Entwicklung eines Simulationsprogrammes für das Myon-Pretrigger-System des HERA–B Experimentes und Untersuchungen zum Systemverhalten

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

DISSERTATION

von
Diplom-Physiker Markus Adams
aus Simmern im Hunsrück

Dortmund
Dezember 2001

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einleitung

Die Elementarteilchenphysik erforscht die fundamentalen Konstituenten der Materie und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Die derzeitig grundlegende Theorie der Elementarteilchenphysik ist das Standardmodell, nach dem es zwölf elementare Fermionen gibt, mit denen sämtliche Naturphänomene erklärbar sind. Diese Elementarteilchen – aufgeführt in Tabelle I –, sind in drei Generationen mit jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen angeordnet. Zu jedem dieser Teilchen existiert ein Antiteilchen mit umgekehrten ladungsartigen Quantenzahlen. Im Standardmodell werden die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den

Tabelle I: *Elementare Fermionen des Standardmodells. Es gibt drei Generationen mit jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen. Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen.*

Generation	Quarks		Leptonen	
1	Up	(u)	Elektron-Neutrino	(ν_e)
	Down	(d)	Elektron	(e)
2	Charm	(c)	Myon-Neutrino	(ν_μ)
	Strange	(s)	Myon	(μ)
3	Top	(t)	Tau-Neutrino	(ν_τ)
	Bottom	(b)	Tau	(τ)

Elementarteilchen im Rahmen von Quantenfeldtheorien beschrieben, basierend auf dem Konzept von Eichsymmetrien mit lokaler Eichinvarianz, wonach die Kräfte durch den Austausch von Eichbosonen vermittelt werden. In Tabelle II sind die verschiedenen Wechselwirkungen und die jeweiligen Austauschteilchen aufgeführt. Elektrisch geladene Teilchen unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung, beschrieben in der Quantenelektrodynamik (QED) [Fey 49, Sch 48, Tom 46] durch den Austausch von Photonen. Quarks tragen einen weiteren Freiheitsgrad, den man als Farbladung bezeichnet. In der Quantenchromodynamik (QCD) wird die starke Wechselwirkung farbgeladener Quarks durch den Austausch von Gluonen formuliert, die selbst Farbladungen tragen. Weiterhin nehmen alle Fermionen an der schwachen Wechselwirkung teil, die als einzige Kraft Übergänge zwischen den einzelnen Teilchenarten, auch zwischen verschiedenen Generationen, ermöglicht. Die Theorie, welche die schwache Wechselwirkung beschreibt [Fer 34], und die QED konnten zu der vereinheitlichten Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zusammengefasst werden [Gla 61, Wei 67, Sal 68, tHo 72].

Tabelle II: *Fundamentale Wechselwirkungen des Standardmodells.*

Kraft	Feldtheorie	Eichbosonen
stark	Quantenchromodynamik (QCD)	8 Gluonen
elektromagnetisch	Quantenelektrodynamik (QED)	Photon
schwach	Quantenflavordynamik (QFD)	W^+-, W^--, Z^0-Boson

Alle zum heutigen Zeitpunkt vorliegenden experimentellen Ergebnisse stimmen mit den Vorhersagen des Standardmodells mit hoher Präzision überein [Gur 00]. Neue Resultate von Neutrinoexperimenten [Fuk 98, Ahm 01] deuten allerdings darauf hin, dass Neutrinos eine endliche Ruhemasse besitzen im Widerspruch zum Standardmodell, in dem die Neutrinos masselos sind. Zudem gibt es einige unbefriedigende Aspekte des Standardmodells, die eine darüber hinausgehende Theorie notwendig erscheinen lassen. Es existieren 19 freie Parameter, die nicht aus fundamentalen Prinzipien abgeleitet werden können, sondern experimentell bestimmt werden müssen. Dazu gehören die Kopplungsstärken der verschiedenen Wechselwirkungen sowie die Massen der geladenen Fermionen. Unter Berücksichtigung endlicher Neutrinomassen erhöht sich die Zahl der freien Parameter weiter. Eine offene Frage ist ferner die Einbeziehung der Gravitation, die eine wichtige Rolle auf makroskopischen Skalen spielt, im Standardmodell aber nicht berücksichtigt wird.

Untersuchungen zur Verletzung der CP-Symmetrie bieten eine Möglichkeit, die Gültigkeit der Vorhersagen des Standardmodells zu überprüfen. Die CP-Verletzung ist mit einer zentralen Frage der Kosmologie verknüpft, ist sie doch eine der notwendigen Bedingungen, mit Hilfe derer erklärt werden kann, warum die im Universum beobachtete Materie die Antimaterie bei weitem überwiegt, obwohl beim Urknall Materie und Antimaterie in gleichen Anteilen erzeugt wurden. Nach [Sak 67] mussten in einer Phase der frühen Entwicklung des Universums die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein, damit die beobachtete Materie-Antimaterie-Asymmetrie zustande kommen konnte:

1. Nichterhaltung der Baryonenzahl,
2. Verletzung der C- und CP-Symmetrie,
3. thermisches Nicht-Gleichgewicht.

Der Effekt der CP-Verletzung im Rahmen des Standardmodells ist allerdings zu klein, um die beobachtete Materie-Antimaterie-Asymmetrie erklären zu können [Coh 93]. Zurzeit werden umfangreiche experimentelle Anstrengungen mit dem Ziel unternommen, die CP-Verletzung im System der B-Mesonen zu erforschen. Eines der Experimente, das zur Untersuchung dieser Fragestellung aufgebaut wurde, ist das HERA – B Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg [Loh 94, Har 95].

Ziele dieser Arbeit

Das HERA – B Experiment verwendet ein feststehendes Target, um die zu untersuchenden B-Mesonen in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen zu erzeugen. Der Anteil von Ereignissen, in denen Hadronen produziert werden, die schwere Quarks enthalten, ist dabei gering. Da aufgrund der hohen Ereignisraten nicht die Daten aller Ereignisse ausgelesen und analysiert werden können, ist ein Triggersystem erforderlich, das bestimmte physikalische Prozesse effizient selektiert. Das Myon-Pretrigger-System ist ein wesentlicher Bestandteil des Triggersystems und initiiert den Selektionsmechanismus für Prozesse mit Myonspuren im Endzustand, indem für jedes Ereignis, basierend auf einem Teil der Detektordaten, eine schnelle Mustererkennung durchgeführt wird und Informationen an die nachfolgende Triggerstufe weitergegeben werden. Eine wichtige Anforderung an den Myon-Pretrigger ist eine möglichst hohe Nachweiseffizienz für Myonspuren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das die Funktion des gesamten Myon-Pretrigger-Systems auf dem Niveau von Bitoperationen modelliert. Nur damit kann die effiziente Funktion des Myon-Pretrigger-Systems im Experiment überprüft werden. Neben der Effizienzanalyse wurden mit dem Simulationsprogramm verschiedene weitere Studien zum Verhalten des Myon-Pretriggers durchgeführt. So wurde die Akzeptanz des Mustererkennungsschemas und die Verteilung der Latenzzeiten der Triggernachrichten in Abhängigkeit von der primären Proton-Nukleon-Wechselwirkungsrate bestimmt. Desweiteren wurden Multiplizitäten in verschiedenen Komponenten des HERA – B Detektors im Hinblick auf die Entwicklung eines Trigger-Veto-Systems untersucht.

Die Informationen über Kandidaten für Myonspuren, die der Myon-Pretrigger an die nachfolgende Triggerstufe sendet, besitzen ein festgelegtes Format und werden mit Hilfe einer Look-up Table (LUT) (engl. für Nachschlag-Tabelle) abhängig vom Treffermuster erzeugt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, das es erlaubt, die Informationen zu bestimmen, die zur Konfiguration der LUTs benötigt werden.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich wie folgt:

Im ersten Kapitel werden die physikalischen Zielsetzungen des HERA – B Experimentes dargestellt. Das darauf folgende Kapitel beschreibt den Aufbau der Detektorkomponenten sowie des Trigger- und Datennahmesystems des HERA – B Experimentes. Der Aufbau und die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems, das die Selektion von Ereignissen mit Myonen im Endzustand ermöglicht, wird im dritten Kapitel vorgestellt. Im vierten Kapitel wird die Software zur Simulation des Myon-Pretrigger-Systems und zur Bestimmung der LUT-Informationen erläutert. Resultate, die mit Hilfe des Simulationsprogrammes für den Myon-Pretrigger gewonnen wurden, werden im fünften Kapitel präsentiert. Dort finden sich auch die Ergebnisse einer Multiplizitätsstudie.

Kapitel 1

Die physikalischen Zielsetzungen des HERA – B Experimentes

Das HERA – B Experiment wurde mit der primären physikalischen Zielsetzung errichtet, die Verletzung der CP-Symmetrie im System der neutralen B-Mesonen, insbesondere im Zerfall $\mathrm{B_d^0} \to \mathrm{J}/\psi\, \mathrm{K_S^0}$, zu untersuchen. In diesem Kapitel werden einige physikalische Grundlagen dieser Messung dargelegt. Dazu wird zunächst die fundamentale Bedeutung von Symmetrien in der Physik gezeigt, daran anschließend wird erläutert, wie die Verletzung der CP-Symmetrie im Rahmen des Standardmodells beschrieben wird. Schließlich wird die quantitative Analyse des oben genannten Zerfallskanals dargestellt. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über weitere physikalische Fragestellungen, deren Untersuchung sich das HERA – B Experiment widmen wird.

1.1 CP-Verletzung im Zerfall $\mathrm{B_d^0} \to \mathrm{J}/\psi\, \mathrm{K_S^0}$

1.1.1 Symmetrien in der Physik

Emmy Noether bewies ein Theorem, nach dem ein physikalisches System, dessen Bewegungsgleichungen invariant unter einer kontinuierlichen Transformation sind, ein Integral der Bewegung, d. h. eine Erhaltungsgröße, besitzt [Noe 18]. Sind etwa die Bewegungsgleichungen eines abgeschlossenen Systems invariant unter kontinuierlichen Translationen im Raum, so ist der Impuls erhalten. Invarianz unter kontinuierlichen Zeittranslationen korrespondiert mit der Energieerhaltung.

Neben den kontinuierlichen gibt es auch diskrete Transformationen, die nicht aus infinitesimalen Transformationen zusammengesetzt werden können und auf die sich das Noether-Theorem nicht anwenden lässt. Die folgenden diskreten Symmetrietransformationen werden unterschieden:

- Die Paritätstransformation P kehrt das Vorzeichen der Raumkoordinaten um,

$$(t, \vec{\mathrm{x}}) \xrightarrow{P} (t, -\vec{\mathrm{x}})\,,$$

- die Zeitumkehrtransformation T das Vorzeichen der Zeitkoordinate,

$$(t, \vec{x}) \xrightarrow{T} (-t, \vec{x}) \,,$$

- die Ladungskonjugation C kehrt die Vorzeichen sämtlicher ladungsartigen Quantenzahlen um.

Ein bedeutendes Fundament des Standardmodells ist das CPT-Theorem [Lüd 54, Pau 55]. Es besagt, dass jede lorentzinvariante, lokale und kausale Feldtheorie invariant ist unter der gemeinsamen Anwendung der drei Transformationen C, P und T in beliebiger Reihenfolge. Die CPT-Invarianz hat zur Folge, dass die Massen, Lebensdauern und Zerfallsbreiten von Teilchen und Antiteilchen exakt gleich sind.

Während die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung invariant unter den Einzeltransformationen C, P und T sind, wurde festgestellt, dass in der schwachen Wechselwirkung die Symmetrien unter P- und C-Transformationen separat verletzt sind [Lee 56, Wu 57, Gar 57, Fri 57]. Die kombinierte Symmetrie CP galt aber in der schwachen Wechselwirkung als erhalten [Lan 57], bis 1964 der erste experimentelle Nachweis erbracht wurde, dass diese Symmetrie im System der neutralen Kaonen verletzt ist [Chr 64]. Das bedeutet, dass in der schwachen Wechselwirkung auch die Zeitumkehrinvarianz verletzt ist, sofern CPT-Invarianz zugrunde gelegt wird.

1.1.2 Die CP-Verletzung im Standardmodell

Die Einbettung der CP-Verletzung in das Standardmodell hängt zusammen mit der Wechselwirkung der Quarks mit den geladenen W$^{\pm}$-Bosonen, die durch folgende Lagrangedichte beschrieben wird (siehe z. B. [Fle 00]):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{int}}^{\text{CC}} &= -\frac{g_2}{\sqrt{2}} \left(\bar{u}'_L, \bar{c}'_L, \bar{t}'_L\right) \gamma^\mu \begin{pmatrix} d'_L \\ s'_L \\ b'_L \end{pmatrix} W_\mu^\dagger + h.c. \qquad (1.1) \\ &= -\frac{g_2}{\sqrt{2}} \left(\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L\right) \gamma^\mu \mathbf{V}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} W_\mu^\dagger + h.c. \end{aligned}$$

Die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM-Matrix) $\mathbf{V}_{\text{CKM}}$ [Cab 63, Kob 73] ist eine unitäre 3×3-Matrix, die die Masseneigenzustände der Quarks $(d_L, s_L, b_L)^T$ in die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung $(d'_L, s'_L, b'_L)^T$ transformiert:

$$\begin{pmatrix} d'_L \\ s'_L \\ b'_L \end{pmatrix} = \mathbf{V}_{\text{CKM}} \cdot \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} , \qquad (1.2)$$

während $(\bar{u}'_L, \bar{c}'_L, \bar{t}'_L) = (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L)$ gilt. Die Werte der CKM-Matrixelemente werden im Standardmodell nicht vorhergesagt, sondern müssen experimentell bestimmt werden. Die aktuellen

Werte der 90 %-Vertrauensintervalle für die Beträge der Matrixelemente sind [Gro 00]:

$$\begin{pmatrix} 0{,}9742\ldots0{,}9757 & 0{,}219\ldots0{,}226 & 0{,}002\ldots0{,}005 \\ 0{,}219\ldots0{,}225 & 0{,}9734\ldots0{,}9749 & 0{,}037\ldots0{,}043 \\ 0{,}004\ldots0{,}014 & 0{,}035\ldots0{,}043 & 0{,}9990\ldots0{,}9993 \end{pmatrix}. \tag{1.3}$$

Der Reaktionsmechanismus des geladenen schwachen Stroms ist der einzige im Standardmodell, der Übergänge zwischen verschiedenen Quarkflavors (engl.: Aroma, Geschmack) ermöglicht, wobei die Übergangswahrscheinlichkeiten dem Betragsquadrat des jeweiligen CKM-Matrixelementes proportional sind. Es dominieren Übergänge zwischen Quarks innerhalb einer Generation, die den Diagonalelementen der CKM-Matrix entsprechen. Demgegenüber sind Übergänge zwischen verschiedenen Generationen unterdrückt, besonders solche zwischen der ersten und dritten.

Für N Quarkgenerationen besitzt die Mischungsmatrix $(N-1)^2$ unabhängige Parameter, $\frac{1}{2}N(N-1)$ Winkel und $\frac{1}{2}(N-1)(N-2)$ Phasen. Die Cabibbo-Matrix [Cab 63], welche die Mischung der Quarks der ersten und zweiten Generation beschreibt, wird durch einen reellen Parameter, den Cabibbo-Winkel θ_C, vollständig festgelegt. Die CKM-Matrix für drei Generationen besitzt vier freie Parameter, drei Winkel und eine Phase. Verschiedene Parametrisierungen der CKM-Matrix sind gebräuchlich, in der Standardparametrisierung [Cha 84, Gro 00] nimmt die CKM-Matrix die folgende Form an:

$$\mathbf{V}_{\mathrm{CKM}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}, \tag{1.4}$$

mit den Abkürzungen $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ $(i,j = 1,2,3)$, wobei θ_{12}, θ_{23}, θ_{13} die drei Winkel und δ_{13} die Phase sind. Es kann gezeigt werden, dass mit hoher Genauigkeit $c_{13} = c_{23} = 1$ gilt [Bur 97].

Eine Entwicklung nach dem Parameter $\lambda \equiv |V_{us}| = s_{12} = \sin\theta_C \approx 0{,}22$, die durch die offensichtliche Hierarchie der Beträge der Matrixelemente nahe gelegt wird, führt zur Wolfenstein-Parametrisierung der CKM-Matrix [Wol 83]:

$$\mathbf{V}_{\mathrm{CKM}} = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}\left(\lambda^4\right). \tag{1.5}$$

Verlangt man, dass für die Parameter in (1.4) und in (1.5) die Relationen

$$s_{12} = \lambda, \qquad s_{23} = A\lambda^2, \qquad s_{13}e^{-i\delta_{13}} = A\lambda^3(\rho - i\eta). \tag{1.6}$$

in jeder Ordnung von λ gelten, so folgt daraus [Bur 94]:

$$\rho = \frac{s_{13}}{s_{12}s_{23}}\cos\delta_{13}, \qquad \eta = \frac{s_{13}}{s_{12}s_{23}}\sin\delta_{13}. \tag{1.7}$$

Durch die Festlegung der Parameter (λ, A, ρ, η) in (1.6) ergeben sich gegenüber der Parametrisierung in (1.5) bis auf Korrekturen der Ordnung $\mathcal{O}\left(\lambda^6\right)$ die folgenden genaueren Relationen:

$$V_{us} = \lambda, \quad V_{cb} = A\lambda^2, \quad V_{ub} = A\lambda^3(\rho - i\eta), \tag{1.8}$$

$$V_{td} = A\lambda^3 \left(1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta}\right) , \tag{1.9}$$

$$V_{cd} = -\lambda - iA^2\lambda^5\eta, \quad V_{ts} = -A\lambda^2 - iA\lambda^4\eta, \tag{1.10}$$

wobei für $\bar{\rho}$ und $\bar{\eta}$ gilt:

$$\bar{\rho} = \rho\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right), \qquad \bar{\eta} = \eta\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right). \tag{1.11}$$

Von besonderer Bedeutung ist das Auftreten einer Phase in der CKM-Matrix, da ein imaginärer Anteil in der CKM-Matrix notwendig ist, um die Verletzung der CP-Symmetrie im Standardmodell zu erklären. Treten in der Lagrangedichte einer Feldtheorie komplexe Kopplungskonstanten auf, die nicht durch eine geeignete Definition der Phasen der Felder eliminiert werden können, so ist die CP-Symmetrie in dieser Theorie verletzt [Har 98]. Damit CP-Verletzung auftreten kann, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein [Jar 85]:

- Die Massen der Up-artigen Quarks (u, c und t) und der Down-artigen Quarks (d, s und b) dürfen nicht entartet sein:

$$(m_t^2 - m_c^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_s^2 - m_d^2)(m_b^2 - m_d^2) \neq 0 \,. \tag{1.12}$$

- Es muss gelten: $J \neq 0$, wobei die Jarlskog-Determinante J gegeben ist durch:

$$\mathcal{I}m\left(V_{ij}V_{kl}V_{il}^*V_{kj}^*\right) = J \cdot \sum_{m,n=1}^{3} \epsilon_{ikm}\epsilon_{jln} \,. \tag{1.13}$$

In der Parametrisierung (1.4) der CKM-Matrix gilt [Nir 98]:

$$J = c_{12}c_{23}c_{13}^2 s_{12}s_{23}s_{13}\sin\delta_{13} \,. \tag{1.14}$$

Die Bedingung $J \neq 0$ ist also gleichbedeutend damit, dass $\theta_{ij} \neq 0, \frac{\pi}{2}$ und $\delta_{13} \neq 0, \pi$ erfüllt sein müssen. In der Wolfenstein-Parametrisierung gilt:

$$J \simeq A^2\lambda^6\eta \,, \tag{1.15}$$

so dass $\eta \neq 0$ eine notwendige Voraussetzung für CP-Verletzung ist.

