeptanz des Myon-Pretriggers und einer Analysekette für den Zerfall $B^0 \to {K^*}^0 \mu^+\mu^-$.

Durch die Analyse der FCS-Testmuster war es möglich, Konfigurationsfehler einzelner Komponenten des Myon-Pretriggers und der Verbindungswege zwischen diesen zu finden und erfolgreich zu beseitigen.

Es wurden Untersuchungen der geometrischen Akzeptanz für verschieden Konfigurationen des Myon-Pretriggers anhand des Zerfalls $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ durchgeführt. Diese führten dazu, daß das Verhalten der Akzeptanz des Myon-Pretriggers beurteilt werden konnte, und dadurch der weitere Ausbau des Myon-Pretriggers festgelegt wurde.

Eine Untersuchung der Abhängigkeit der geometrischen Akzeptanz des Myon-Pretriggers von verschiedenen Geometriebeschreibungen zeigte, daß diese nur besteht für den Fall, daß die inneren Spurkammern nicht berücksichtigt werden. Damit wurde das Ergebnis einer vorangegangenen Untersuchung [43] widerlegt.

Es wurde eine Analysekette für den seltenen Zerfall $B^0 \to {K^*}^0 \mu^+\mu^-$ erarbeitet. Mit der vorgestellten Analysekette war es möglich, aus 10000 erzeugten Ereignissen, von denen 1879 über die Standardrekonstruktion rekonstruiert wurden, 182 Ereignisse richtig zu identifizieren.

Vorschläge für eine Verbesserung der Analysekette, welche die angewandten Methoden verfeinert, wurden gemacht. Diese müssen durch eine nachfolgende Untersuchung umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

[1] E. P. Wigner, Proc Amer. Phil. Soc **93** (1949) 521

[2] E. Noether, Nachr. v. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen **2** (1918) 235

[3] C. S. Wu et al., Phys. Rev. **105** (1957) 1413

[4] J. H. Christenson et al., Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 138

[5] G. Lüders, Ann. Phys. **2** (1957) 1

[6] W. Pauli, Niels Bohr and the Development of Physics; Exclusion Principle, Lorentz Group and Reflection of Space-Time and Charge, 2. Auflage (1955) 30

[7] A. Sacharov, JETP Lett. **5** (1967) 24

[8] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. **13**, 562 (1964)

[9] N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531

[10] M. Kobayashi und T. Maskawa, Progr. Theor. Phys. **49** (1973) 652

[11] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 1945

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

[13] I. I. Bigi et al. in C. Jarlskog (Hrsg.), CP Violation: Advanced Series on Directions in High Energy Physics, Band 3, 1. Auflage (1989) 175

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

[15] DESY, Wissenschaftlicher Jahresbericht (1999)

[16] HERA-B Collaboration, HERA-B Report on Status and Prospects October 2000, DESY-PRC 00/04, Oktober 2000

[17] Y. Zaitsev, Status of the Muon System, HERA-B Note 95-100

[18] B. Fominykh und S. Nowak, HERA-B Muon Detector in HBGEAN versions 04-04 and 05-01, HERA-B Note 97-075

[19] M. Böcker et al., The Muon Pretrigger System of the HERA-B Experiment, IEEE Nuclear Science Symposium 2000, Lyon

[20] C. Cruse, Entwicklung und Untersuchung von Komponenten zur Datenübertragung für den Myon-Pretrigger des HERA-B Experimentes (März 1998)

[21] T. Fuljahn, Documentation of FCS Software, Version 3, HERA-B Note 99-014

[22] T. Fuljahn, D. Reßing, FCS Documentation, HERA-B Note 98-212

[23] J. Gläß, A. Wurz, Detector Data Transmission to the First Level Trigger for HERA-B, Universität Mannheim, Januar 1997, HERA-B Note 97-011

[24] M. Kolander, Persönliche Mitteilungen (2000)

[25] Universität Mannheim, Lehrstuhl für Informatik V, HERA-B FLT Message Transfer Module LVDS (2000)

[26] W. D. Peterson, The VMEbus Handbook, Third Edition (1993)

[27] G. Cowan, Statistical Data Analysis, Oxford Univ. Press (1998)

[28] HERA-B Software Group, ARTE The Event Reconstruction and Analysis TOOL for HERA-B (1996)

[29] Geometry for HERA-B, `http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/arte/gean/hbgean.html`