Die Unitarität der CKM-Matrix

$$\mathbf{V}_{\mathrm{CKM}}^{\dagger}\mathbf{V}_{\mathrm{CKM}} = \mathbf{1} \tag{1.16}$$

führt zu sechs Normierungsbedingungen für die Spalten und Zeilen der CKM-Matrix

$$\sum_{i=u,c,t} |V_{ij}|^2 = 1, \quad j = d,s,b \,, \qquad \sum_{j=d,s,b} |V_{ij}|^2 = 1, \quad i = u,c,t, \tag{1.17}$$

sowie sechs Orthogonalitätsrelationen zwischen jeweils zwei Spalten bzw. Reihen

$$\sum_{i=u,c,t} V_{ij}V_{ik}^* = 0, \quad (j,k) = (d,s),(d,b),(s,b) \,, \tag{1.18}$$

$$\sum_{j=d,s,b} V_{ij}V_{kj}^* = 0, \quad (i,k) = (u,c),(u,t),(c,t) \,. \tag{1.19}$$

Die Gleichungen (1.18) und (1.19) verlangen das Verschwinden einer Summe von drei komplexen Zahlen und können geometrisch als geschlossene Dreiecke in der komplexen Ebene dargestellt werden, die alle den gleichen Flächeninhalt $A_\triangle = |J|/2$ [Jar 88] besitzen, jedoch ist für einige der Dreiecke eine der Seitenlängen deutlich kleiner als die beiden übrigen. Von besonderer Bedeutung ist das so genannte Unitaritätsdreieck, das aus der Orthogonalitätsbedingung für die erste und dritte Spalte der CKM-Matrix hervorgeht:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0. \tag{1.20}$$

Die Seitenlängen des entsprechenden Dreiecks besitzen allesamt die Größenordnung $\mathcal{O}\left(\lambda^3\right)$. Für den zweiten Summanden gilt nach (1.5, 1.8, 1.10)

$$V_{cd}V_{cb}^* = -A\lambda^3 + \mathcal{O}\left(\lambda^7\right). \tag{1.21}$$

Diese Seite des Unitaritätsdreiecks liegt demnach bis auf Korrekturen der angegebenen Ordnung auf der reellen Achse. Dividiert man sämtliche Seitenlängen durch $|V_{cd}V_{cb}^*|$, so erhält man das in Abbildung 1.1 dargestellte reskalierte Unitaritätsdreieck in der komplexen Ebene. Die Eckpunkte des Dreiecks liegen bei $(0,0)$, $(1,0)$ und $(\bar\rho,\bar\eta)$, für die Seitenlängen des

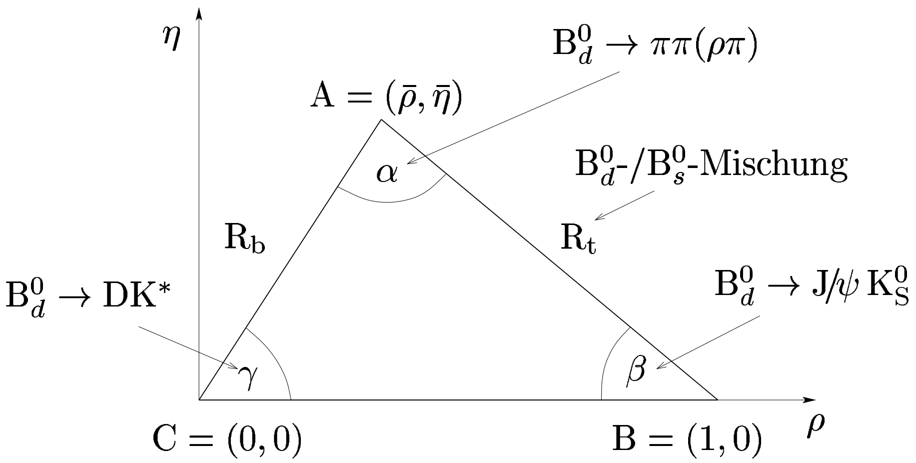


Abbildung 1.1: *Das Unitaritätsdreieck hervorgegangen aus (1.20) nach Reskalierung. Dargestellt sind physikalische Prozesse, die erlauben, verschiedene Parameter des Unitaritätsdreiecks zu bestimmen.*

reskalierten Dreiecks gilt:

$$\mathrm{R_b} \equiv \frac{|V_{ud}V_{ub}^*|}{|V_{cd}V_{cb}^*|} = \sqrt{\bar\rho^2+\bar\eta^2} = \left(1-\frac{\lambda^2}{2}\right)\frac{1}{\lambda}\left|\frac{V_{ub}}{V_{cb}}\right|, \tag{1.22}$$

$$\mathrm{R_t} \equiv \frac{|V_{td}V_{tb}^*|}{|V_{cd}V_{cb}^*|} = \sqrt{(1-\bar\rho)^2+\bar\eta^2} = \frac{1}{\lambda}\left|\frac{V_{td}}{V_{cb}}\right|. \tag{1.23}$$

Die drei Winkel des Unitaritätsdreiecks ergeben sich zu:

$$\alpha = \arg\left(-\frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right), \ \beta = \arg\left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right), \ \gamma = \arg\left(-\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}\right). \tag{1.24}$$

In Abbildung 1.1 sind physikalische Prozesse aufgeführt, aus deren Untersuchung verschiedene Parameter des Unitaritätsdreiecks bestimmt werden können. Dabei spielen Prozesse, in denen B-Mesonen beteiligt sind, eine wichtige Rolle. Dem Prozess

$$\mathrm{B}_d^0 \to \mathrm{J}/\psi \, \mathrm{K}_\mathrm{S}^0 \, , \tag{1.25}$$

dessen Untersuchung mit dem Winkel β des Unitaritätsdreiecks in Zusammenhang steht, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Man bezeichnet ihn als „goldenen Zerfall“, da er sich durch ein vergleichsweise großes Verzweigungsverhältnis, einen Endzustand, der gut selektierbar und von Untergrundprozessen zu trennen ist, sowie vernachlässigbare theoretische Unsicherheiten auszeichnet [Har 98].

Die Bestimmung der Parameter des Unitaritätsdreiecks erlaubt es, die Beschreibung der CP-Verletzung im Standardmodell zu überprüfen. Die Vorhersage einer nicht-reellen Phase in der CKM-Matrix als Ursache der CP-Verletzung setzt voraus, dass die Fläche des Unitaritätsdreiecks endlich und von Null verschieden ist. Bedeutend ist die unabhängige Messung mehrerer Parameter des Unitaritätsdreiecks, idealerweise aller drei Seitenlängen und Winkel, wodurch die Unitarität der CKM-Matrix getestet werden kann. Falls die Ergebnisse der Einzelmessungen nicht konsistent sind mit einem geschlossenen Dreieck, so ist dies ein Hinweis auf „Neue Physik“ jenseits des Standardmodells.

1.1.3 Teilchen-Antiteilchen-Mischung

Für die Untersuchung des goldenen Zerfalls (1.25) spielt die Teilchen-Antiteilchen-Mischung eine wichtige Rolle. Durch Prozesse der schwachen Wechselwirkung können Quarks verschiedener Sorte ineinander übergehen. Dies führt zu Mischungsprozessen in Systemen neutraler Mesonen, wie im Folgenden am Beispiel der neutralen B_d^0-Mesonen erläutert werden wird.

B_d^0-Mesonen werden beispielsweise in Prozessen der starken Wechselwirkung als Flavoreigenzustände mit definiertem Quarkinhalt zur Zeit t_0 produziert:

$$|\mathrm{B}_d^0\rangle = |\bar{b}d\rangle \, , \qquad |\overline{\mathrm{B}_d^0}\rangle = |b\bar{d}\rangle \, . \tag{1.26}$$

Vermittelt durch Prozesse höherer Ordnung der schwachen Wechselwirkung, wie sie in Abbildung 1.2 dargestellt sind, können die Flavoreigenzustände ineinander übergehen. Für eine Zeit $t > t_0$ erhält man einen Mischzustand

$$|\mathrm{B}_d^0(t)\rangle = a(t)|\mathrm{B}_d^0\rangle + b(t)|\overline{\mathrm{B}_d^0}\rangle, \tag{1.27}$$

dessen zeitliche Entwicklung durch die zeitabhängige Schrödingergleichung

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} = \left(M - \frac{i}{2}\Gamma\right)\begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix} \tag{1.28}$$

beschrieben wird, wobei M die Massenmatrix und Γ die Zerfallsmatrix ist. CPT-Invarianz bedingt, dass gilt:

$$M_{11} = M_{22} \quad \text{und} \quad \Gamma_{11} = \Gamma_{22} \, , \tag{1.29}$$

d. h. Teilchen und Antiteilchen besitzen gleiche Massen und Zerfallsbreiten. Durch Diagona-

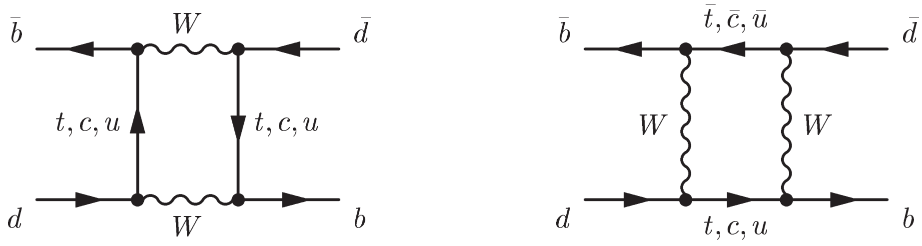


Abbildung 1.2: *Mischung der* B_d^0*-Mesonen. Kastendiagramme mit* W*-Bosonen und inneren Quarklinien erlauben Übergänge zwischen* $|B_d^0\rangle$ *und* $|\overline{B_d^0}\rangle$.

lisierung des Operators $(M - i\Gamma/2)$ ergeben sich die physikalischen Zustände

$$|B_L^0\rangle = p|B_d^0\rangle + q|\overline{B_d^0}\rangle\,, \qquad (1.30)$$

$$|B_H^0\rangle = p|B_d^0\rangle - q|\overline{B_d^0}\rangle\,, \qquad (1.31)$$

mit definierten Massen und Lebensdauern. Der Index L bezeichnet dabei den leichten und H den schweren Zustand. Die Normierungsbedingung lautet:

$$|p|^2 + |q|^2 = 1. \qquad (1.32)$$

Die Differenzen der Massen und der Lebensdauern der neutralen B-Mesonen ergeben sich zu

$$\Delta m_{B_d^0} = M_H - M_L\,, \quad \Delta\Gamma_{B_d^0} = \Gamma_H - \Gamma_L\,. \qquad (1.33)$$

Häufig werden die Größen x_d und y_d verwendet, die folgendermaßen definiert sind:

$$x_d = \frac{\Delta m_{B_d^0}}{\Gamma_{B_d^0}}\,, \quad y_d = \frac{\Delta\Gamma_{B_d^0}}{2\Gamma_{B_d^0}}\,. \qquad (1.34)$$

Für die B_d^0-Mesonen erwartet man, dass

$$\frac{\Delta\Gamma_{B_d^0}}{\Gamma_{B_d^0}} = \mathcal{O}\left(10^{-2}\right) \qquad (1.35)$$

und daher die Differenz der Lebensdauern vernachlässigbar klein ist, obwohl $\Delta\Gamma_{B_d^0}$ bisher noch nicht gemessen worden ist [Bur 97]. Durch den experimentellen Nachweis der B_d^0-$\overline{B_d^0}$-Mischung [Alb 87] kann die Massendifferenz bestimmt werden, der aktuelle Mittelwert verschiedener Einzelmessungen beträgt [Gro 00]:

$$x_d = 0{,}73 \pm 0{,}03\,. \qquad (1.36)$$

1.1.4 CP-Verletzung im System der B_d^0-Mesonen

In Systemen neutraler Mesonen, die hier als P^0-Mesonen bezeichnet werden, kann sich CP-Verletzung auf drei verschiedene Arten manifestieren. $A = \langle f|H|P^0\rangle$ und $\bar{A} = \langle \bar{f}|H|\overline{P^0}\rangle$ seien die Zerfallsamplituden für die Prozesse $P^0 \to f$ und $\overline{P^0} \to \bar{f}$.

1. **CP-Verletzung im Zerfall**

   CP-Verletzung im Zerfall, auch als direkte CP-Verletzung bezeichnet, liegt vor, falls $|\bar{A}/A| \neq 1$.

2. **CP-Verletzung in der Teilchen-Antiteilchen-Mischung**

   CP-Verletzung in der Teilchen-Antiteilchen-Mischung tritt auf, falls die Masseneigenzustände der neutralen Mesonen (vergleiche (1.30),(1.31)) keine CP-Eigenzustände sind, d.h. $|q/p| \neq 1$. Man bezeichnet dies auch als indirekte CP-Verletzung.

3. **CP-Verletzung durch Interferenz zwischen Zerfall und Mischung**

   Man betrachte den Zerfall neutraler Mesonen in einen CP-Eigenzustand f_{CP}:

$$\mathrm{P}^0 \to f_{CP} \quad \text{mit} \quad A = \langle f_{CP}|H|\mathrm{P}^0\rangle\,, \tag{1.37}$$

$$\overline{\mathrm{P}^0} \to f_{CP} \quad \text{mit} \quad \bar{A} = \langle f_{CP}|H|\overline{\mathrm{P}^0}\rangle\,. \tag{1.38}$$

   Definiert man die Größe $\lambda_{f_{CP}}$ wie folgt

$$\lambda_{f_{CP}} = \frac{q}{p} \cdot \frac{\bar{A}}{A}\,, \tag{1.39}$$

   so bedingt $\lambda_{f_{CP}} \neq 1$ CP-Verletzung. Direkte ($|\bar{A}/A| \neq 1$) und indirekte ($|q/p| \neq 1$) CP-Verletzung implizieren $|\lambda_{f_{CP}}| \neq 1$, aber sie sind keine notwendige Voraussetzung, um die schwächere Bedingung $\lambda_{f_{CP}} \neq 1$ zu erfüllen, z.B. in der Form:

$$|\lambda_{f_{CP}}| = 1\,, \quad \mathcal{I}m\,(\lambda_{f_{CP}}) \neq 0\,. \tag{1.40}$$

   Im Falle von CP-Verletzung ergibt sich eine zeitabhängige Asymmetrie in den Zerfallsraten von P^0 und $\overline{\mathrm{P}^0}$ Mesonen in den Endzustand f_{CP}:

$$\mathcal{A}_{f_{CP}}(t) = \frac{\Gamma(\mathrm{P}^0(t) \to f_{CP}) - \Gamma(\overline{\mathrm{P}^0}(t) \to f_{CP})}{\Gamma(\mathrm{P}^0(t) \to f_{CP}) + \Gamma(\overline{\mathrm{P}^0}(t) \to f_{CP})} \tag{1.41}$$

$$= \frac{(1 - |\lambda_{f_{CP}}|^2)\cos(\Delta M t) - 2\mathcal{I}m\,(\lambda_{f_{CP}})\sin(\Delta M t)}{1 + |\lambda_{f_{CP}}|^2}\,, \tag{1.42}$$

   wobei ΔM den Massenunterschied der beiden Masseneigenzustände bezeichnet. Für $|\lambda_{f_{CP}}| = 1$ ergibt sich die Asymmetrie zu:

$$\mathcal{A}_{f_{CP}}(t) = -\mathcal{I}m\,(\lambda_{f_{CP}})\sin(\Delta M t)\,. \tag{1.43}$$

Für den goldenen Zerfall $\mathrm{B}_d^0 \to \mathrm{J}/\psi \mathrm{K}_\mathrm{S}^0$ stellt der Endzustand einen CP-Eigenzustand mit dem Eigenwert $\eta_{CP} = -1$ dar. Für $\lambda_{f_{CP}}$ findet man:

$$\lambda_{f_{CP}} = \eta_{CP} \cdot \frac{V_{cb}V_{cs}^*}{V_{cb}^*V_{cs}} \cdot \frac{V_{tb}^*V_{td}}{V_{tb}V_{td}^*} \cdot \frac{V_{cs}V_{cd}^*}{V_{cs}^*V_{cd}} \tag{1.44}$$

Der erste Quotient beschreibt den Zerfall eines B_d^0-Mesons, der zweite die Mischung der neutralen B_d^0-Mesonen und der dritte die Mischung der K^0-Mesonen im Endzustand. Durch eine Umformung von (1.44) folgt:

$$\lambda_{f_{CP}} = \eta_{CP} \cdot \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} \Big/ \left(\frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} \right)^* = -e^{-2i\beta} \quad \text{mit} \tag{1.45}$$

$$\eta_{CP} = -1 \quad \text{und} \quad \beta = \arg\left(-\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right) \ \text{(vgl.1.24)}.$$

Damit ergibt sich für die zeitabhängige Asymmetrie:

$$\mathcal{A}_{f_{CP}}(t) = -\mathcal{I}m\,(\lambda_{f_{CP}}) \sin(\Delta M t) = -\sin(2\beta)\sin(\Delta M t)\,. \tag{1.46}$$

Die Asymmetrie wird also durch eine Sinusfunktion mit der Periodendauer $2\pi/\Delta M$ und einer Amplitude vom Betrag $\sin(2\beta)$ beschrieben.

Neue Resultate für den Wert von $\sin(2\beta)$ weisen die Verletzung der CP-Symmetrie im System der B_d^0-Mesonen nach:

$$\sin(2\beta) = 0{,}59 \pm 0{,}14\,(\text{stat.}) \pm 0{,}05\,(\text{syst.}) \quad [\text{Aub } 01]\ , \tag{1.47}$$

$$\sin(2\beta) = 0{,}99 \pm 0{,}14\,(\text{stat.}) \pm 0{,}06\,(\text{syst.}) \quad [\text{Abe } 01]\ . \tag{1.48}$$

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse zweier weiterer Experimente [Bar 00, Aff 00] ergibt sich als experimenteller Mittelwert [Ols 01]:

$$\sin(2\beta) = 0{,}79 \pm 0{,}10\,. \tag{1.49}$$

Durch eine Anpassungsrechnung ergibt aus sich aus verschiedenen Einzelmessungen von CKM-Parametern ein Wert von [Mel 01]:

$$\sin(2\beta) = 0,73 \pm 0,07\,. \tag{1.50}$$

Im Rahmen der Unsicherheiten stimmen das experimentelle Resultat und die Vorhersage des Standardmodells überein.

1.2 Weitere Physikziele des HERA – B Experimentes

Die Fertigstellung des HERA – B Detektors verzögerte sich gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan aufgrund von unvorhergesehenen technischen Problemen bei dem Bau und der Inbetriebnahme der Spurdetektoren und des Triggersystems infolge der besonderen Anforderungen durch die hohen Teilchenflüsse im HERA – B Experiment. Einige wichtige Komponenten des Experimentes konnten bisher noch nicht mit ihrer geplanten Leistungsfähigkeit betrieben werden. Dies und die Tatsache, dass die auf Gebiet der B-Meson-Physik konkurrierenden Experimente an den B-Fabriken der e^+e^--Speicherringe schnell und erfolgreich in Betrieb genommen wurden, hat es notwendig werden lassen, die Prioritäten des Physikprogramms für die Datennahmeperiode des Jahres 2002 neu zu definieren [HER 00a, HER 00c, HER 01]. Einige der angestrebten Messungen werden im Folgenden erläutert.

1.2.1 Messung des Produktionswirkungsquerschnitts $\sigma_{b\bar{b}}$

Die Messung des Produktionswirkungsquerschnitts $\sigma_{b\bar{b}}$ in Proton-Nukleon-Reaktionen erlaubt es, die Vorhersagen der perturbativen QCD zur Produktion schwerer Quarks nahe der Schwelle zur Erzeugung von $b\bar{b}$-Paaren zu testen [Bon 98]. Desweiteren ist die genaue Kenntnis von $\sigma_{b\bar{b}}$ wichtig, um das Potential des HERA – B Experimentes auf dem Gebiet der B-Hadron-Physik abschätzen zu können.

Es liegen zwei Messungen von $\sigma_{b\bar{b}}$ in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen vor, jeweils bei einem Protonstrahlimpuls von 800 GeV/c. Die Messung des Experiments E789 beruht auf der Analyse von inklusiven Zerfällen $b \to J/\psi\, X \to \ell^+\ell^-\, X$. Als Resultat dieser Messung wurde für $\sigma_{b\bar{b}}$ ein Wert von

$$(5{,}7 \pm 1{,}5\,(\mathrm{stat.}) \pm 1{,}3\,(\mathrm{syst.}))\ \mathrm{nb/Nukleon} \tag{1.51}$$

bestimmt [Jan 95]. Die zweite Messung stammt vom Experiment E771 [Ale 99], in dem zusätzlich Ereignisse betrachtet wurden, in denen beide b-Quarks semimyonisch zerfallen: $b\bar{b} \to \mu^+\mu^- X$. Das Ergebnis dieser Messung ergab einen Wirkungsquerschnitt von

$$\left(43^{+27}_{-17}\,(\mathrm{stat.})\ \pm 7\,(\mathrm{syst.})\right)\ \mathrm{nb/Nukleon}\ . \tag{1.52}$$

Die Resultate beider Experimente sind mit großen Unsicherheiten behaftet und weichen um etwa 2,3 σ voneinander ab. In Abbildung 1.3 sind die Resultate dieser Messungen zusammen mit Ergebnissen aus Pion-Nukleon-Streuexperimenten dargestellt. Die theoretischen Vorhersagen im Rahmen der QCD für die Wirkungsquerschnitte der beiden Prozesse sind ebenfalls gezeigt. Auch diese weisen große Unsicherheiten auf.

Das HERA – B Experiment bietet die Möglichkeit, $\sigma_{b\bar{b}}$ sowohl durch die Analyse inklusiver und semileptonischer B-Zerfälle, als auch durch die Rekonstruktion exklusiver Zerfallskanäle von B-Hadronen zu bestimmen. Dabei wird insgesamt eine Präzision von etwa 30 % erwartet. Außerdem kann der Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Massenzahl der aus verschiedenen Materialien bestehenden Targetdrähte gemessen werden.

1.2.2 Charmonium-Produktion und nukleare Unterdrückung

Es existieren verschiedene theoretische Modelle zur Beschreibung der Quarkoniumproduktion. Die Vorhersagen der Modelle stimmen jedoch nicht in allen Bereichen mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Die Produktion schwerer Charmoniumzustände wie z.B. J/ψ, ψ' und χ_c ist in Proton-Kern-Wechselwirkungen relativ zur Produktion in Proton-Proton-Wechselwirkungen unterdrückt. Dieser Effekt wird als nukleare Unterdrückung bezeichnet und wie folgt parametrisiert:

$$\sigma(c\bar{c})_{\mathrm{pA}} = \sigma(c\bar{c})_{\mathrm{pp}} \cdot A^{\alpha}\ , \qquad \alpha = \alpha(x_{\mathrm{F}}, p_{\mathrm{T}})\ . \tag{1.53}$$

Dabei stellt $\sigma(c\bar{c})_{\mathrm{pp}}$ den Wirkungsquerschnitt für die Produktion in Proton-Proton-Wechselwirkungen und $\sigma(c\bar{c})_{\mathrm{pA}}$ den Wirkungsquerschnitt für die Produktion in Proton-Kern-Wechselwirkungen dar. A ist die Massenzahl des Targetkerns. Der Parameter α beschreibt die nukleare

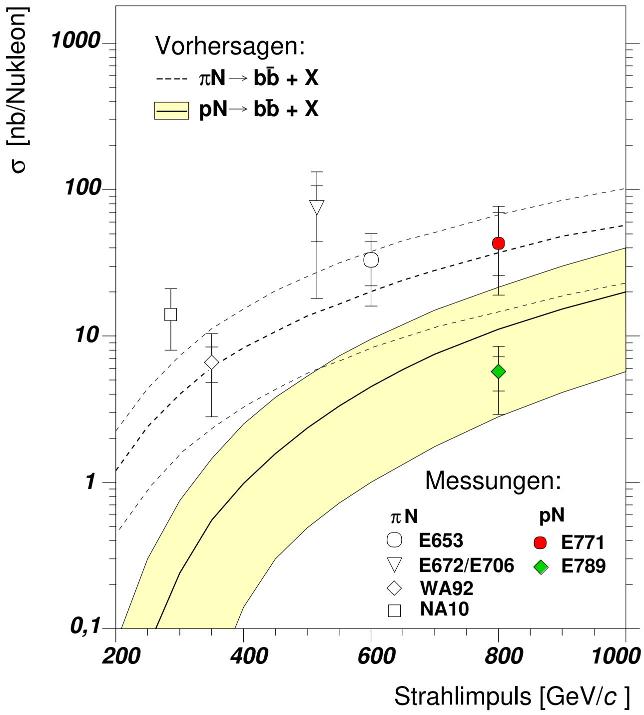


Abbildung 1.3: *Wirkungsquerschnitt* $\sigma_{\mathrm{b\bar{b}}}$ *in Pion-Nukleon- und Proton-Nukleon-Wechselwirkungen als Funktion des Strahlimpulses (nach [Ale 99]).*

Unterdrückung und ist eine Funktion des Transversalimpulses p_{T} und der Feynman-Variable x_{F}. Diese ist ein Maß für den longitudinalen Impuls eines Teilchens und ist als

$$x_{\mathrm{F}} = \frac{p_z}{p_z^{max}} \tag{1.54}$$

definiert. Verschiedene theoretische Modelle wurden zur Beschreibung der nuklearen Unterdrückung entwickelt. Diese liefern unterschiedliche Vorhersagen für die Abhängigkeit des Parameters α von x_{F}, wie in Abbildung 1.4 dargestellt ist. Der gezeigte Verlauf von $\alpha(x_{\mathrm{F}})$ wurde für diverse Charmoniumzustände im Rahmen von drei verschiedenen Modellen berechnet [Vog 01]. Dabei wurde der Impuls des HERA-Protonstrahls zugrunde gelegt.