[30] Application Software, Computing and Networks Division, CERN, Geneva, Switzerland, GEANT Detector Description and Simulation Tool (1993)

[31] MSC Vetriebs GmbH, Hit System for DESY HERA-B Myon Chamber System, Technical Reference Manual V1.0

[32] B. Schwenninger, Mapping of Muon Pad Chambers to Pretrigger Coincidence Unit and Pretrigger Message Generator Channels Version 1.4 (1999)

[33] M. Adams, Persönliche Mitteilung (1999)

[34] U. Husemann, Persönliche Mitteilung (1999)

[35] C. Cruse und M. Kolander, Persönliche Mitteilung (2000)

[36] M. Adams, MUPRESIM - A Muon Pretrigger Simulation And Analysis Tool, Vortrag während des Myon-Pretrigger-Analyse-Treffens (Februar 2000)

[37] ARTE Release Notes, `http://www-hera-b.desy.de//subgroup/software/arte/ARTE/menu.versions.html`

[38] Existing Geometry Versions, `http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/geometry/welcome.html`

[39] P. Bechtle, Persönliche Mitteilung (2000)

[40] M. Böcker, Persönliche Mitteilung (2000)

[41] Geometry for HERA-B, `http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/arte/gean/GEOMETRY.html`

[42] M. Buchler, Monte Carlo Study of $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ Acceptance in the Muon Detector, Version 3.0, Vortrag während des Myon-Pretrigger-Analyse-Treffens (Mai 2000)

[43] P. Ball et al., B Decays at the LHC, Preprint hep-ph/0003238

[44] A. J. Buras und R. Fleischer, Heavy Flavours II, Hrsg. A. J. Buras und M. Lindner, World Scientific (1997) 65

[45] G. Buchalla und A. J. Buras, Nucl. Phys. **B548** (1999) 309

[46] A. Ali, T. Mannel und T. Morozumi, Phys. Lett. **B273** (1991) 505

[47] D. Melikov, N. Nikitin und S.Simula, Phys. Rev. **D57** (1998) 6814

[48] R. Mankel, Prism - the HERA-B Event Display and its Tcl/Tk User Interface, HERA-B Note 97-090

[49] D. Groom et al., Eur. Phys. J. **C15** (2000) 1

[50] D. Emeliyanov et al., Grover (Nov. 2000)

[51] D. Samtlebe, Reconstruction Package in ARTE, `http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/arte/reco/reco.html`

[52] R. Mankel, Recommendations for Evaluating the Performance of HERA-B Reconstruction Modules, HERA-B Note 99-063

[53] B. Fominykh, MuonID - muon identification program, Vortrag während des Myon-Pretrigger-Analyse-Treffens (Mai 2000)

[54] V. Eiges et al., Test of vertex reconstruction and fitting algorithms on $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ data, HERA-B Note 00-182

[55] I. Ariño und L. Garrido, Particle Identification with the HERA-B RICH, HERA-B Note 99-108

[56] U. Husemann, Persönliche Mitteilung

Danksagung

- An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. P. Buchholz für die interessanten Themen in dieser Diplomarbeit und seine Unterstützung danken.
- Herrn Prof. Dr. D. Wegener danke ich für die Bereitschaft, die Aufgabe des Koreferenten zu übernehmen.
- Auch gebührt mein Dank Markus Adams, Philip Bechtle, Matthias Böcker, Carsten Cruse, Marcus Hienz, Ulrich Husemann und Björn Schwenninger, die ihre Freizeit opferten um diese Arbeit Korrektur zu lesen und nicht müde wurden, mir jede erdenkliche Hilfe zukommen zu lassen
- Matthias Grewe möchte ich für die sehr freundschaftliche Aufnahme am Lehrstuhl und für die vielen anregenden und unterhaltsamen Gespräche danken.
- Bei allen Mitgliedern des Lehrstuhls Experimentelle Physik V und der HERA-B-Kollaboration möchte ich mich für kleine und große Hilfestellungen bedanken. Ohne sie hätte es diese Diplomarbeit nicht gegeben.
- Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. C. Gößling, welcher mir freundlicherweise den Farbdrucker des Lehrstuhls Experimentelle Physik IV zur Verfügung stellte, von dem ich dann auch Gebrauch machen mußte.
- Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für die Unterstützung, die sie mir während des Studiums haben zukommen lassen und meiner Verlobten, Niamh, daß sie mir das Leben so angenehm macht und mich unterstützt, wo immer sie kann.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 05 7DO55P gefördert.