Im Vergleich zu existierenden Messungen anderer Experimente verzeichnet HERA – B einige Vorteile:

- Das HERA – B Experiment besitzt eine große Akzeptanz im Zentralbereich, $-0{,}4 \leq x_{\mathrm{F}} \leq 0{,}3$, während die bisher vorliegenden Daten auf den Bereich positiver Werte von x_{F} beschränkt sind. Wie in Abbildung 1.4 zu erkennen, unterscheiden sich die Vorhersagen der verschiedenen Modelle vor allem im Bereich negativer x_{F}-Werte.

- Die nukleare Unterdrückung kann gleichzeitig für verschiedene Charmoniumzustände wie J/ψ, ψ' und χ_{c} untersucht werden.

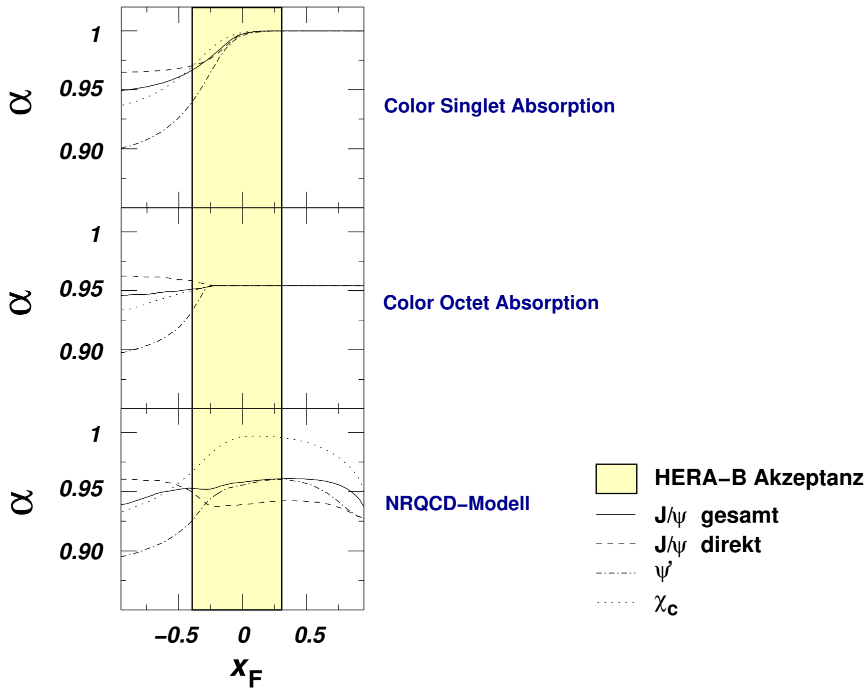


Abbildung 1.4: *Vorhersagen zur Abhängigkeit der nuklearen Unterdrückung für Charmoniumzustände von x_F (nach [Vog 01]). Die Berechnungen wurden im Rahmen der angegebenen Modelle jeweils für einen Protonstrahlimpuls von $920\,\mathrm{GeV}/c$ durchgeführt. Hervorgehoben ist der x_F-Bereich, der der Akzeptanz des HERA – B Detektors entspricht.*

- Die gleichzeitige Verwendung mehrerer Targetdrähte aus verschiedenen Materialien bietet den Vorteil, dass sich bei einer relativen Messung Korrekturfaktoren für die Detektorakzeptanz und -effizienz in guter Näherung herausheben.

1.2.3 Untersuchung von Drell-Yan-Prozessen

Die direkte Erzeugung eines Leptonpaares ($\mathrm{e^+e^-}$, $\mu^+\mu^-$) aus der Vernichtung eines Quark-Antiquark-Paares wird als Drell-Yan-Prozess bezeichnet [Dre 70]. Wegen des rein hadronischen Anfangszustands sind QCD-Effekte von Bedeutung, so dass die Untersuchung dieses Prozesses eine Überprüfung der Vorhersagen der QCD erlaubt. Die folgende Winkelverteilung für die Leptonen im Endzustand leitet sich aus Betrachtungen im Rahmen der perturbativen QCD ab:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} \propto 1 + \lambda \cos^2\theta + \mu \sin 2\theta \cos\phi + \frac{\nu}{2} \sin^2\theta \cos 2\phi\,. \tag{1.55}$$

Dabei ist θ der Polarwinkel zwischen dem positiv geladenen Lepton und der z-Achse im Ruhesystem des virtuellen Photons und ϕ der Azimuthalwinkel relativ zur Ebene, die durch die Impulsvektoren des Protons und des Nukleons definiert wird [Col 77]. Die Parameter λ, μ und ν beschreiben die grundlegende Partondynamik, wobei die Lam-Tung-Relation gilt

[Lam 78, Lam 80]:

$$\lambda = 1 - 2\nu\,. \tag{1.56}$$

Experimentell wurde gezeigt, dass die Relation (1.56) in Pion-Nukleon-Streuung für große Werte des Transversalimpulses des virtuellen Photons verletzt ist [Fal 86, Con 89]. Es existieren verschiedene theoretische Modelle, die die beobachteten Abweichungen erklären können. Die vorhandenen Daten lassen eine eingehende Überprüfung dieser Modelle bisher nicht zu. Die Möglichkeiten des HERA – B Experimentes – mit seiner im Vergleich zu den bisherigen Experimenten größeren Akzeptanz und Auflösung –, signifikante Messungen im Bereich der Drell-Yan-Physik durchzuführen, wurden eingehend untersucht [Gra 01, Hus 01b].

1.2.4 Untersuchungen von Charm-Mesonen

Die Untersuchung des Zerfalls $\mathrm{D}^0 \to \mu^+\mu^-$ stellt einen sensitiven Test des Standardmodells dar, welches ein Verzweigungsverhältnis von $\mathcal{O}(10^{-19})$ vorhersagt [HER 00a, HER 00c]. Aufgrund derzeitiger Daten ist das Verzweigungsverhältnis kleiner als $4{,}1 \cdot 10^{-6}$ auf einem Vertrauensniveau von 90 % [Ada 97]. Wegen der klaren experimentellen Signatur des leptonischen Endzustandes bietet dieser Zerfall die Möglichkeit, nach Hinweisen auf physikalische Prozesse jenseits des Standardmodells zu suchen, die sich in einer signifikanten Erhöhung des Verzweigungsverhältnisses gegenüber dem oben angegebenen Wert bemerkbar machen würden.

Für das System der neutralen D-Mesonen sagt das Standardmodell sehr kleine Differenzen der Massen und Lebensdauern der Masseneigenzustände voraus: $x_D\,,\ y_D \simeq 10^{-4} \ldots 10^{-3}$ [Big 01]. Die Suche nach D^0-$\overline{\mathrm{D}^0}$-Oszillationen erlaubt es, diese Vorhersage des Standardmodells zu überprüfen. Nach CP-verletzenden Effekten im System der neutralen D-Mesonen kann durch die Analyse der Zerfallsraten in den Zerfallskanälen $\mathrm{D}^0(\overline{\mathrm{D}^0}) \to \mathrm{K}^+\mathrm{K}^-$ und $\mathrm{D}^0(\overline{\mathrm{D}^0}) \to \mathrm{K}^-\pi^+(\mathrm{K}^+\pi^-)$ gesucht werden [HER 00c].

Kapitel 2

Das HERA – B Experiment

Das HERA – B Experiment ist eines von vier Experimenten am HERA[1]-Speicherring des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg. Es wurde mit dem Hauptziel der Untersuchung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen errichtet. Die B-Mesonen werden in hadronischen Wechselwirkungen von Protonen aus dem HERA-Protonstrahl mit einem Drahttarget erzeugt. Damit verfolgt HERA – B einen anderen Ansatz als die Experimente BaBar am SLAC[2] [Bou 95] und BELLE am KEK[3] [Che 95], die sich ebenfalls hauptsächlich der Untersuchung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen widmen. Dort verwendet man jeweils asymmetrische Elektron-Positron-Speicherringe, um zunächst die $\Upsilon(4S)$-Resonanz zu erzeugen, die dann mit einem Verzweigungsverhältnis von mehr als 96 % [Gro 00] in Paare von B-Mesonen zerfällt.

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über den HERA-Speicherring und das HERA – B Experiment. Die einzelnen Detektorkomponenten sowie das Datennahme- und Triggersystem werden beschrieben.

2.1 Der HERA-Speicherring und die HERA-Experimente

HERA ist ein Speicherring mit einem Umfang von 6,3 km, in dem Protonen mit Elektronen bzw. Positronen zur Kollision gebracht werden. Die beiden Teilchenstrahlen befinden sich in separaten Strahlrohren. Nachdem sie ein Vorbeschleunigersystem durchlaufen haben, werden die Protonen in den HERA-Ring eingefüllt und bis zu einer Endenergie von 920 GeV beschleunigt und gespeichert. Während im Protonring supraleitende Dipolmagnete mit einer Flussdichte von 5,4 T verwendet werden, besitzt der Elektronring normalleitende Magnete und speichert die Elektronen bzw. Positronen mit einer Energie von 27,5 GeV. Die HERA-Teilchenstrahlen sind in Pakete unterteilt, die man als Bunche (engl.: Bündel) bezeichnet. Der zeitliche Abstand zwischen je zwei aufeinander folgenden Paketen beträgt 96 ns, was einer Taktfrequenz von 10,4 MHz entspricht. Der Protonspeicherring fasst insgesamt 220 Pakete,

[1]Hadron-Elektron-Ring-Anlage.
[2]Stanford Linear Accelerator Center,Stanford, USA.
[3]High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.

von denen allerdings nur 180 mit Protonen gefüllt sind, was im Füll- und Extraktionsmechanismus begründet liegt. Somit ergibt sich eine mittlere Rate für die gefüllten Protonpakete von

$$R_p = \frac{180}{220} \cdot 10{,}4\,\mathrm{MHz} = 8{,}5\,\mathrm{MHz}\,. \tag{2.1}$$

Abbildung 2.1 zeigt den HERA-Speicherring sowie die Vorbeschleunigersysteme. An zwei Punkten werden die beiden Teilchenstrahlen zur Kollision gebracht. Dort befinden sich die Experimente H1 [Abt 97] und Zeus [ZEU 93], welche hauptsächlich die Protonstruktur und Effekte der starken Wechselwirkung in tiefinelastischer Elektron-Proton-Streuung bei einer Schwerpunktsenergie von etwa 300 GeV untersuchen. Das HERMES-Experiment [HER 93]

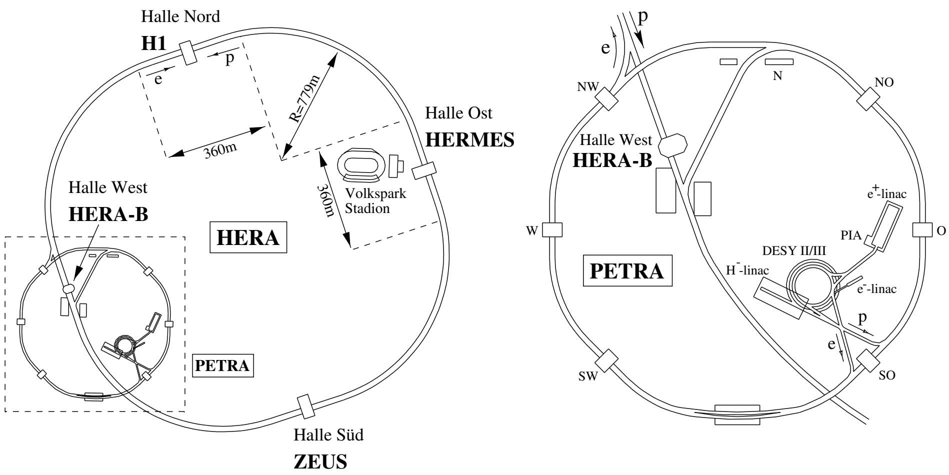


Abbildung 2.1: *Schematische Darstellung des HERA-Speicherrings (linkes Bild) [DES 00]. Der markierte Bereich zeigt die Vorbeschleunigersysteme und ist im rechten Bild vergrößert dargestellt.*

analysiert die Spinstruktur von Protonen und Neutronen. Dazu nutzt es den spinpolarisierten Elektronstrahl des HERA-Speicherrings, der mit optional polarisierten Wasserstoff- bzw. Heliumkernen wechselwirkt.

Als viertes HERA-Experiment wurde das HERA – B Experiment zur Untersuchung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen vorgeschlagen und errichtet. Die B-Mesonen werden in Kollisionen der Protonen des HERA-Protonstrahls mit Target-Drähten (target: engl. für Ziel), die sich innerhalb des Protonstrahlrohres befinden, erzeugt. Die Schwerpunktsenergie der Proton-Nukleon-Wechselwirkungen beträgt 41,6 GeV, der Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\mathrm{b\bar{b}}}$ für die Produktionsreaktion

$$\mathrm{p} + \mathrm{N} \rightarrow \mathrm{b}\,\bar{\mathrm{b}} + \mathrm{X} \tag{2.2}$$

ist allerdings nicht genau bekannt. Wie in Abschnitt 1.2.1 dargelegt, sind sowohl die theoretischen Vorhersagen als auch die bisherigen Messungen jeweils mit großen Unsicherheiten behaftet. Während der Entwurfsphase des HERA – B Experimentes wurde für Studien ein Wert von $\sigma_{\mathrm{b\bar{b}}} = 12\,\mathrm{nb}$ verwendet. Das Verhältnis zum gesamten inelastischen Wirkungsquerschnitt beträgt bei dieser Schwerpunktsenergie $\sigma_{\mathrm{b\bar{b}}}/\sigma_{inelast.} \approx 10^{-6}$, so dass im Mittel nur in einer von einer Million inelastischer Proton-Nukleon-Wechselwirkungen ein $\mathrm{b\bar{b}}$-Quarkpaar erzeugt wird. Für eine statistisch signifikante Messung der Größe $\sin(2\beta)$ durch die Untersuchung der Asymmetrie in den Zerfällen $\mathrm{B}_d^0\,(\overline{\mathrm{B}_d^0}) \rightarrow \mathrm{J}/\psi\,\mathrm{K}_S^0$ benötigt man unter Berücksichtigung aller Verzweigungsverhältnisse sowie der Detektorakzeptanz und der Trigger- und Rekonstruktionseffizienzen etwa $5 \cdot 10^{14}$ primäre inleastische Wechselwirkungen pro Jahr. Bei einer angenommenen Datennahmezeit von 10^7 s pro Jahr entspricht dies einer erforderlichen Wechselwirkungsrate von etwa 50 MHz. Die für das HERA – B Experiment geplante Wechselwirkungsrate beträgt 40 MHz. Da die Protonpakete mit einer mittleren Rate von 8,5 MHz auf das Drahttarget treffen, müssen im Mittel 4,7 inelastische Wechselwirkungen überlagert bei einem Protonpaketdurchgang stattfinden, um die erforderliche Gesamtwechselwirkungsrate zu erzielen.

2.2 Der Aufbau des **HERA – B** Experimentes

Der HERA – B Detektor ist ein Vorwärtsspektrometer mit einer Gesamtlänge von ca. 20 m, dessen geometrische Akzeptanz in der Vertikalen 10 bis 160 mrad und in der Horizontalen 10 bis 220 mrad beträgt, was im Schwerpunktsystem 90 % des gesamten Raumwinkels entspricht. Aufsicht und Seitenansicht des Detektors sind in Abbildung 2.2 gezeigt. Das dort dargestellte

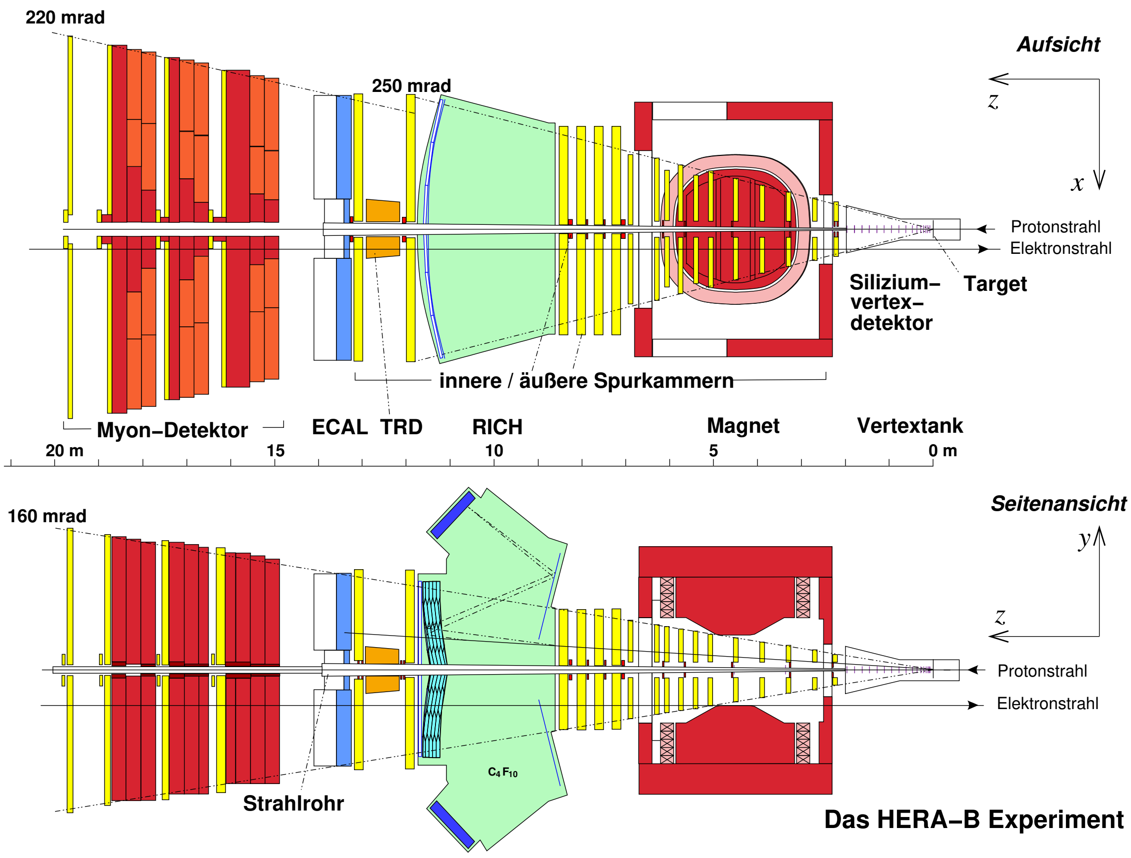


Abbildung 2.2: *Der HERA – B Detektor in der Aufsicht und Seitenansicht (nach [Pyr 97]).*

rechtshändige Koordinatensystem ist dadurch festgelegt, dass die z-Achse in die Flugrichtung der Protonen und die x-Achse auf die Innenseite des HERA-Ringes zeigt.

Sowohl das Proton- als auch das Elektronstrahlrohr des HERA-Speicherringes werden durch den HERA – B Detektor hindurchgeführt. Das Drahttarget befindet sich zusammen mit dem Siliziumvertexdetektor in einem Vakuumtank. Der Vertexdetektor dient dazu, primäre und sekundäre Vertizes mit hoher Präzision zu lokalisieren. Daran schließt sich ein System von Spurkammern zur Rekonstruktion der Flugbahnen geladener Teilchen an. Aus der Krümmung der Teilchenspuren im Feld eines Dipolmagneten, das in y-Richtung verläuft, lassen sich die Teilchenimpulse bestimmen. Der Teilchenidentifikation dient das Ringbild-Čerenkov-Hodoskop (RICH) wie auch der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD). Im elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL) werden die Energien und Positionen von Elektronen und Photonen gemessen. Teilchen, die sowohl das Kalorimeter als auch mehrere Lagen massiver Absorber durchdringen, werden im Myon-Detektor nachgewiesen.

Die einzelnen Detektorkomponenten werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

Das Targetsystem

Das in Abbildung 2.3 schematisch dargestellte Targetsystem des HERA – B Experimentes, ist aus zwei Stationen mit jeweils vier Drähten aufgebaut. Die Drähte können unabhängig voneinander mit Hilfe einer Steuermechanik transversal zum Protonstrahl bewegt werden, wodurch die Zahl der auf den einzelnen Drähten stattfindenden Wechselwirkungen variiert werden kann. Die Verwendung von Drähten aus verschiedenen Materialien, wie beispielsweise Aluminium, Kohlenstoff, Titan und Wolfram, ermöglicht die Untersuchung nuklearer Effekte in bestimmten physikalischen Prozessen. Eine wesentliche Anforderung (nach [Spr 00]) an das HERA – B Targetsystem besteht darin, die Wechselwirkungsrate möglichst konstant zu halten bei einem gleichmäßigen Beitrag aller HERA-Protonpakete zur Gesamtwechselwirkungsrate. Weiterhin sollen die Vertizes der primären Wechselwirkungen signifikant voneinander getrennt sein, um die vollständige und eindeutige Rekonstruktion eines Ereignisses zu ermöglichen. Der Betrieb der anderen HERA-Experimente soll durch die Operation der HERA – B Targetdrähte möglichst wenig beeinflusst werden. Mit Hilfe eines automatischen Steuer- und Kontrollsystems wurde ein sicherer und den oben genannten Anforderungen gerecht werdender Betrieb des HERA – B Targets realisiert [İşs 01].

Der Vertexdetektor

Der Vertexdetektor hat die Aufgabe, die Raumpunkte der primären und sekundären Vertizes zu rekonstruieren. Darüber hinaus erlaubt der Vertexdetektor eine von anderen Spurdetektoren unabhängige Spurmustererkennung in einem Winkelbereich von 10 bis 250 mrad. Um diese Akzeptanz zu erzielen, müssen die Detektoren bis zu einem minimalen Abstand von 10 mm zum Protonstrahl positioniert werden. In dieser Distanz vom Strahl beträgt der Teilchenfluss bei einer nominellen Wechselwirkungsrate von 40 MHz etwa $3 \cdot 10^7\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$. Das entspricht einer im Laufe eines Betriebsjahres von 10^7 Sekunden akkumulierten Dosis von 100 kGy [Har 95]. Somit ist der Einsatz einer hinreichend strahlungsresistenten Technologie

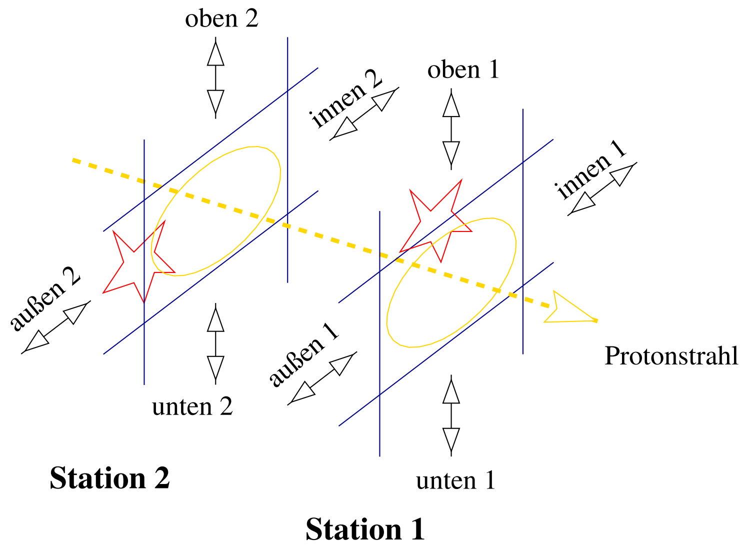


Abbildung 2.3: *Schematische Darstellung des HERA – B Targets [İşs 01]. Die Station 1 befindet sich näher am Detektor. Die Bezeichnung der Drähte ist ebenso dargestellt wie auch die Bewegungsrichtung der einzelnen Drähte durch die Doppelpfeile.*

erforderlich, die den Betrieb der Detektormodule über einen Zeitraum von einem Jahr ohne signifikante Beeinträchtigung ihrer Funktion erlaubt.

Insgesamt besteht der Vertexdetektor aus 64 doppelseitigen Siliziumstreifendetektoren, angeordnet in acht Superlagen mit jeweils acht Detektormodulen pro Superlage. Die ersten sieben Superlagen befinden sich in einem Sekundärvakuum einer Roman-Pot-Struktur innerhalb des evakuierten Vertextankes, während die achte Superlage unmittelbar hinter dem Austrittsfenster des Vertextankes in einem Abstand von ca. 2 m vom Target positioniert ist. Die einzelnen Detektormodule besitzen eine aktive Fläche von $50 \times 70\,\mathrm{mm}^2$ und eine Dicke von $280\,\mu$m. Der Streifenabstand beträgt ca $25\,\mu$m, wobei jeder zweite Streifen mit der Ausleseelektronik verbunden ist. Pro Quadrant sind jeweils zwei Detektormodule so angeordnet, dass ihre Streifen einen Stereowinkel von $\pm 2{,}5^\circ$ mit der x- bzw. y-Achse bilden. Die gemessene Vertexauflösung beträgt etwa $80\,\mu$m transversal zum Strahl und $600\,\mu$m in longitudinaler Richtung [Bau 00], wobei zur Vertexrekonstruktion ausschließlich Informationen des Vertexdetektorsystems verwendet wurden.

Das Spurkammersystem

Das Spurkammersystem schließt sich an den Vertexdetektor an und dient der Mustererkennung, Spurrekonstruktion und Impulsbestimmung geladener Teilchen. Darüber hinaus werden Teile des Spurkammersystems innerhalb des Triggersystems verwendet. Das Spurkammersystem besteht aus einem normalleitenden Spektrometerdipolmagneten mit einem Feldintegral von 2,2 Tm sowie mehreren Stationen von Spurkammern. Dabei werden unterschiedliche Detektortechnologien im inneren und äußeren Bereich verwendet, die im Folgenden beschrieben werden.

Die inneren Spurkammern

Der hohe Teilchenfluss im strahlnahen Bereich stellt Anforderungen an die ortsauflösenden Detektoren, die mit klassischen Drahtkammern nicht erfüllt werden können. Zum einen wird eine hohe Granularität benötigt, um die Belegung der Detektorkanäle auf ein Maß zu begrenzen, welches eine effiziente Mustererkennung erlaubt. Zum anderen verlangt der hohe Teilchenfluss eine hinreichend strahlungsresistente Detektortechnologie. Die folgenden Anforderungen werden an die Detektoren des inneren Spurkammersystems gestellt [Zeu 00]:

- Die Ortsauflösung in x-Richtung soll besser als $100\,\mu$m und in y-Richtung besser als 1 mm sein.
- Die Nachweiseffizienz einer Einzellage soll größer als 95 % sein.
- Ein stabiler Betrieb bis zu Raten von $10^4\,\mathrm{mm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ minimal ionisierender Teilchen soll gewährleistet sein.
- Die Belegung der Detektorkanäle soll $\leq 5\,\%$ betragen.
- Die Detektoren sollen einer maximalen jährlichen Strahlendosis von 1 Mrad standhalten.

Im HERA – B Experiment werden im inneren Spurdetektor (ITR: Inner Tracker) Mikrostreifenkammern (MSGC: Micro Strip Gaseous Chamber) verwendet. Mittels lithographischer Strukturierung werden auf einem Glassubstrat nebeneinander liegende Anoden- und Kathodenstreifen mit einer Breite von $10\,\mu$m bzw. $170\,\mu$m erzeugt, wobei der Abstand der Anodenstreifen $300\,\mu$m beträgt. Um eine Beschädigung und Zerstörung der Detektoren beim Betrieb im HERA – B Experiment zu vermeiden, wurde eine perforierte GEM-Folie (Gas Electron Multiplier) [Sau 97] in den Driftraum eingefügt, an der eine erste Ladungsverstärkung stattfindet. Dadurch kann die Anodenhochspannung für die zweite Ladungsverstärkung reduziert werden und damit auch die Wahrscheinlichkeit von Überschlägen zwischen Anoden- und Kathodenstreifen.

Der innere Spurdetektor erstreckt sich über zehn Superlagen und deckt einen Winkelbereich von 10 bis 100 mrad ab. Das entspricht einem radialen Abstand vom Strahl von 6 bis 30 cm. Um eine räumliche Rekonstruktion von Trefferpunkten zu ermöglichen, werden die Detektormodule so angeordnet, dass die Elektrodenstreifen parallel bzw. unter einem Winkel von $\pm 5°$ zur Vertikalen verlaufen.

In bisherigen Untersuchungen ergaben sich für die Nachweiseffizienz verschiedener Einzellagen Werte oberhalb von 90 % [Bag 01]. Die Methoden zur Bestimmung der Ortsauflösung werden beeinflusst von Unsicherheiten der Detektorpositionierung. Als konservative Abschätzung der Ortsauflösung in x-Richtung wird ein Wert von $200\,\mu$m angenommen, wobei bei hinreichend guter Detektorpositionierung ein Wert von etwa $100\,\mu$m bestimmt wurde [Zeu 01].

Die äußeren Spurkammern

Im äußeren Bereich des Spurkammersystems (OTR: Outer Tracker) werden Driftkammern mit geschlossenen Driftzellen mit einem hexagonalen Querschnitt verwendet [Ste 00]. Die insgesamt 13 Superlagen des OTR variieren in ihrer Größe von $0{,}9 \times 0{,}6\,\mathrm{m}^2$ am Eingang des Magneten bis zu $6{,}5 \times 4{,}6\,\mathrm{m}^2$ in der letzten Detektorlage, die sich unmittelbar vor dem Kalorimeter befindet. Im Abstand von ca. 20-50 cm vom Strahl beträgt der Durchmesser der Driftzellen 5 mm, für größere Abstände werden Driftzellen mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet. Die Anodendrähte bestehen aus Wolfram, sie sind mit Gold beschichtet und besitzen eine Dicke von $25\,\mu$m. Die Kathoden werden aus einer Kohlenstoff-haltigen $75\,\mu$m dicken Polykarbonatfolie geformt, auf die zur Verbesserung der Leitfähigkeit eine 90 nm dicke Goldschicht aufgebracht ist. Als Driftgas wird eine Mischung aus $Ar/CF_4/CO_2$ im Verhältnis $65 : 30 : 5$ verwendet. Eine Ortsauflösung von ca. $200\,\mu$m senkrecht zum Anodendraht wird angestrebt. Die gemessene mittlere Auflösung liegt bei $(600 \pm 50)\,\mu$m für die 5 mm-Module bzw. $(700 \pm 50)\,\mu$m für die 10 mm-Module. Sie setzt sich aus der tatsächlichen intrinsischen Ortsauflösung ($(350 \pm 50)\,\mu$m für die 5 mm-Module) sowie den Unsicherheiten aus der Kalibrierung und Positionierung der Detektormodule zusammen [HER 00a].

Die High-p_{T}-Kammern

Innerhalb des Magneten befinden sich drei Stationen mit Spurkammern, die ausschließlich im Triggersystem verwendet werden. Diese Kammern liefern die Trefferinformationen für eine spezielle Triggerelektronik, die Teilchenspuren mit hohen Transversalimpulsen selektieren soll. Die drei Kammerstationen des High-p_{T}-Systems [Bal 00] sind jeweils in einen inneren und äußeren Bereich unterteilt, in denen verschiedene Detektortechnologien eingesetzt werden. Gas-Pixel-Kammern im inneren Teil decken einen Winkelbereich von $10 < \theta_x < 58$ mrad in x-Richtung und von $10 < \theta_y < 44$ mrad in y-Richtung ab. Sie bestehen aus Pixelzellen mit einem rechteckigen Querschnitt und Zellgrößen von $4 \times 8\,\mathrm{mm}^2$ bis $8 \times 16\,\mathrm{mm}^2$. Die einzelnen Pixelzellen werden durch Potentialdrähte geformt, die ebenso wie die Anodendrähte, die sich im Zentrum einer jeden Pixelzelle befinden, in z-Richtung, also parallel zum Protonstrahlrohr, verlaufen. Im äußeren Bereich kommen Straw-Tube-Kammern zum Einsatz, die einen Winkel von $38 < \theta_x < 250$ mrad in x-Richtung und $44 < \theta_y < 143$ mrad in y-Richtung abdecken [HER 00a]. Diese Kammern bestehen aus einer Doppellage von Straw-Tubes und daran angebrachten Kathoden-Pads mit einer maximalen Größe von $32 \times 64\,\mathrm{mm}^2$.

Das Ringbild-Čerenkov-Hodoskop

Das Ringbild-Čerenkov-Hodoskop (RICH: Ring Imaging Cherenkov Hodoscope) dient der Teilchenidentifikation, wobei besonders der Identifikation von Kaonen und ihrer Separation von Pionen und Protonen eine große Bedeutung zukommt. Die physikalische Grundlage des RICH bildet der Čerenkoveffekt: Bewegen sich geladene Teilchen in einem Medium mit Brechungsindex n mit einer Geschwindigkeit $v > c/n$, so senden sie Licht unter einem charakteristischen Winkel θ_C, dem Čerenkovwinkel, relativ zur Flugrichtung aus, wobei gilt: $\cos\theta_C = c/(v \cdot n)$ [Kle 92]. Durch die Messung von θ_C lässt sich demnach die Geschwindigkeit v und bei bekanntem Impuls die Masse und somit die Identität eines Teilchens bestimmen.

Das Ringbild-Čerenkov-Hodoskop des HERA–B Experimentes [Ari 00] besteht aus einem Stahltank mit einem Volumen von $108\,\mathrm{m}^3$. Vor dem Austrittsfenster befinden sich zwei sphärische Spiegel mit einem Radius von 11,4 m, so dass die Kreismittelpunkte in einer Ebene nahe dem Target liegen. Die sphärischen Spiegel reflektieren das Čerenkovlicht auf ein System planarer Spiegel, von wo aus es schließlich auf Photondetektoren abgebildet und nachgewiesen wird.

Als Radiatorgas wird C_4F_{10} mit einem Brechungsindex $(n-1) = 1{,}53 \cdot 10^{-3}$ verwendet [Har 95]. Pionen mit einem Impuls größer als 2,7 GeV/c emittieren Čerenkovlicht, für Kaonen liegt der entsprechende Schwellenwert bei 9,6 GeV/c. Der Čerenkovwinkel für $\beta = 1$ beträgt 51,5 mrad, die Differenz des Čerenkovwinkels für Pionen und Kaonen 0,9 mrad bei einem Impuls von 50 GeV/c [Ari 00]. Bisherige Untersuchungen [Duj 00] zeigen, dass das RICH die Designanforderungen erfüllt. Die gemessene Einzelphotonwinkelauflösung liegt bei 0,7-1,0 mrad und die Identifikation und Trennung von Pionen und Kaonen ist möglich über einen Impulsbereich von 5 -50 GeV/c.

Der Übergangsstrahlungsdetektor

Der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD: Transition Radiation Detector) dient der Identifikation von Elektronen und ihrer Separation von Hadronen über einen Energiebereich von etwa 1 GeV bis 100 GeV [HER 00a]. Im inneren Bereich mit den höchsten Teilchenspurdichten ergänzt er die Teilchenidentifikation durch das elektromagnetische Kalorimeter.

Übergangsstrahlung tritt auf, wenn geladene Teilchen die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten durchqueren. Das an der Grenzfläche emittierte Licht ist auf der Mantelfläche eines Kegels mit dem Öffnungswinkel $1/\gamma$ relativ zur Flugrichtung des geladenen Teilchens konzentriert [Kle 92], wobei $\gamma = \mathrm{E}/(\mathrm{m}c^2)$ der relativistische Dilatationsfaktor ist.

Der Übergangsstrahlungsdetektor des HERA – B Experimentes [Sav 98] befindet sich zwischen den beiden letzten Superlagen des Spurkammersystems und somit unmittelbar vor dem elektromagnetischen Kalorimeter. Der TRD besitzt eine Sandwich-Struktur aus 32 Lagen, die jeweils aus einer Radiator- und einer Nachweislage für die emittierten Übergangsstrahlungsphotonen zusammengesetzt sind. Als Radiatormaterial werden Polypropylenfasern und als Detektoren Straw-Tube Proportionalkammern mit einer Gasmischung $Xe/CF_4/CO_2$ im Verhältnis von 70 : 20 : 10 verwendet. Der TRD besteht aus zwei hintereinander liegenden Superlagen, die den Bereich vom Protonstrahlrohr bis zur äußeren Begrenzung des inneren Kalorimeters abdecken, wobei die Drähte der Proportionalkammern unter einem Stereowinkel von $\pm 30°$ relativ zur Horizontalen verlaufen.

Das elektromagnetische Kalorimeter

Das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL: Electromagnetic Calorimeter) dient dem Nachweis von Elektronen und Positronen – im Folgenden wird der Einfachheit halber nur der Begriff Elektron verwendet, wobei sinngemäß sowohl Elektronen als auch Positronen gemeint sind – und ihrer Separation von Hadronen. Ferner erlaubt es, Photonen in einem Energiebereich von 5 bis 200 GeV zu detektieren. Das Kalorimeter stellt erste Triggerinformationen für Elektronen oder hochenergetische Photonen bereit, wozu eine hinreichend hohe Ortsauflösung erforderlich ist.

Bei hohen Energien im Bereich von einigen GeV ist die dominierende Wechselwirkung von Elektronen mit Materie die Bremsstrahlung, während hochenergetische Photonen hauptsächlich durch Elektron-Positron-Paarerzeugung wechselwirken. Dadurch, dass beide Mechanismen ineinander greifen, bildet sich eine Kaskade von Elektronen und Photonen, die als elektromagnetischer Schauer bezeichnet wird. Ein Kalorimeter ist ein absorbierender Detektor, bei dem die deponierte Schauerenergie als Maß für die Energie des einfallenden Teilchens dient. Häufig werden Samplingkalorimeter verwendet, die sandwichartig aus passiven Konverter- und aktiven Nachweislagen aufgebaut sind. In den Nachweislagen wird mehrfach ein Bruchteil der gesamten Schauerenergie gemessen, wobei die Energieauflösung durch Stichprobenfluktuationen beeinflusst wird. Allerdings erlaubt die Verwendung von stark absorbierenden passiven Konverterlagen eine kostengünstige und kompakte Bauweise. Für die Dimensionierung eines Kalorimeters ist zum einen die Strahlungslänge X_0 relevant, die definiert ist als die Dicke eines Materials, nach deren Durchquerung sich die ursprüngliche Energie E_0 eines Elektrons im Mittel auf einen Wert E_0/e reduziert hat. Zum anderen ist der Molière-Radius R_M von Bedeutung, der die transversale Ausdehnung eines elektromagnetischen Schauers charakterisiert. In einem Zylinder mit Radius $3 \cdot R_M$ sind 99 % der Schauerenergie enthalten [Kle 92].

Das elektromagnetische Kalorimeter des HERA – B Experimentes [Zoc 00] ist als Samplingkalorimeter mit einer so genannten Schaschlikauslese [Ato 92] aufgebaut. Es besteht aus einer Matrix von 56×42 Detektormodulen, die einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 11,19 cm besitzen. Jedes Modul ist aus sich abwechselnden Lagen passiven Konvertermaterials und aktiver Szintillatorschichten aufgebaut, die von optischen Fasern durchzogen werden, denen ein Wellenlängenschieber beigemischt ist und die das Szintillationslicht zu Photomultipliern leiten. Um die Belegung der Kalorimetermodule unterhalb von 10 % zu halten, variiert die Granularität der Detektormodule in Abhängigkeit vom radialen Abstand zum Protonstrahlrohr. Im inneren, strahlnächsten Bereich sind die Detektormodule in 5×5 gleichförmige Zellen mit einem quadratischen Querschnitt unterteilt. Als Konvertermaterial wird eine Legierung aus Wolfram, Nickel und Eisen verwendet, der Molière-Radius beträgt 1,42 cm und die Gesamttiefe der Module 13 cm, was 23 Strahlungslängen entspricht. Für die Module des mittleren und äußeren Kalorimeters wird Blei als Konvertermaterial eingesetzt, welches eine größere Strahlungslänge und einen größeren Molière-Radius als Wolfram besitzt, allerdings kostengünstiger ist. Die Gesamttiefe der Module von 34 cm entspricht 20 Strahlungslängen. Die Module des mittleren Bereichs sind in 2×2 Zellen segmentiert, während die Module des äußeren Bereichs nicht weiter unterteilt sind.

Die Energieauflösung im inneren Kalorimeter beträgt

$$\frac{\sigma(\mathrm{E})}{\mathrm{E}} = \frac{22{,}5\,\%}{\sqrt{\mathrm{E[GeV]}}} \oplus 1{,}7\,\%\,, \tag{2.3}$$

und im mittleren und äußeren Bereich

$$\frac{\sigma(\mathrm{E})}{\mathrm{E}} = \frac{9{,}5\,\%}{\sqrt{\mathrm{E[GeV]}}} \oplus 1{,}0\,\%\;. \tag{2.4}$$

Die Ortsauflösung des inneren Kalorimeters für Elektronen mit einer Energie größer als 30 GeV wurde zu 0,2 cm bestimmt und liegt somit deutlich unter dem Wert von 0,6 cm, der für die Definition von Elektronkandidaten für die erste Triggerstufe erforderlich ist [Avo 01].

2.2.1 Das Myon-System

Das Myon-System [Tit 00] dient der Identifikation von Myonen und der Selektion von Kandidaten für Myonspuren für die erste Triggerstufe. Myonen zeichnen sich durch ihr im Vergleich zu anderen Teilchen hohes Materiedurchdringungsvermögen aus. Um diese Eigenschaft von Myonen zu ihrer Identifikation ausnutzen zu können, besteht das Myon-System aus mehreren Lagen massiver Absorber aus Eisen und Stahlbeton, die dazu dienen, Hadronen zu stoppen. Diese Absorberlagen werden als Myon-Filter bezeichnet und sind in Abbildung 2.4 als MF1-3 dargestellt. Zwischen MF1 und MF2, MF2 und MF3 sowie hinter MF3 befinden sich vier Superlagen von Spurkammern (MU1-4), die Durchgänge geladener Teilchen registrieren. Die gesamte Absorberdicke beträgt 3,15 m in der zentralen Region nahe dem Protonstrahlrohr, wodurch Myonen mit einem Impuls kleiner als etwa 4,5 GeV/c am Durchdringen des Absorbers gehindert werden. Der Myon-Detektor befindet sich in einer Entfer-

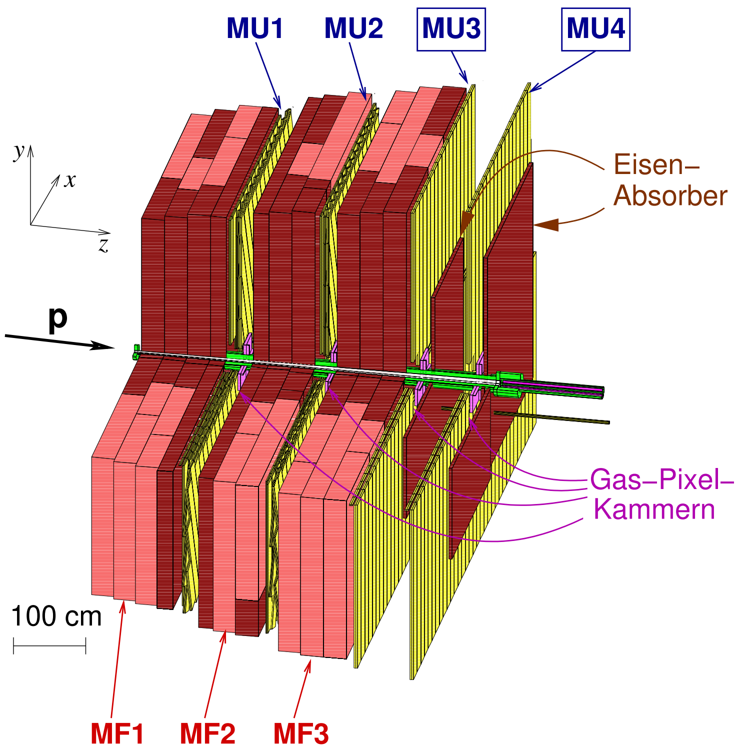


Abbildung 2.4: *Perspektivische Darstellung des HERA – B Myon-Detektors (nach [Tit 00]). Gezeigt sind die vier Spurkammerlagen MU1-4 sowie die Absorberlagen MF1-3. Nahe dem Protonstrahlrohr befinden sich in allen vier Superlagen Gas-Pixel-Kammern, während im äußeren Bereich Proportionaldrahtkammern eingesetzt werden. Die Daten der Kammern der Superlagen MU3 und MU4 werden vom Myon-Pretrigger-Systems verarbeitet.*

nung von ca. 15 m $< z <$ 19,5 m vom Target, die Abdeckung des Polarwinkels beträgt ca.

$9\,\text{mrad} < \theta_x < 220\,\text{mrad}$ in x-Richtung und $9\,\text{mrad} < \theta_y < 160\,\text{mrad}$ in y-Richtung, was im Schwerpunktssystem etwa 90 % des gesamten Raumwinkels entspricht.

Drei verschiedene Detektortypen werden im Myon-System verwendet, die als Pixel-, Tube- und Pad-Kammern bezeichnet werden. Im zentralen Bereich nahe dem Protonstrahlrohr kommen in allen vier Lagen des Myon-Detektors Gas-Pixel-Kammern zum Einsatz, die eine den relativ hohen Teilchenspurdichten adäquate Granularität besitzen. In Abbildung 2.5 ist ein Ausschnitt einer Gas-Pixel-Kammer schematisch dargestellt. Die einzelnen Zellen werden durch

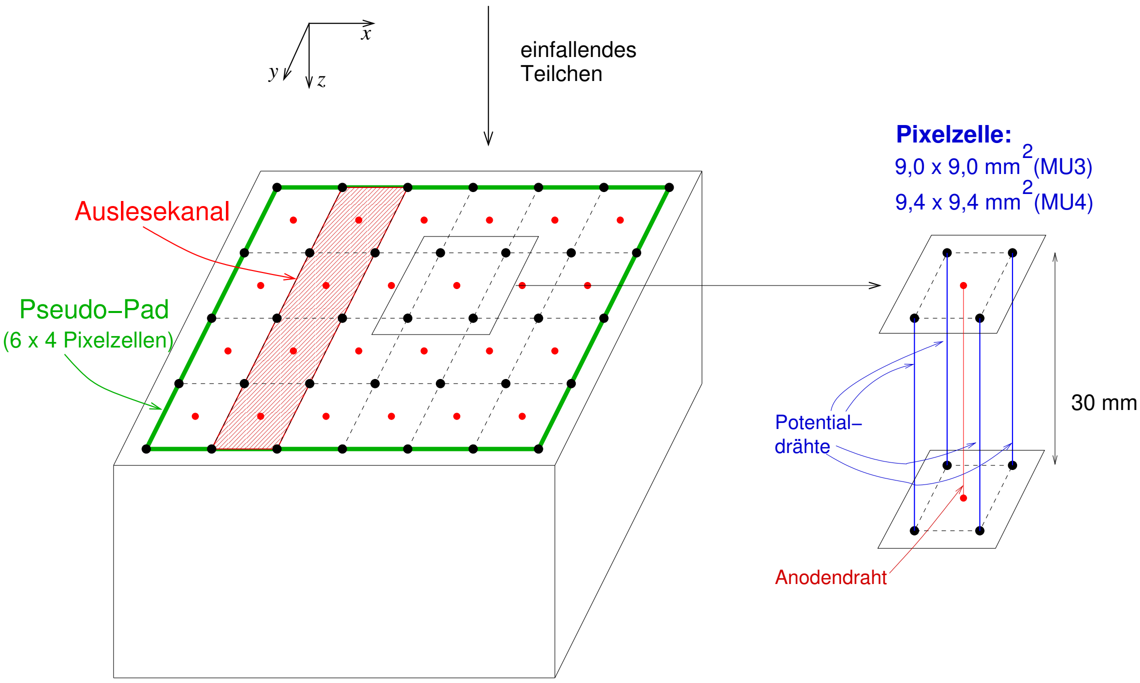


Abbildung 2.5: *Ausschnitt einer Gas-Pixel-Kammer. Dargestellt ist die Gruppierung einzelner Pixelzellen zu Auslesekanälen (schraffiert) sowie Pseudo-Pads für den Myon-Pretrigger. Auf der rechten Seite ist der Aufbau einer Pixelzelle aus Potentialdrähten und einem zentral verlaufenden Anodendraht gezeigt.*

vier parallel zur z-Richtung verlaufende Potentialdrähte und einen im Zentrum der Zelle befindlichen Anodendraht geformt. Die Länge der Drähte beträgt 30 mm, die Größe der Pixelzellen $9{,}0 \times 9{,}0\,\text{mm}^2$ ($9{,}4 \times 9{,}4\,\text{mm}^2$ in MU4). Um die Zahl der auszulesenden Detektorkanäle zu minimieren, werden in MU1 und MU2 jeweils zwei horizontal (x-Richtung) und vertikal (y-Richtung) benachbarte Signaldrähte zu einem Auslesekanal verbunden. In MU3 und MU4 besteht ein Auslesekanal aus 1×4 Pixelzellen. Für den Myon-Pretrigger werden sechs benachbarte Auslesekanäle zu Pseudo-Pads zusammengefasst, deren Standardgröße somit 6×4 Pixelzellen ist.

Im äußeren Bereich des Myon-Detektors werden Proportionaldrahtkammern verwendet. In den Superlagen MU1 und MU2 kommen Tube-Kammern zum Einsatz, die aus Aluminiumprofilen mit einzelnen geschlossenen Zellen aufgebaut sind, die einen rechteckigen Querschnitt der Fläche $14 \times 12\,\text{mm}^2$ besitzen. Durch jede Zelle verläuft zentrisch ein etwa 3 m langer Anodendraht. Jede Kammer besteht aus zwei hintereinander liegenden Monolagen von je 16 Zellen, die um eine halbe Zellenbreite gegeneinander verschoben sind, um insensitive Bereiche und somit Nachweisineffizienzen zu vermeiden. Jeweils drei Lagen von Tube-Kammern, deren Drähte parallel zur y-Achse (0°-Lage) bzw. unter Stereowinkeln von $\pm 20°$ relativ zur 0°-Lage orientiert sind, ermöglichen die Rekonstruktion von räumlichen Trefferkoordinaten in den ersten beiden Superlagen. Die Pad-Kammern der Superlagen MU3 und MU4 – Abbildung 2.6 zeigt eine Pad-Kammer im Querschnitt – bestehen aus Aluminiumprofilen mit offenen rechteckigen Zellen der gleichen Größe wie in den Tube-Kammern. Die Zellen werden durch

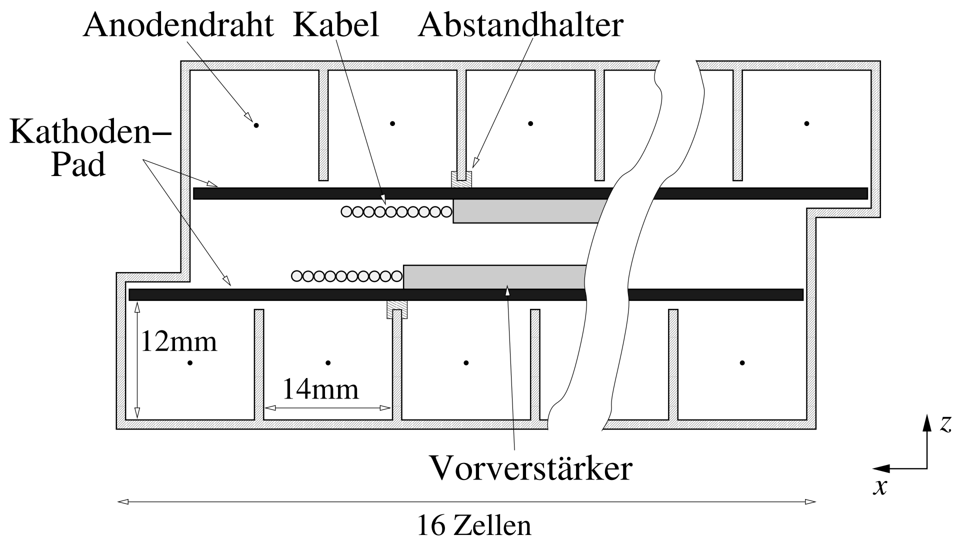


Abbildung 2.6: *Querschnitt einer Pad-Kammer (nach [Sch 01]). In einer Kammer befinden sich zwei Lagen von jeweils 16 Zellen, die um eine halbe Zellenbreite gegeneinander verschoben sind. Jede dieser Lagen wird durch zwei nebeneinander liegende Spalten von Kathoden-Pads geschlossen. Die Skala ist in x-Richtung unterbrochen.*

Kupfer-beschichtete Phenolplatten geschlossen, die mit Hilfe von isolierenden Abstandhaltern auf den Aluminiumstegen der Zellen befestigt sind. Die Phenolplatten sind derart strukturiert, dass sich rechteckige Kathoden-Pads mit einer Größe von $121{,}4 \times 100{,}0\,\mathrm{mm}^2$ in MU3 und $121{,}0 \times 104{,}5\,\mathrm{mm}^2$ in MU4 ergeben. In beiden Superlagen MU3 und MU4 befindet sich je eine Lage von Pad-Kammern, deren Signaldraht parallel zur y-Richtung verläuft. Sowohl das Signal des Anodendrahts als auch das auf den Kathoden-Pads influenzierte Signal werden ausgelesen, wobei unmittelbar auf den Pads montierte Vorverstärker verwendet werden. Wie auch in den Tube-Kammern sind je zwei hintereinander liegende Monolagen von Zellen, um eine halbe Zellenbreite gegeneinander verschoben, in einer Pad-Kammer kombiniert. Je zwei unmittelbar hintereinander liegende Kathoden-Pads sind zu einem Auslesekanal verbunden.

2.3 Das Datennahme- und Triggersystem

Untersuchungen zur Physik der B-Mesonen mit dem HERA – B Experiment stellen besondere Anforderungen, die sich in der Konzeption und Gestaltung des Datennahme- und Triggersystems widerspiegeln. In Tabelle 2.1 sind einige grundlegende Parameter von HERA – B und anderen Experimenten zur Physik der B-Mesonen aufgeführt. Experimente wie HERA – B und

Tabelle 2.1: *Parameter verschiedener B-Physik Experimente [Bou 95, Har 98, Har 95, Sch 00a].*

Experiment	BaBar	HERA – B	LHCb
Beschleuniger	PEP II (e^+e^-)	HERA (pN)	LHC (pp)
$\sqrt{s}$	10,58 GeV	41,6 GeV	14 TeV
$\sigma_{b\bar{b}}$	1,05 nb	12 nb	500 μb
Prod.-Rate $b\bar{b}$	3 Hz	37 Hz	250 kHz
σ_{inel}	3,4 nb	13 mb	80 mb
$\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{\text{inel}}$	0,28	$9{,}2 \cdot 10^{-7}$	$6{,}2 \cdot 10^{-3}$
Auslesekanäle	220 000	620 000	950 000
Δt_{bunch}	4,2 ns	96 ns	25 ns

LHCb, bei denen die zu untersuchenden B-Mesonen in hadronischen Kollisionen erzeugt werden, weisen im Vergleich zu Experimenten an e^+e^--Speicherringen, in denen die B-Mesonen aus Zerfällen der $\Upsilon(4S)$-Resonanz hervorgehen – als Beispiel wird hier das Experiment BaBar betrachtet –, einen größeren absoluten Wirkungsquerschnitt $\sigma_{b\bar{b}}$ für die Produktion von $b\bar{b}$-Quarkpaaren auf, der für LHCb um fünf Größenordnungen oberhalb des Wertes für BaBar liegt. Demgegenüber ist jedoch das Verhältnis zwischen $\sigma_{b\bar{b}}$ und dem totalen inelastischen Wirkungsquerschnitt σ_{inel} für Experimente, die auf der $\Upsilon(4S)$-Resonanz operieren, sehr viel günstiger als bei hadronischen Kollisionen. Eine besondere Herausforderung stellt dies für das HERA – B Experiment dar, bei dem das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis $\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{\text{inel}} \approx 10^{-6}$ ist. Im Vergleich zu LHCb bedeutet dies, dass nach einer Unterdrückung von Untergrundereignissen um einen Faktor 10^3 noch immer weniger Signalereignisse detektiert würden als bei LHCb mit einer zufälligen Ereignisselektion. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Datenrate, die mit der Auslese der Detektorkanäle des HERA – B Experimentes einhergeht. Für eine mittlere Größe eines Ereignisdatenblocks von ca. 470 kByte [Wag 00] ergibt sich bei der Auslese mit der HERA-Taktrate von 10,4 MHz eine Datenrate von nahezu 5 TByte/s. Dieser Wert übersteigt die Möglichkeiten heutiger Technologien um ein Vielfaches im Hinblick auf realisierbare Datentransferraten und -speicherkapazitäten. Die maximal erzielbare Rate, mit der Ereignisse gespeichert werden können, beläuft sich auf einige 10 Hz. Aus diesem Grund bedarf es eines Triggersystems, welches in der Lage ist, die primäre Ereignisrate um sechs Größenordnungen zu reduzieren bei gleichzeitig möglichst hoher Effizienz für die Signalereignisse.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktion der verschiedenen Komponenten des Datennahme- und Triggersystems beschrieben.

2.3.1 Der Aufbau des Datennahmesystems

Das Datennahmesystem (DAQ: Data Acquisition) des HERA – B Experimentes hat die Aufgabe, die Daten der Detektorkomponenten auszulesen und den Systemen der verschiedenen Triggerstufen zur Verfügung zu stellen. Eine schematische Darstellung des Datennahmesystems ist in Abbildung 2.7 gezeigt. Die Daten der ca. 620 000 Detektorkanäle werden durch

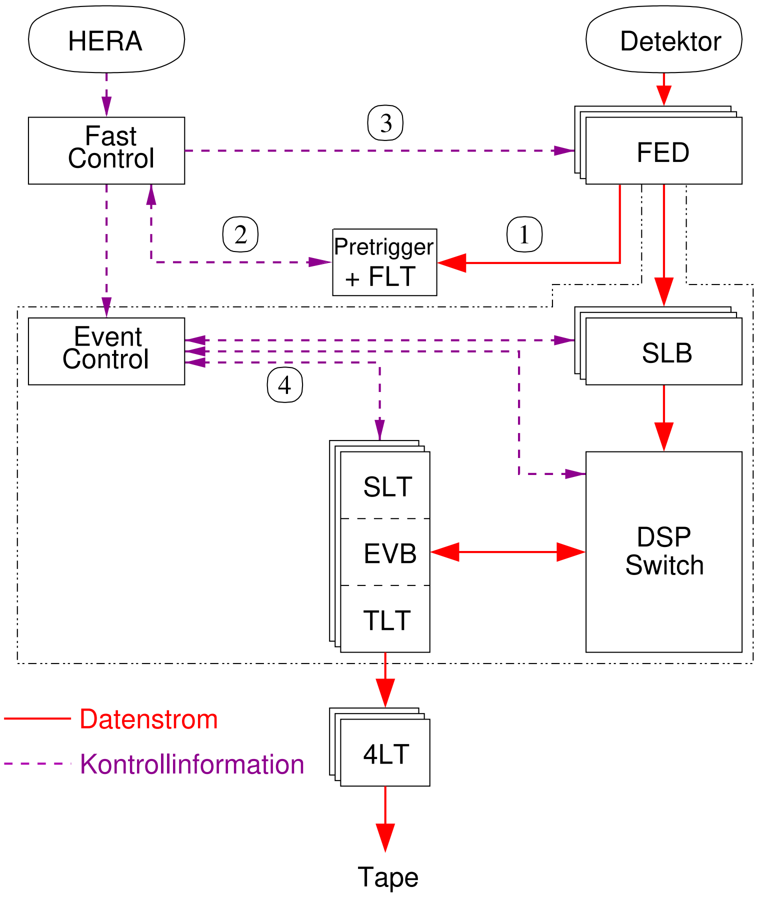


Abbildung 2.7: *Darstellung des Datennahme- und Triggersystems. Die einzelnen Komponenten sowie der Austausch von Daten und Kontrollinformationen sind in Abschnitt 2.3.1 beschrieben.*

eine Subdetektor-spezifische Elektronik für jedes Ereignis ausgelesen und an Front End Driver-Systeme (FED-Systeme) übermittelt, deren Aufbau ebenfalls Subdetektor-spezifisch ist, wobei jedoch eine einheitliche Schnittstelle für die Weitergabe der Daten implementiert ist. Ein Teil der von den FED-Systemen empfangenen Daten wird über spezielle Verbindungen zu den Pretriggern und zur ersten Triggerstufe (FLT: First Level Trigger) geleitet (①). Während der Datenprozessierung durch diese Systeme werden sämtliche Detektordaten von den FED-Systemen in Datenpuffern zwischengespeichert. Diese Puffer fassen die Daten von 128 aufeinander folgenden Ereignissen und werden als Ringspeicher fortwährend beschrieben. Dadurch ist die maximale Latenzzeit der Triggerentscheidung des FLT auf 12,3 μs begrenzt, da ansonsten die Datenpuffer bereits mit neuen Detektordaten überschrieben würden. Nach Abzug der Latenzzeit des Fast Control Systems (FCS) stehen dem FLT einschließlich der Pretrigger-Systeme etwa $10\,\mu$s zur Verfügung, um ein Ereignis zu selektieren. Wird ein Ereignis von der ersten Triggerstufe akzeptiert, so sendet der FLT eine entsprechende Information (②) an das FCS, welches die FED-Systeme aller Subdetektoren veranlasst (③), den kompletten Datensatz des akzeptierten Ereignisses zum Second Level Buffer (SLB) zu transferieren. Das FCS stellt zudem allen FED-Systemen der verschiedenen Subdetektoren ein vom HERA-Taktsignal abgeleitetes Taktsignal und eine fortlaufende Ereignisnummer, die so genannte Bunch Crossing Nummer (BX-Nummer), zur Verfügung, um damit die Synchronisation der einzelnen Komponenten sowie die eindeutige Markierung aller Daten eines Ereignisses zu ermöglichen. Der SLB speichert die Daten aller Detektorkanäle bis zur Entscheidung der zweiten Triggerstufe (SLT: Second Level Trigger) zwischen, zudem stellt er den SLT-Prozessoren den von ihnen angeforderten Teil der Gesamtdaten zur Verfügung. Die Event Control ordnet die Bearbeitung der vom FLT akzeptierten Ereignisse den einzelnen SLT-Prozessoren zu (④) und kontrolliert den Datentransfer zwischen den einzelnen Komponenten. SLB, Event Control sowie der DSP-Switch, der die Daten zwischen SLB und SLT transferiert, sind in digitalen Signalprozessoren (DSP) implementiert.

Bei einer positiven Entscheidung des SLT fordert der Triggerprozessor sämtliche Daten aller Detektorkanäle für das akzeptierte Ereignis vom SLB an. Nach diesem Schritt, der als Event Building (EVB) bezeichnet wird, befinden sich also die gesamten Detektordaten im lokalen Speicher des SLT-Prozessors, so dass fortan keine Zwischenspeicherung mehr erforderlich ist. Die Algorithmen der dritten Triggerstufe (TLT: Third Level Trigger), die auf den vollständigen Datensatz eines Ereignisses zugreifen können, werden auf demselben Prozessor ausgeführt wie die der zweiten Stufe, wodurch ein mit einem Datentransfer einhergehender Zeitverlust vermieden wird. Die Daten vom TLT akzeptierter Ereignisse werden über ein Fast Ethernet Netzwerk zur vierten Triggerstufe (4LT: Fourth Level Trigger) gesendet und im Falle einer positiven Triggerentscheidung permanent gespeichert.

2.3.2 Die Triggerstrategien

Das HERA – B Triggersystem wurde derart konzipiert, dass eine möglichst hohe Selektionseffizienz für den Zerfallskanal $B_d^0 \to J/\psi\, K_S^0 \to \ell^+\ell^-\, \pi^+\pi^-$ erzielt werden kann. Die dazu angewendeten Triggerstrategien basieren auf den folgenden Eigenschaften dieses Prozesses:

- Das b-Quark ist deutlich schwerer als die Quarks der ersten und zweiten Generation. Daher besitzen Teilchen, die aus Zerfällen von B-Hadronen hervorgehen, einen größeren mittleren Transversalimpuls p_T als Teilchen aus Zerfällen von Hadronen mit leichten Quarks.

- Die Lebensdauer τ_B von B-Mesonen beträgt etwa 1,5 ps. Durch die relativistische Zeitdilatation sind die Zerfallsvertizes der B-Mesonen im Laborsystem signifikant vom Primärvertex separiert. Dies führt auch dazu, dass die aus dem Zerfall eines B-Mesons hervorgehenden Tochterteilchen einen messbaren Impaktparameter aufweisen, d.h. die Verlängerung der Teilchenspuren verläuft nicht durch einen Primärvertex.

- Die aus dem Zerfall des J/ψ-Mesons stammenden geladenen Leptonen besitzen hohe Impulse und Transversalimpulse und stellen eine deutliche Ereignissignatur in Proton-Nukleon-Kollisionen dar.
- Die Kombination der Leptonspuren aus dem J/ψ-Zerfall ergibt ein System mit einer invarianten Masse nahe der J/ψ-Masse.

Um die Sensitivität für andere Zerfälle von B-Hadronen zu erhöhen – beispielsweise für Ereignisse, in denen beide B-Hadronen semileptonisch zerfallen –, wurde ein allgemeiner Dileptontrigger konzipiert. Dieser verlangt zwei Leptonspuren nahezu beliebiger Ladung und Sorte, deren Transversalimpulse bestimmte Schwellenwerte übersteigen und deren Impaktparameter auf eine signifikante Separation von den primären Vertizes hinweisen.

2.3.3 Der Aufbau und die Funktion des Triggersystems

Das Triggersystem des HERA – B Experiments besteht aus mehreren Stufen, die verschiedene der oben beschriebenen Charakteristika von B-Meson-Zerfällen zur Ereignisselektion verwenden. Die zu verarbeitende Datenrate, der Unterdrückungsfaktor für Untergrundereignisse sowie die maximal verfügbare Ausführungszeit des Selektionsalgorithmus unterscheiden sich deutlich für die einzelnen Triggerstufen, wie in Tabelle 2.2 gezeigt ist.

Tabelle 2.2: *Übersicht der verschiedenen Triggerstufen. Angegeben sind die maximale Eingangsrate, der nominelle Unterdrückungsfaktor für Untergrundereignisse und die maximal zur Verfügung stehende Zeit für die einzelnen Triggerstufen. Zudem ist aufgeführt, welche Hardware für die jeweilige Triggerstufe verwendet wird.*

Triggerstufe	Eingangsrate	Reduktion	Ausführungszeit	Hardware
1	10,4 MHz	200	$< 12\,\mu$s	spezialisierte Elektronik
2	50 kHz	100	< 7 ms	PC-Farm
3	500 Hz	10	100 ms	PC-Farm
4	50 Hz	2,5	$2 - 4$ s	PC-Farm

Die erste Triggerstufe arbeitet mit einer Eingangsdatenrate, die der Ereignisrate, also der HERA-Frequenz von 10,4 MHz, entspricht. Um Daten mit dieser Rate verarbeiten zu können, wurde eine modulare und aus spezialisierten Einzelkomponenten bestehende Triggerelektronik entwickelt. Initiiert durch verschiedene Pretrigger-Systeme führt der FLT eine schnelle Spursuche und -rekonstruktion durch, bestimmt die Spurparameter und erlaubt eine Ereignisselektion basierend auf einzelnen Spuren oder aber auf der invarianten Masse von Spurpaaren. Die maximale Latenzzeit bis zur Triggerentscheidung des FLT ist auf 12,3 μs begrenzt. Der FLT soll die Ereignisrate durch die Unterdrückung von Untergrundprozessen um einen Faktor 200 reduzieren.

Die zweite Triggerstufe ist konzipiert für eine maximale Eingangsdatenrate von 50 kHz. Sie ist realisiert in Form verschiedener Triggeralgorithmen, die auf einer Rechnerfarm bestehend aus

240 PCs ausgeführt werden. Die erzielbare Untergrundunterdrückung des SLT ist abhängig vom zu selektierenden Ereignistyp, typischerweise soll eine Reduktion um einen Faktor 100 erzielt werden. Die maximale Latenzzeit bis zur Triggerentscheidung des SLT ist auf weniger als 7 ms beschränkt [Ger 00b].

Wird ein Ereignis vom SLT akzeptiert, so werden sämtliche Ereignisdaten zusammengefügt und an die dritte Triggerstufe übergeben, deren nominelle maximale Eingangsdatenrate 500 Hz beträgt. Die Algorithmen des TLT, die zusammen mit denen des SLT auf derselben Rechnerfarm ausgeführt werden, können im Gegensatz zu den vorangehenden Triggerstufen auf die gesamten Ereignisdaten zugreifen. Sie sollen den Anteil von Untergrundereignissen um einen Faktor 10 reduzieren, wobei eine maximale Rechenzeit von ca. 100 ms zur Verfügung steht.

Die vierte Triggerstufe empfängt die Eingangsdaten mit einer Rate von 50 Hz, führt eine vollständige Rekonstruktion sowie eine Klassifikation aller Ereignisse durch. Optional kann durch eine endgültige Ereignisselektion eine weitere Reduktion um einen Faktor 2,5 erzielt werden, bevor die Daten auf Festplatten zwischengespeichert und anschließend auf Magnetbändern archiviert werden. Der 4LT ist in Form einer zweiten Rechnerfarm realisiert, die aus ca. 200 Prozessoren besteht.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Triggerstufen eingehend dargestellt.

2.3.4 Die Pretrigger-Systeme

Die Prozessierung der ersten beiden Triggerstufen verwendet zur Spursuche und -rekonstruktion nur Daten in eingegrenzten Bereichen der verschiedenen Detektorlagen. Man bezeichnet einen solchen Suchbereich als RoI (Region of Interest). Die Aufgabe der Pretrigger-Systeme ist es, Kandidaten für Spuren zu finden, die auf potentiell interessante Ereignisse hindeuten, und entsprechende erste RoIs für die Spurrekonstruktion der ersten Triggerstufe zur Verfügung zu stellen. Im HERA – B Experiment werden drei verschiedene Pretrigger-Systeme eingesetzt.

Der Elektron-Pretrigger

Der Elektron-Pretrigger dient der Identifikation von Elektron- und Positronkandidaten und kann auch zur Selektion von Ereignissen mit hochenergetischen Photonen verwendet werden. Er erlaubt eine schnelle Suche nach hohen Energiedepositionen durch elektromagnetische Schauer im Kalorimeter. Dazu werden für alle Kombinationen von 3×3 Kalorimeterzellen, die auch als Cluster bezeichnet werden, die in den entsprechenden neun Zellen detektierten Energiedepositionen aufsummiert. Übersteigt die Energiesumme einen vorgegebenen Schwellenwert und ist zudem die Bedingung erfüllt, dass die Energie in der im Zentrum des Clusters liegenden Zelle größer als die halbe Schwellenenergie ist, so werden die Position des Clusters und eine RoI in der Spurkammerlage TC2 berechnet und in einem standardisierten Nachrichtenformat an den FLT gesendet. Der Elektron-Pretrigger ist in der Lage, eine Korrektur der Clusterenergie von Elektron-/Positronkandidaten durchzuführen, um der Abstrahlung von Bremsstrahlungsphotonen vor dem Magneten Rechnung zu tragen. Dazu wird aus der Position und der Energie eines Elektron-/Positronclusters die mögliche Position eines Bremsstrahlungsphotons im Kalorimeter bestimmt. Dabei wird angenommen, dass die Elektron-/Positronspur

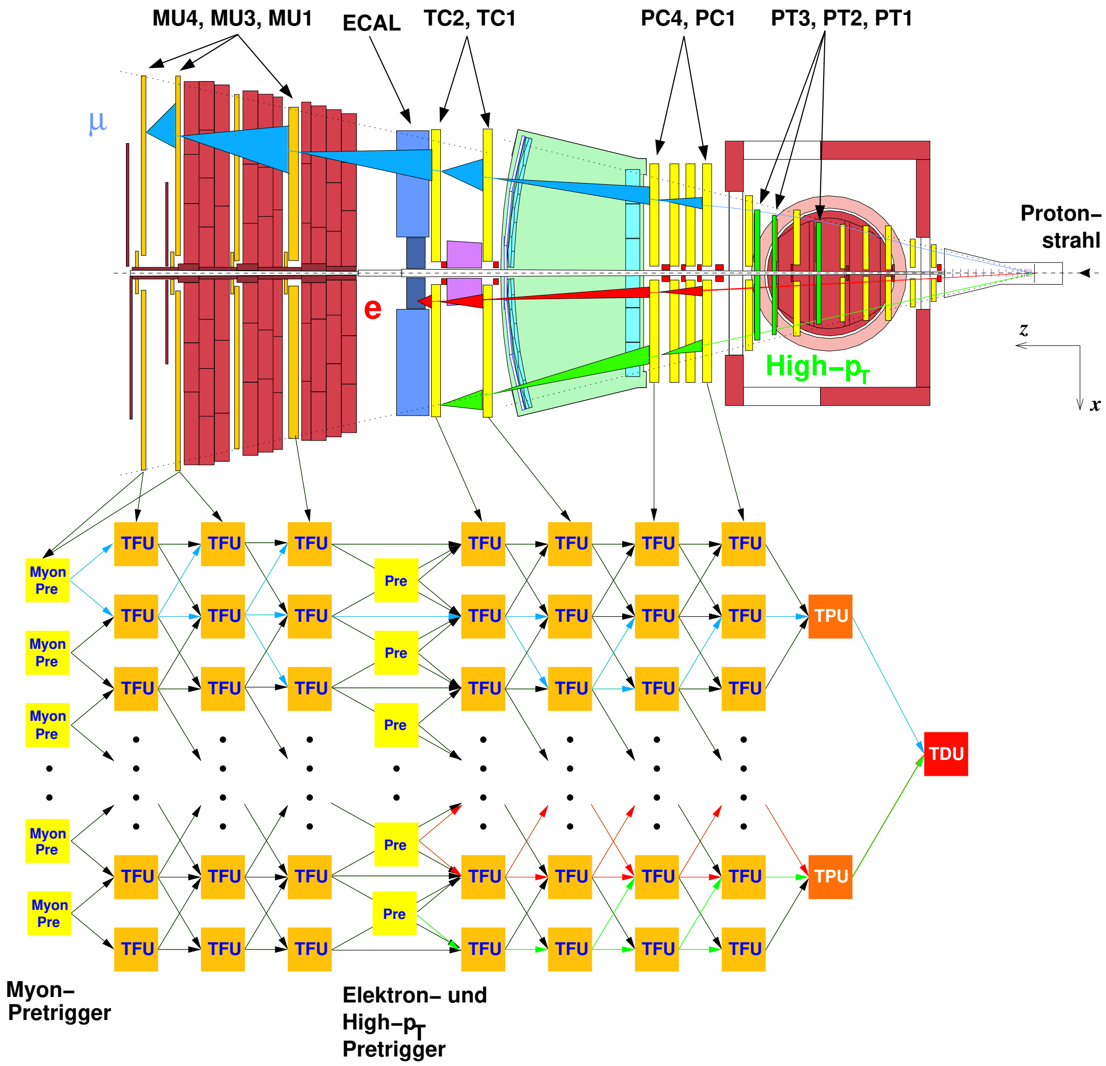


Abbildung 2.8: *Das Pretrigger- und FLT-Netzwerk (nach [Sch 00b]). Die iterative Spurverfolgung unter Verwendung von RoIs ist für Myon- (μ), Elektron- (e) und High-p_T-Spurkandidaten schematisch dargestellt. Der Transfer der Trefferdaten der Detektoren zu den Triggerprozessoren erfolgt synchron zum HERA-Taktsignal, der Nachrichtentransfer zwischen den Prozessoren des Netzwerkes asynchron.*

aus der Targetregion stammt und das Photon vor dem Magneten abgestrahlt wurde. Wird in dem entsprechenden Kalorimeterbereich ein Bremsstrahlungscluster gefunden, so wird dessen Energiesumme zu der Clusterenergie des Elektron-/Positronkandidaten addiert.

Das gesamte Elektron-Pretrigger-System besteht aus 128 Einzelmodulen. Es wurde gegen Ende der Datennahme im Jahr 2000 vollständig installiert und in Betrieb genommen [HER 00b]. Die totale Latenzzeit des Elektron-Pretriggers beträgt ohne die Bremsstrahlungskorrektur etwa 1,5 μs und mit ihr etwa 3,5 μs. Die durchschnittliche Effizienz des Elektron-Pretriggers beträgt zwischen 91,7 % im äußeren und 97,2 % im inneren Bereich des Kalorimeters [HER 00a].

Der High-p_T-Pretrigger

Der High-p_T-Pretrigger soll Spuren geladener Teilchen mit hohem Transversalimpuls identifizieren und somit die Möglichkeit eröffnen, Prozesse mit hadronischen Endzuständen effizient zu selektieren. Dazu werden drei Lagen von Spurkammern verwendet, die sich innerhalb des Magneten befinden und in Abschnitt 2.2 beschrieben wurden. Die Pretriggerelektronik sucht nach Dreifachkoinzidenzen von getroffenen Pads in hintereinander liegenden Bereichen der Spurkammern. Für jede Koinzidenz wird eine RoI in der Spurkammerlage TC2 bestimmt und an die erste Triggerstufe übermittelt.

Die Detektoren des inneren High-p_T-Systems sind installiert, in die DAQ integriert und wurden während der Datennahme im Jahr 2000 ausgelesen. Die Kammern des äußeren Systems konnten vollständig installiert und in Betrieb genommen werden. Ein Teil der Pretrigger-Elektronikkette konnte im Strahlbetrieb getestet werden. Analysen der Pretriggerrate in Abhängigkeit von der primären Wechselwirkungsrate wurden mit Hilfe einer Pretrigger-Simulation durchgeführt. Sie zeigen, dass im Mittel 0,18 (1,06) Pretrigger-Signale pro Ereignis bei einer nominellen Wechselwirkungsrate von 5 (20) MHz für den inneren Bereich zu erwarten sind, was ca. 60 % oberhalb der entsprechenden Werte liegt, die sich in Monte-Carlo-Studien ergeben [HER 00a].

Der Myon-Pretrigger

Eine ausführliche Darstellung des Aufbaus und der Funktion des Myon-Pretriggers findet sich in Kapitel 3.

2.3.5 Der First Level Trigger

Der First Level Trigger, dessen Aufbau zusammen mit den Pretrigger-Systemen in Abbildung 2.8 dargestellt ist, führt für die von den Pretrigger-Systemen übermittelten Spurkandidaten zunächst eine iterative Treffersuche und Spurrekonstruktion im Bereich hinter dem Magneten durch. Für alle Spurkandidaten werden die Superlagen PC1, PC4, TC1 und TC2 des Hauptspurkammersystems verwendet, für Myonkandidaten zusätzlich noch die Superlagen MU1, MU3 sowie MU4 des Myon-Detektorsystems. Zur Spurverfolgung werden spezialisierte Komponenten eingesetzt, die als Track Finding Units (TFU) bezeichnet werden. Jede TFU ist einem bestimmten Bereich innerhalb einer Detektorsuperlage fest zugeordnet. Die Trefferdaten dieses Bereiches werden für jede Proton-Target-Wechselwirkung synchron zum HERA-Takt mit Hilfe von FLT Link Boards optisch zur TFU übertragen und dort in Wire Memories (engl.: Drahtspeicher) abgelegt. Bei diesen Bausteinen handelt es sich um ASICs (Application Specific Integrated Circuits: anwendungsspezifische integrierte Schaltungen), die die Trefferdaten von 128 aufeinander folgenden Ereignissen speichern können. Erhält eine TFU eine Triggernachricht von einem der Pretrigger-Systeme bzw. einer TFU aus der vorhergehenden Superlage, so sucht die TFU innerhalb der RoI, die durch die empfangene Triggernachricht definiert wird, nach Drahttreffern im Falle von MU3 und MU4 bzw. nach Trefferkoinzidenzen in den drei Stereolagen in allen anderen Superlagen.

Die Rekonstruktion einer Spur durch die TFUs der ersten Triggerstufe setzt Treffer in zwölf Detektorlagen für Elektron- und High-p_{T}-Kandidaten und in 17 Detektorlagen für Myon-Kandidaten voraus. Aus diesem Grund ist die Spurfindungseffizienz des FLT sehr stark abhängig von den Treffernachweiseffizienzen der verwendeten Spurkammerlagen. Wird ein Treffer bzw. eine Trefferkoinzidenz gefunden, so wird die Spur in die Ebene der nächsten vom FLT verwendeten Superlage projiziert und eine RoI in dieser Lage definiert, die schließlich in Form einer Triggernachricht an die entsprechende TFU gesendet wird. Wird in einer Superlage kein Treffer bzw. keine Koinzidenz in der vorgegebenen RoI gefunden, so endet die Rekonstruktion der Spur. Dieses iterative Verfahren stellt einen in spezialisierten Hardware-Modulen implementierten Kalman-Filter dar. Ein wesentliches Merkmal der Funktion des FLT ist, dass die Spurverfolgung mit Hilfe von Triggernachrichten innerhalb des TFU-Netzwerkes erfolgt, die asynchron zwischen den Prozessoren ausgetauscht werden, während die Trefferdaten selbst synchron zum HERA-Takt zu den TFUs transferiert werden.

Wird eine Spur bis zu der Superlage PC1 erfolgreich rekonstruiert, so senden die entsprechenden TFUs Nachrichten an Track Parameter Units (TPU), welche die relevanten kinematischen Parameter der rekonstruierten Spuren basierend auf Look-up tables (LUT) schnell berechnen. Die Impulsabschätzung ergibt sich aus der rekonstruierten Richtung der Spur im feldfreien Bereich hinter dem Magneten sowie der Annahme, die Spur entstamme der Targetregion. Für die Berechnung wird eine mittlere Drahtposition und das effektive Feldintegral des Dipolmagneten verwendet. Spuren, deren berechneter Impuls bzw. Transversalimpuls nicht innerhalb vorgegebener Intervalle liegt, können verworfen werden, wobei die Intervallgrenzen eingestellt werden können. Für Elektronkandidaten kann zusätzlich verlangt werden, dass die Größe E/p, das Verhältnis der rekonstruierten Energie und des rekonstruierten Impulses, in einem vorgegebenen Bereich liegt. Optional erlauben es die TPUs, mehrfach rekonstruierte Spuren, die identische Spurparameter aufweisen, zu identifizieren und zu eliminieren.

Schließlich werden die Parameter rekonstruierter Spuren an die TDU (Trigger Decision Unit) gesendet, welche entscheidet, ob ein Ereignis von der ersten Triggerstufe akzeptiert oder aber verworfen wird. Weil die Informationen zu Spuren eines Ereignisses wegen der asynchronen Verarbeitung der Daten innerhalb des Netzwerkes der FLT-Prozessoren in der Regel zeitlich versetzt eintreffen, werden diese Informationen zunächst zwischengespeichert, sofern ihre Latenzzeit einen vorgegebenen Maximalwert nicht übersteigt, und ansonsten verworfen. Alle Spuren eines Ereignisses werden zu Paaren kombiniert, wobei die invariante Masse der jeweiligen Kombination berechnet wird. Im so genannten Paartriggermodus akzeptiert die TDU Ereignisse, in denen ein Paar von Spuren, deren Identität, Ladung, Impuls und Transversalimpuls vorgegebene Kriterien erfüllen, eine invariante Masse oberhalb eines bestimmten Wertes aufweist. Zusätzlich ist ein davon unabhängig arbeitender Zähltrigger implementiert. Für jedes Ereignis bestimmt dieser die Anzahl der Spuren, und zwar getrennt nach dem Typ des Pretrigger-Systems, das die Spursuche initiiert hat. Übersteigt die Zahl der Spuren eines bestimmten Typs einen voreingestellten Schwellenwert, so wird das Ereignis akzeptiert. Alternativ kann als Triggerbedingung verlangt werden, dass die Zähler zweier verschiedener Spurtypen oberhalb vorgegebener Schwellenwerte liegen.

Wird ein Ereignis von der TDU akzeptiert, so wird die zugehörige BX-Nummer dem FCS übermittelt, welches den Transfer der Detektordaten aus den FED-Systemen zum SLB veranlasst. Die TDU sendet, initiiert durch das FCS, eine Liste aller vom FLT rekonstruierten Spurkandidaten des akzeptierten Ereignisses zum SLB.

Im Laufe der Datennahmeperiode im Jahr 2000 wurden sämtliche FLT-Komponenten für den äußeren Detektorbereich, d.h. OTR und äußerer Myon-Detektor, installiert, in Betrieb genommen und in verschiedenen Konfigurationen getestet. Durch einen Vergleich mit Referenzspuren, die mit Hilfe von Detektorkomponenten rekonstruiert wurden, die nicht vom FLT verwendet wurden, ergab sich für die Effizienz der Rekonstruktion von Elektronspuren durch den FLT ein Wert von $70 \pm 2\,\%$ [HER 00a]. Dieses Ergebnis schließt neben der eigentlichen Spurrekonstruktionseffizienz des FLT im OTR auch die Effizienz des Elektron-Pretriggers, die Treffereffizienz der Detektorzellen des OTR sowie Effekte aufgrund von Fehlern in den elektrischen und optischen Datenübertragungsstrecken ein. Ein Analyse basierend auf Ereignissen mit $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ Zerfällen ergab als Abschätzung der Spurrekonstruktionseffizienz des FLT für einzelne Myonspuren einen Wert von 23 %, wobei der Einfluss nicht funktionierender Datentransferverbindungen und Verluste aufgrund zu großer Latenzzeiten der Triggerentscheidung berücksichtigt wurden. Mit Hilfe einer Triggersimulation ergab sich daraus eine Myonspurrekonstruktionseffizienz des FLT im Bereich des OTR von 70 % in Übereinstimmung mit dem entsprechenden Wert für Elektronspuren [HER 00a].

2.3.6 Die höheren Triggerstufen

Die zweite Triggerstufe (SLT) ist in Form verschiedener Triggeralgorithmen realisiert, die auf einer Rechnerfarm ausgeführt werden. Der SLT rekonstruiert zunächst die vom FLT gefundenen Spurkandidaten im Bereich des Spurkammersystems erneut. Durch die Hinzunahme der Superlagen PC2 und PC3 sowie die Verwendung der Driftzeitinformation der Spurkammern können zum einen vom FLT fehlerhaft rekonstruierte Spuren eliminiert, zum anderen die Parameter bestätigter Spurkandidaten im Vergleich zum FLT mit einer höheren Präzision bestimmt werden. Anschließend werden die Spurkandidaten durch den Bereich des Magneten propagiert und Suchbereiche im Vertexdetektor definiert. Dazu werden eine Parametrisierung des effektiven Feldintegrals als Funktion der Spurparameter und gegebenenfalls vorhandene Treffer in der ersten Spurkammerlage innerhalb des Magneten verwendet. Der SLT ist die erste Triggerstufe, die Informationen des Vertexdetektors nutzt. Er führt dort eine iterative Spurrekonstruktion basierend auf einer Kalman-Filtermethode durch. Abschließend wird überprüft, ob Paare von Spurkandidaten einen gemeinsamen Vertex besitzen. Falls dies nicht der Fall ist, werden die Impaktparameter der Spurkandidaten relativ zum nächstgelegenen Targetdraht bestimmt. Optional können Schnitte auf die Vertexqualität bzw. die Impaktparameter der Triggerspuren zur Ereignisselektion angewendet werden.

Der SLT ist konzipiert für eine maximale Eingangsdatenrate von 50 kHz. Die Unterdrückung von Untergrundereignissen, die durch die Kombination der verschiedenen oben beschriebenen Triggeralgorithmen insgesamt erzielt werden kann, ist abhängig davon, welcher Ereignistyp selektiert wird, sie soll typischerweise einen Faktor 100 erreichen.

Akzeptiert der SLT ein Ereignis, so werden sämtliche Daten aller Subdetektoren zu diesem Ereignis aus dem SLB ausgelesen und zu dem Triggerprozessor übertragen, der die SLT-Algorithmen ausgeführt hat, dort zusammengefügt und im lokalen Speicher abgelegt. Diesen Schritt bezeichnet man als Event Building (EVB).

Die dritte Triggerstufe (TLT) kann anschließend erstmals auf die komplette Information eines Ereignisses zugreifen und ist nicht mehr auf Triggerspuren und Suchregionen in einzelnen Detektorsuperlagen beschränkt wie die erste und zweite Triggerstufe. Um einen unnötigen Datentransfer zwischen Prozessoren der Rechnerfarm und den damit einhergehenden Zeitverlust zu vermeiden, sind die Algorithmen des TLT zusammen mit denen des SLT und denen für das EVB in einem Programm zusammengefasst, das auf einem Prozessor ausgeführt wird. Dem TLT kommt vor allem bei solchen Ereignistopologien eine große Bedeutung zu, bei denen die vom SLT rekonstruierten Triggerspuren keinen gemeinsamen Vertex bilden und die Ratenreduktion bis einschließlich der zweiten Triggerstufe nicht hinreichend hoch ist, beispielsweise semileptonischen Zerfällen von B- oder D-Mesonen. Bisher ist eine schnelle Rekonstruktion von Spuren im Vertexdetektor in den TLT-Algorithmen implementiert, die es erlaubt, primäre und sekundäre Vertizes sowie Spuren mit einem großen Impaktparameter außerhalb der RoIs des SLT zu finden. Bisher durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass eine Ereignisselektion basierend auf großen Impaktparametern die Signaleffizienz für semileptonische Zerfälle um bis zu 30 % erhöhen kann, abhängig davon, welcher Schnitt auf den Impaktparamter notwendig ist, um Untergrundereignisse hinreichend zu reduzieren [HER 00a, Sch 00b].

Die vom TLT akzeptierten Ereignisse werden über eine Fast-Ethernet-Verbindung zur vierten Triggerstufe (4LT) gesendet. Diese ist in Form einer zweiten PC-Farm realisiert und führt eine vollständige Ereignisrekonstruktion durch. Zudem werden die Ereignisse klassifiziert, wobei gegebenenfalls eine endgültige Ereignisselektion auf dieser Grundlage vollzogen werden kann. Die Daten selektierter Ereignisse werden zum DESY-Rechenzentrum transferiert und dort permanent gespeichert. Weiterhin werden auf der 4LT-Farm Parameter, die Rückschlüsse auf die Datenqualität erlauben, kontinuierlich überwacht und Daten aufbereitet, aus denen aktuelle Kalibrations- und Positionierungskonstanten für die verschiedenen Subdetektoren bestimmt werden.

Kapitel 3

Das Myon-Pretrigger-System

Das Myon-Pretrigger-System hat die Aufgabe, Kandidaten für Myonspuren zu finden und Regions of Interest (RoI) als Startpunkte für die Spurrekonstruktion des First Level Triggers (FLT) im Myon-Detektor zu definieren. Dazu werden die Daten der Superlagen MU3 und MU4 des Myon-Detektors bei jedem Bunch Crossing ausgelesen, Spurkandidaten mit Hilfe einer spezifischen Treffermustererkennung identifiziert und für gefundene Spurkandidaten Nachrichten in einem vorgegebenen Format erzeugt und an die erste Triggerstufe gesendet.

Die Anforderungen, die damit einhergehen, eine Dateneingangsrate von ca. 10 GByte/s zu verarbeiten und dem FLT Informationen über Spurkandidaten mit einer Latenzzeit in der Größenordnung von 1 μs bereit zu stellen, machen einen modularen Aufbau des Myon-Pretrigger-Systems aus verschiedenen speziell entwickelten Elektronikmodulen erforderlich. Jeweils mehrere gleichartige Module führen parallel einen bestimmten Teil der Funktionen des Myon-Pretriggers aus.

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Funktion der Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems dargestellt.

3.1 Aufbau und Funktion der Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems

Das Myon-Pretrigger-System besteht aus drei verschiedenen Hauptkomponenten, dem Pretrigger Link Board (PLB), der Pretrigger Coincidence Unit (PCU) und dem Pretrigger Message Generator (PMG). Hinzu kommt der Pretrigger Optical Link (POL), der zur optischen Datenübertragung zwischen PLB und PCU verwendet wird. Abbildung 3.1 zeigt schematisch den Aufbau des Systems aus den einzelnen Komponenten. Die Verarbeitung der Daten für den äußeren Detektorbereich, das Pad-System, und für den inneren Detektorbereich, das Pixel-System, geschieht unabhängig voneinander durch zwei Teilsysteme. Die Eingangsdaten des Myon-Pretrigger-Systems werden durch PLBs von den Front End Driver-(FED-)Tochterkarten des Pad-Systems bzw. von den Pixel Mapping Boards (PMB) des Pixel-Systems über Flachbandkabelverbindungen übernommen. Die PLBs befinden sich zusammen

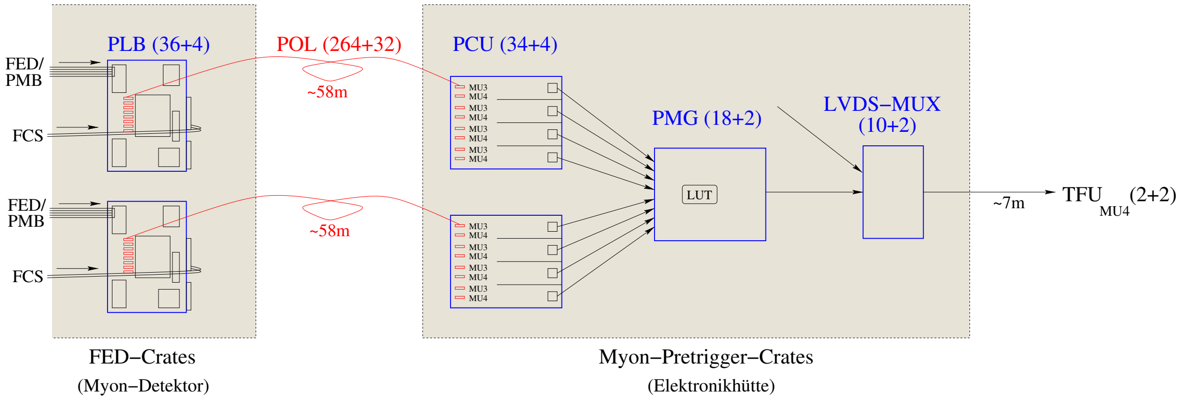


Abbildung 3.1: *Die Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems (nach [Sch 01]). In Klammern angegeben ist die Anzahl der jeweiligen Komponenten für das Pad- und Pixel-System. Die PLBs empfangen Detektordaten von FED-Tochterkarten im Falle des Pad-Systems und von Pixel Mapping Boards (PMB) in Falle des Pixel-Systems sowie Kontrollinformationen vom FCS. Die Daten werden über optische Verbindungen (POL) zu den PCUs übertragen. Diese senden Koinzidenzinformationen an die PMGs, die daraus die Nachrichten für die erste Triggerstufe erzeugen und über Multiplexer (LVDS-MUX) an TFUs übertragen.*

mit den FED-/PMB-Modulen in den FED-Crates (Crate: Einbaurahmen für Elektronik-Module) unterhalb des Myon-Detektors. Zu den Trefferdaten fügen die PLBs Kontrollinformationen des Fast Control System (FCS) hinzu, anschließend werden sämtliche Daten serialisiert und mittels der POLs über eine Entfernung von etwa 60 m zu den PCUs übertragen, die in der Elektronikhütte installiert sind. Diese parallelisieren die Daten und führen die Suche nach Spurkandidaten durch. Dazu werden Koinzidenzen von Treffern in den Superlagen MU3 und MU4 nach einem Schema gesucht, das in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Das im Pad-System angewendete Koinzidenzschema verlangt zu einem getroffenen Pad in MU3 wenigstens einen Treffer in den 3×2 dahinter liegenden Pads in MU4. Das Koinzidenzschema im Pixel-System erfordert mindestens einen Treffer in den 2×2 Pseudo-Pads, die hinter einem getroffenen MU3-Pseudo-Pad liegen. Die Informationen zu gefundenen Kandidaten werden von der PCU schließlich an den PMG übermittelt, der Nachrichten erzeugt, die jeweils eine RoI für eine TFU in der Superlage MU4 beschreiben. Die Nachrichten der PMGs werden über LVDS-Multiplexer (LVDS-MUX), die die Signale in den LVDS-Standard (Low Voltage Differential Signaling) konvertieren, an die TFUs der ersten Triggerstufe gesendet.

3.1.1 Das Pretrigger Link Board

Der Myon-Pretrigger verwendet im Pad-System die digitalisierten Trefferinformationen aus der Kathodenpadauslese der Spurkammern in den Superlagen MU3 und MU4 (vgl. Abbildung 2.4). Für das Pixel-System werden durch das PMB jeweils sechs benachbarte Auslesekanäle der Gas-Pixel-Kammern dieser Superlagen zu einem Pseudo-Pad zusammengefasst (siehe Abbildung 2.5), indem deren digitale Trefferdaten durch ein logisches ODER verknüpft werden. Dadurch wird die Zahl der Einzelkanäle reduziert und somit die Eingangsdatenmenge für

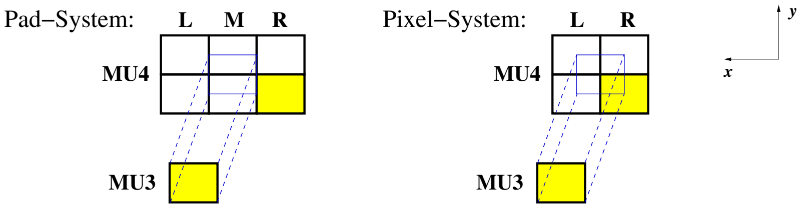


Abbildung 3.2: *Die Koinzidenzschemata für den Myon-Pretrigger (nach [Sch 01]). Wird zu einem getroffenen Pad in MU3 wenigstens ein Treffer in den* 3×2 *dahinter liegenden Pads in MU4 gefunden, so definiert dies einen Myonspur-Kandidaten im Falle des Pad-Systems. Im Pixel-System wird mindestens ein Treffer in den* 2×2 *Pseudo-Pads verlangt, die hinter einem getroffenen Pseudo-Pad in MU3 liegen. Zur Beschreibung des Treffermusters in MU4 werden die Spalten mit „L“, „M“ und „R“ bezeichnet, wobei „L“ dem niedrigstwertigen Bit entspricht.*

den Pretrigger im Pixel-System. Die Detektorsignale sind zu Pretrigger-Kanälen zusammengefasst, wobei ein Kanal die Trefferinformationen einer Spalte umfasst. Für das Pad-System, das bei $y = 0$ in eine obere und untere Hälfte geteilt ist, besteht eine Spalte aus 30 übereinander liegenden Kathodenpads in MU3 und aus 29 Pads in MU4. Im Pixel-System bilden 16 Pseudo-Pads in MU3 und 18 Pseudo-Pads in MU4 jeweils eine Spalte. Die digitalen Trefferdaten stehen für jedes Ereignis, also mit einer Rate von 10,4 MHz, an speziellen Ausgängen der FED- bzw. PMB-Karten an und werden über Flachbandkabel zu den PLBs [Cru 98a] übertragen, die sich in denselben FED-Crates befinden.

Abbildung 3.3 zeigt schematisch den Aufbau des PLBs. Das PLB besitzt acht Kanäle und kann somit die Daten von maximal acht Detektorspalten verarbeiten. Über eine rückseitige Steckerleiste nimmt das PLB das BX-Taktsignal und die acht Bits umfassende BX-Nummer auf, die vom FCS über eine Backplane (Steckerleiste an der Rückseite des Crates) verteilt werden. Das BX-Taktsignal wird zur Zeitsteuerung beim Einlesen der Detektordaten von den FED-Karten verwendet. Weil die Daten durch den Pretrigger und den FLT asynchron zum BX-Taktsignal verarbeitet werden, dient die BX-Nummer der eindeutigen Markierung der Daten einzelner Ereignisse. Die Daten durchlaufen die Triggerkette während der gesamten Prozessierung zusammen mit der BX-Nummer, die für akzeptierte Ereignisse die Position der zugehörigen Detektordaten in den Zwischenspeichern des FED-Systems kennzeichnet. Das PLB dekrementiert die vom FCS erhaltene BX-Nummer um eine Einheit, um der Latenzzeit in der Übertragung der Daten von den FED-Karten zum PLB Rechnung zu tragen, und fügt die modifizierte BX-Nummer den Eingangsdaten hinzu.

Das PLB spaltet die Eingangsdaten jedes Ereignisses in zwei Zyklen auf, die sequentiell mit einer nominellen Taktrate von 25 MHz verarbeitet werden. Da die Eingangsdatenrate 10,4 MHz beträgt, fügt das PLB Wartezyklen ein, so dass sich eine effektive Taktrate von 20,8 MHz für die Prozessierung der Datenzyklen ergibt. Zur Unterscheidung der beiden Zyklen generiert das PLB eine Zyklus-Nummer (CN: Cycle Number) und fügt sie wie die BX-Nummer den Daten hinzu, wobei der Wert $\mathrm{CN} = 0$ den ersten und $\mathrm{CN} = 1$ den zweiten Zyklus kennzeichnet. In Abbildung 3.4 ist dargestellt, wie die Eingangsdaten auf zwei Zyklen aufgeteilt und mit den Kontrollinformationen kombiniert werden. In der Abbildung sind die Eingangsda-

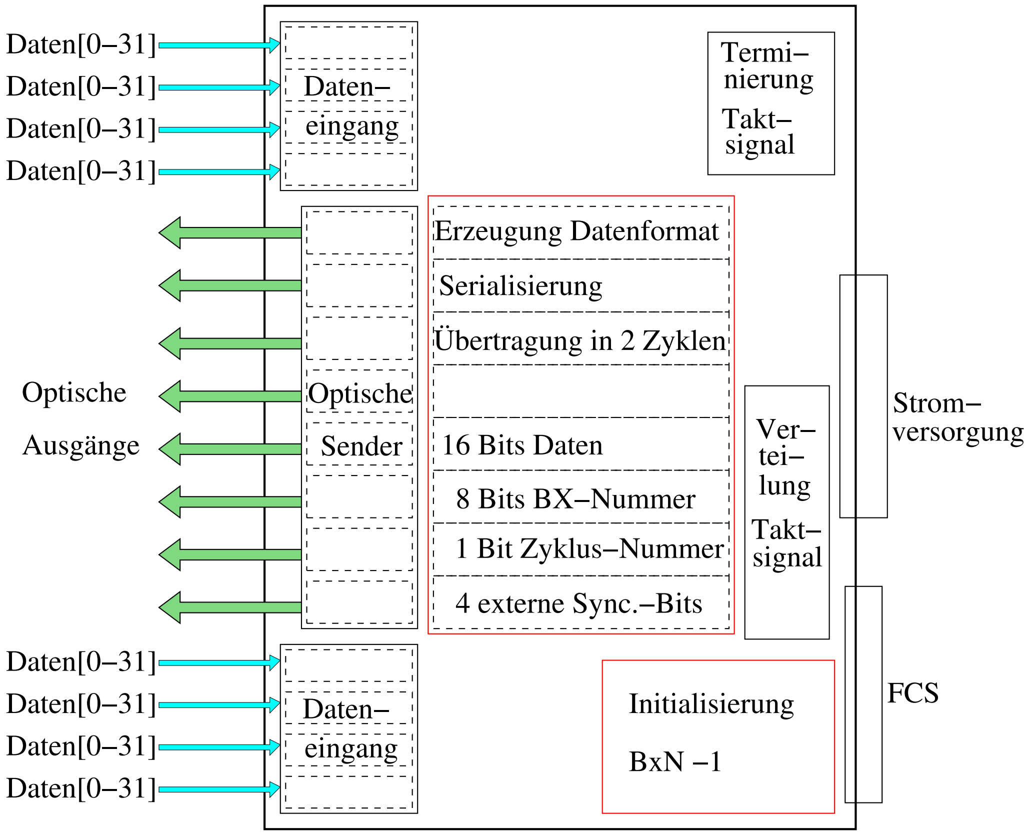


Abbildung 3.3: *Schematische Darstellung des PLBs [Cru 98b]. Den Eingangsdaten werden Kontrollinformationen vom FCS hinzugefügt. Die Daten werden in zwei Zyklen aufgeteilt, serialisiert und über optische Sender zu den PCUs übertragen.*

ten einer MU3-Spalte mit insgesamt 30 Pads dargestellt, die Daten einer MU4-Spalte sind ebenso angeordnet, nur das Datenbit für das dreißigste Pad ist unbenutzt. Aufgrund der Koinzidenzschemata (vgl. Abbildung 3.2) wird jedes MU4-Pad zur Koinzidenzsuche in zwei in y-Richtung benachbarten Reihen von MU3-Pads benötigt. Daher erzeugt das PLB eine Kopie des Datenbits D15, das dem MU4-Pad P15, dem letzten Pad des ersten Zyklus, entspricht, und legt es im Datenbit D16 ab, welchem kein MU4-Pad zugeordnet ist. Beide Zyklen setzen sich aus vier Bytes zusammen, an deren Anfang jeweils ein externes Synchronisationsbit eingefügt wird. Die vier Synchronisationsbits eines jeden Zyklus bilden die feste Abfolge „1110“ und dienen der Überprüfung der optischen Datenübertragung auf der Empfangsseite.

Die 32 Bits eines Zyklus werden mit Hilfe eines spezialisierten Bausteins [Mot 97] serialisiert und unter Verwendung des POLs [Glä 97] mit einer effektiven Übertragungsrate von 800 MBit/s über eine Distanz von ca. 60 m zur PCU übertragen. Der POL besteht aus einem Sender- und einem Empfängermodul, die als Aufsteckkarten auf dem PLB bzw. der PCU montiert sind, sowie aus einer optischen Faser.

Da das PLB über keinen Prozessor und keine Schnittstelle zur Steuerung und Kontrolle verfügt, müssen sämtliche zur Initialisierung notwendigen Funktionen automatisch nach

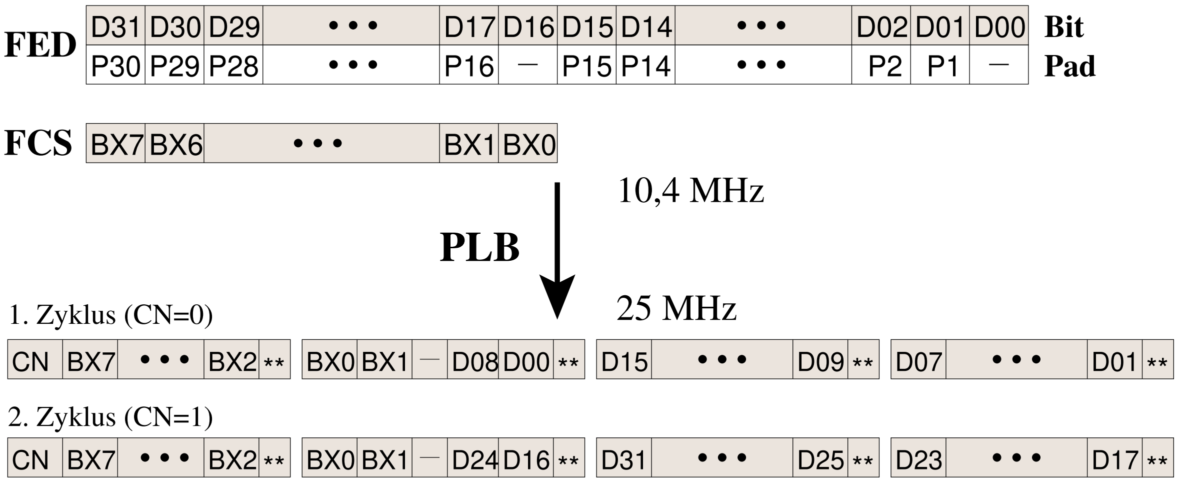


Abbildung 3.4: *Erzeugung des Datenformats auf einem PLB-Kanal (nach [Sch 01]). Aus den vom FED empfangen Daten D00 . . . D31 sowie der BX-Nummer BX0 . . . BX7 werden zwei Zyklen generiert, die jeweils die Hälfte der Detektordaten, die BX-Nummer, die Zyklus-Nummer sowie vier externe Synchronisationsbits (∗∗) enthalten. „• • •“ steht für die sinngemäße Fortführung einer Bitsequenz, „–“ für unbenutzte Bits.*

Stromzufuhr durchgeführt werden. Sie sind ebenso wie die Funktionen zur Datenprozessierung in programmierbaren Logikbausteinen implementiert. Für diese Bausteine werden Taktsignale mit einer Frequenz von 100 MHz auf dem PLB generiert, wobei die Verteilung und Terminierung dieser Taktsignale für die korrekte Funktion des PLBs bedeutend sind.

3.1.2 Die Pretrigger Coincidence Unit

Die Pretrigger Coincidence Unit (PCU) [Kol 98] ist die Komponente des Myon-Pretrigger-Systems, welche Koinzidenzen nach den oben beschriebenen Schemata in den Trefferdaten sucht. Die PCU besitzt vier gleichartig aufgebaute Kanäle, die jeweils die Daten einer MU3-Spalte und der drei zugehörigen MU4-Spalten verarbeiten. Zwei dieser so genannten Koinzidenz-Kanäle befinden sich auf der Hauptkarte, die anderen beiden auf einer Mezzanin-Karte, die auf die Hauptkarte aufgesteckt ist. Die PCU besitzt eine VME-Schnittstelle (VERSA Module Eurocard) [Ame 87], über die Funktionen zur Initialisierung und Kontrolle durchgeführt werden. Funktional lässt sich die PCU in drei Blöcke unterteilen: den Empfang und die Verteilung der von den PLBs empfangenen Daten, die Suche nach Trefferkoinzidenzen und schließlich die Serialisierung und Übertragung der Koinzidenzdaten an den PMG. In Abbildung 3.5 ist schematisch der Aufbau der PCU-Hauptkarte dargestellt, der im Folgenden getrennt nach den funktionalen Blöcken beschrieben wird.

Empfang und Verteilung der Eingangsdaten

Auf der Hauptkarte befinden sich acht POL-Empfängeraufsteckkarten, welche die optisch übertragenen Daten von vier MU3- und den vier dazugehörigen MU4-Spalten in elektrische

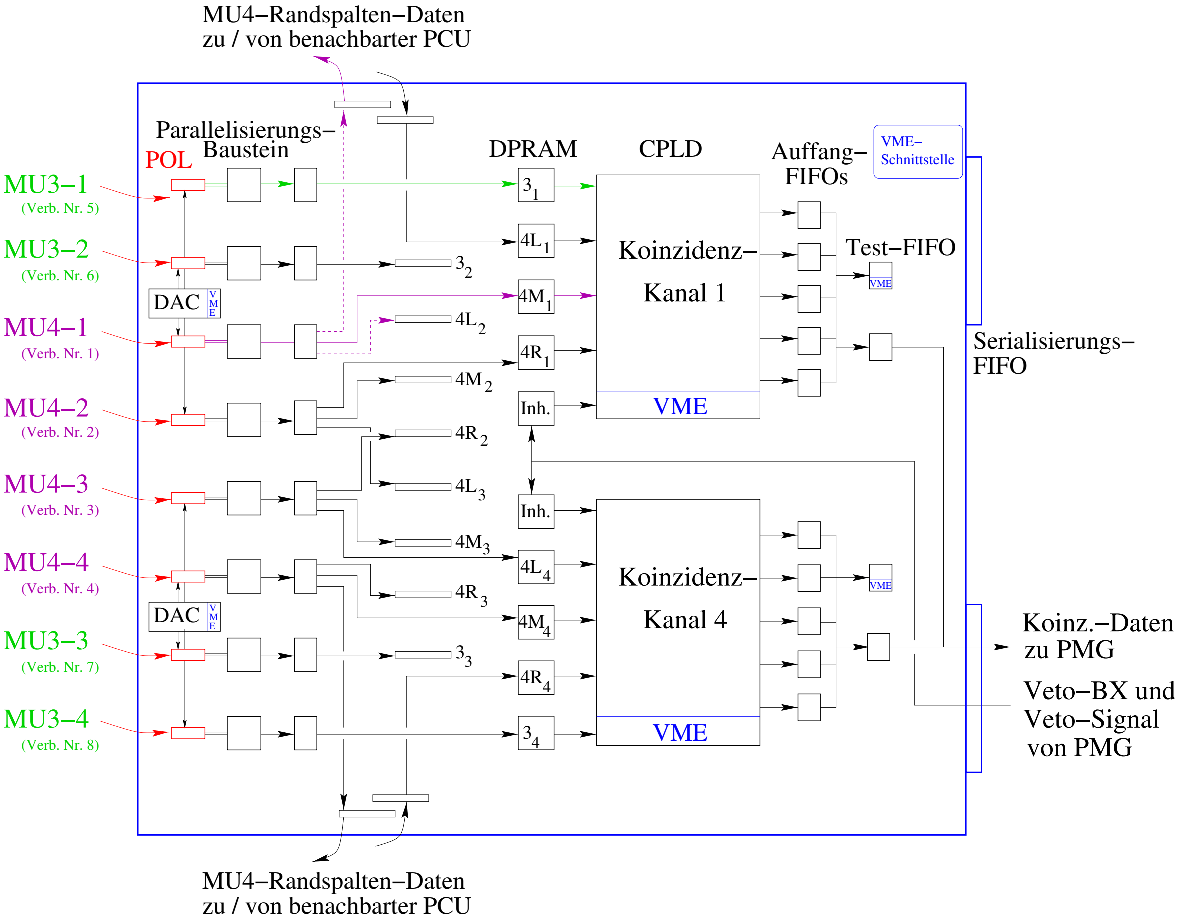


Abbildung 3.5: *Schematische Darstellung des PCU-Hauptkarte (nach [Sch 01]). Die Daten von vier MU3- und sechs MU4-Spalten werden auf die einzelnen Koinzidenz-Kanäle verteilt und zur Synchronisierung in DPRAMs zwischengespeichert. Die Koinzidenzsuche findet innerhalb der CPLDs statt. Über FIFOs werden die Koinzidenzdaten serialisiert und an den PMG gesendet.*

Signale umwandeln, die anschließend unter Verwendung des gleichen Bausteins parallelisiert werden, der auf dem PLB zur Serialisierung eingesetzt wird [Mot 97]. Das Koinzidenzschema für das Pad-System bedingt, dass für jeden Koinzidenz-Kanal die Daten einer MU3-Spalte und dreier MU4-Spalten benötigt werden. Jede MU4-Spalte muss entsprechend drei verschiedenen Koinzidenz-Kanälen zur Verfügung stehen. Die demnach notwendige Verteilung der Daten zu den verschiedenen Koinzidenz-Kanälen ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Die drei MU4-Spalten eines Koinzidenz-Kanals werden mit „L“, „M“ und „R“ bezeichnet und dienen gemäß Abbildung 3.2 der Kennzeichnung des Koinzidenzmusters, d. h. dem Treffermuster der MU4-Pads. Nach der Parallelisierung und Verteilung findet eine Synchronisierung der MU3- und MU4-Daten eines Koinzidenz-Kanals statt, um unterschiedliche Gesamtlaufzeiten der Daten der verschiedenen Spalten auszugleichen. Zeitunterschiede können durch unterschiedlich lange Kabel oder optische Fasern, sowie durch die unabhängige Prozessierung der PLB-Kanäle

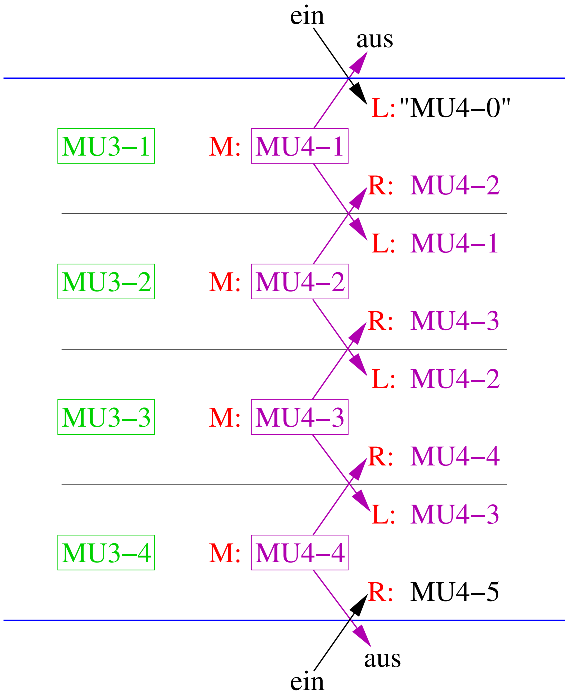


Abbildung 3.6: *Verteilung der Daten zu den Koinzidenz-Kanälen der PCU (nach [Sch 99]). Die Daten jeder MU4-Spalte werden zu drei Koinzidenz-Kanälen verteilt, wobei die Daten der Randspalten MU4-1 und MU4-4 auch zu Koinzidenz-Kanälen auf benachbarten PCUs übertragen werden („aus“). Ebenso werden Daten von MU4-Randspalten von diesen PCUs eingelesen („ein“). Die Bezeichnung der MU4-Spalten mit „L“, „M“ und „R“ entspricht der Bezeichnung des Treffermusters in MU4 in Abbildung 3.2.*

zustande kommen. Zum Zwecke der Synchronisierung werden die Daten der einzelnen Spalten separat in Dual Ported Random Access Memories (DPRAM, ein Speicherbaustein, der unabhängige Schreib- und Lesezugriff von zwei verschiedenen Seiten ermöglicht) geschrieben. Die Schreibadresse setzt sich aus den fünf niedrigstwertigen Bits der mit den jeweiligen Daten übertragenen BX-Nummer sowie der Zyklus-Nummer als niedrigstwertigem Bit zusammen. Alle acht Bits der BX-Nummer und das Zyklusbit, die zusammen mit den MU3-Daten eines Koinzidenz-Kanals empfangen wurden, werden in einer Registerstufe um drei Zyklen, also im Mittel um 144 ns, verzögert und anschließend in die Eingangsregister eines programmierbaren Logikbausteins (CPLD: Complex Programmable Logic Device) [Alt 01] geschrieben, der die Daten weiter verarbeitet. Gleichzeitig werden die MU3- und MU4-Daten aus den DPRAMs ausgelesen und ebenfalls in die Eingangsregister des CPLDs übernommen, wobei die oben genannte Schreibadresse als Leseadresse verwendet wird.

Suche nach Koinzidenzen

Für jeden Koinzidenz-Kanal befindet sich auf der PCU ein CPLD, in dem der Algorithmus zur Suche nach Trefferkoinzidenzen implementiert ist. Die Daten werden innerhalb des Logikbausteins in einer mehrstufigen Pipeline verarbeitet, die mit einer nominellen (effektiven) Taktrate von 25 (20,8) MHz arbeitet. Die einzelnen Stufen der Pipeline, die in Abbildung 3.7 dargestellt sind, werden im Folgenden beschrieben. Die BX- und Zyklus-Nummer – in der Abbildung nicht dargestellt – durchlaufen den Koinzidenz-CPLD parallel zu den Daten in einer Registerpipeline.

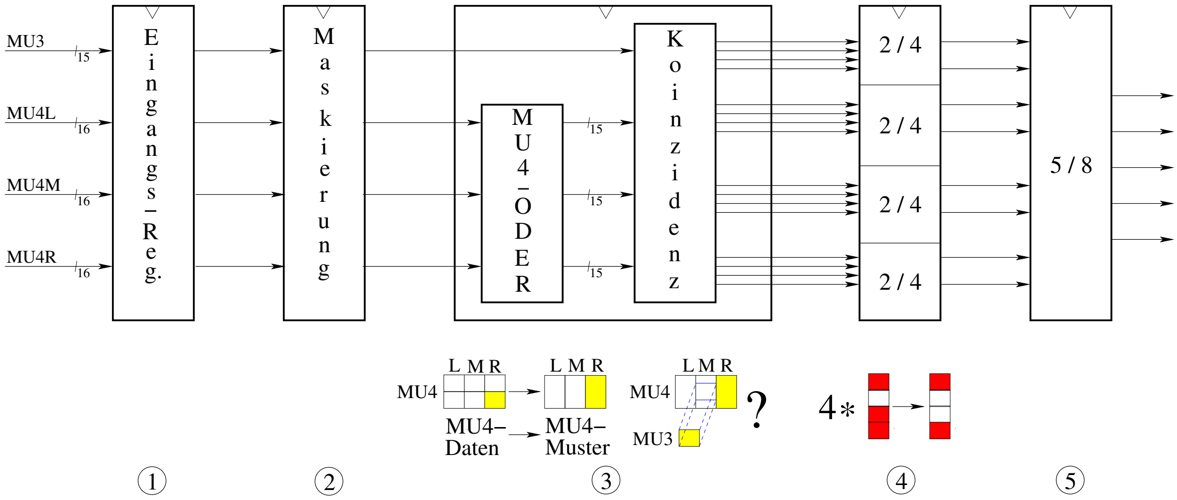


Abbildung 3.7: *Darstellung der Pipelinestufen des Koinzidenz-CPLDs für das Pad-System (nach [Sch 01]). Eine Erläuterung findet sich im Text.*

1. Die Daten der MU3- und MU4-Spalten eines Koinzidenz-Kanals werden zunächst synchron aus den DPRAMs ausgelesen und in die Eingangsregister geschrieben (①).

2. Die zweite Pipelinestufe erlaubt es, jedes Bit der Eingangsdaten zu maskieren, indem statisch eine logische „0“ gesetzt wird. Dies ist erforderlich, um zu verhindern, dass durch „heiße“ Kanäle eine sehr große Koinzidenzrate hervorgerufen wird. Solche Kanäle zeigen eine sehr große Trefferrate, beispielsweise verursacht durch eine fehlerhafte Ausleseelektronik, die Signale unabhängig von Teilchendurchgängen durch den Detektor generiert.

3. In der dritten Stufe werden die Daten der drei MU4-Spalten zunächst paarweise verodert, d.h. jeweils zwei benachbarte Pads einer Spalte werden durch ein logisches ODER verknüpft (Bit0 mit Bit1, Bit1 mit Bit2, ...). Dadurch wird das Treffermuster der einem MU3-Pad zugeordneten MU4-Pads durch drei statt ursprünglich sechs Bits beschrieben, wodurch keine Unterscheidung zwischen Treffern in der oberen und unteren Reihe mehr möglich ist. Anschließend findet die Koinzidenzsuche statt. Das Datenwort der MU3-Treffer wird durch ein Koinzidenzdatenwort ersetzt, in dem ein auf „1“ gesetztes Bit einer gefundenen Koinzidenz entspricht.

4. Die vierte Stufe der Pipeline dient dazu, die Koinzidenzadresse, d. h. die Position des MU3-Pads einer Koinzidenz innerhalb des Zyklus, zu bestimmen. Dazu wird das Koinzidenzdatenwort in vier Teile zu je vier Bits, die vier benachbarten MU3-Pads entsprechen, aufgeteilt. Diese Teildatenwörter bilden die Adressen für interne Look-up Tables

(LUT), die als Ergebnis die Koinzidenzadressen ausgeben. Zusätzlich wird ein Valid-Bit ausgegeben, das, falls es auf „1" gesetzt ist, eine gültige Koinzidenz markiert, d. h. ein Pad, für das die Koinzidenzbedingung erfüllt ist. Die LUT gibt stets zwei Adressen aus, dabei sind die folgenden Fälle zu unterscheiden:

- Falls kein Bit im Teildatenwort gesetzt ist, werden zwei beliebige Koinzidenzadressen ausgegeben, wobei die beiden zugehörigen Valid-Bits die Adressen als ungültig markieren.
- Ist ein Bit gesetzt, so wird die seiner Position entsprechende Koinzidenzadresse zweimal ausgegeben, jedoch nur einmal als gültig markiert.
- Befinden sich zwei gesetzte Bits im Teil des Koinzidenzdatenwortes, werden die beiden entsprechenden Koinzidenzadressen jeweils als gültig markiert ausgegeben.
- Bei mehr als zwei gesetzten Bits werden zwei Koinzidenzadressen mit gültigem Valid-Bit ausgegeben. Es werden die am weitesten voneinander entfernten Koinzidenzen ausgewählt, die anderen Koinzidenzen gehen verloren.

Aufgrund dieser Auswahl wird diese Stufe als „2/4"-Selektion bezeichnet, die aufgrund von Beschränkungen der internen Logikresourcen des CPLDs nötig ist. Die von den LUTs ausgegebenen Koinzidenzadressen dienen dazu, die zugehörigen Bits aus den MU4-Datenwörtern zu bestimmen, die das Koinzidenzmuster der MU4-Daten darstellen. Das Ergebnis dieser Pipelinestufe sind acht Koinzidenzdatensätze, die jeweils aus acht Bits bestehen: ein Valid-Bit, vier Bits als Koinzidenzadresse und drei Bits für das Koinzidenzmuster der MU4-Daten.

5. In der letzten Pipelinestufe werden die Koinzidenzdaten einzelnen Ausgabekanälen des CPLDs zugeordnet. Da deren Zahl auf fünf limitiert ist, werden, falls nach der „2/4"-Selektion mehr als fünf gültige Koinzidenzen in einem Zyklus verblieben sind, in einem zweiten Selektionsschritt („5/8") diejenigen fünf Koinzidenzen ausgewählt, die dem Protonstrahlrohr am nächsten gelegen sind. Die Zuordnung der Koinzidenzen zu den Ausgabekanälen sowie die Koinzidenzselektion sind in einer internen LUT des CPLDs implementiert. Die Koinzidenzdaten werden zusammen mit der BX- und Zyklus-Nummer in so genannte Auffang-FIFOs (FIFO: First in First out – Speicherbaustein, der unabhängige Schreib- und Lesezugriffe erlaubt, wobei die zeitliche Reihenfolge, in der die Daten gespeichert werden, erhalten bleibt) geschrieben. In Tabelle 3.1 ist das Format der Koinzidenzdaten aufgeführt. Beim Schreiben in die Auffang-FIFOs findet eine Null-

Tabelle 3.1: *Format der Koinzidenzdaten am Ausgang der PCU.*

Bit	Daten (Pad)	Daten (Pixel)
0	Zyklus-Nummer	Zyklus-Nummer
8 .. 1	BX-Nummer (BX[7] .. BX [0])	BX-Nummer (BX[7] .. BX[0])
11 .. 9	MU4-Muster (MU4R, MU4M, MU4L)	Koinzidenzadresse (MU3)
15 .. 12	Koinzidenzadresse (MU3)	MU4-Muster

unterdrückung statt, indem für Zyklen, in denen keine Koinzidenzen gefunden wurden, keine Daten in die FIFOs ausgegeben werden. Bei wenigstens einer gültigen Koinzidenz in einem Zyklus werden stets fünf Koinzidenzdatensätze in die Auffang-FIFOs übertragen. Dabei werden die gültigen Koinzidenzdaten geordnet nach ihrer Koinzidenzadresse ausgegeben, wobei die dem Protonstrahlrohr am nächsten liegende Koinzidenz in das erste FIFO geschrieben wird. Bei weniger als fünf gültigen Koinzidenzen werden als ungültig markierte Koinzidenzdaten in die übrigen Auffang-FIFOs übertragen, die bei der anschließenden Serialisierung unterdrückt werden.

Bis zu der letzten Pipelinestufe werden die Daten in einem festen zeitlichen Zusammenhang mit dem HERA-Taktsignal verarbeitet, während die weitere Prozessierung ereignisgetrieben, d. h. abhängig von der Zahl und Verteilung gefundener Koinzidenzen ist.

Serialisierung und Übertragung der Koinzidenzdaten

Vor der Übertragung zu einem PMG werden die Koinzidenzdaten der einzelnen Koinzidenz-Kanäle serialisiert. Stellt die in einem Logikbaustein implementierte Serialisierungskontrolle fest, dass sich Daten in dem ersten Auffang-FIFO befinden, so werden diese Koinzidenzdaten ausgelesen und in einem Serialisierungs-FIFO zwischengespeichert. Anschließend überprüft die Serialisierungskontrolle sukzessive die Valid-Bits der in den übrigen Auffang-FIFOs abgelegten Koinzidenzdatensätze und überträgt die Daten gültiger Koinzidenzen zu dem Serialisierungs-FIFO. Wird eine durch das Valid-Bit als ungültig markierte Koinzidenz gefunden, so bricht die Serialisierung ab und überprüft im nächsten Schritt wieder den Füllstand des ersten Auffang-FIFOs. Auf diese Weise gelangen nur gültige Koinzidenzdaten in den Serialisierungs-FIFO. Eine Kopie dieser Daten wird in dem Test-FIFO gespeichert, der eine Tiefe von 4096 Worten besitzt und über die VME-Schnittstelle ausgelesen werden kann.

Jeweils zwei PCUs und ein PMG sind zu einem Segment zusammengefasst und können über eine spezielle Backplane Daten und Kontrollsignale austauschen. Befinden sich Koinzidenzdaten in einem Serialisierungs-FIFO, so zeigt der betreffende Koinzidenz-Kanal dies dem PMG an, indem ein entsprechendes Kontrollsignal generiert wird. Der PMG überprüft ständig diese Kontrollsignale aller Koinzidenz-Kanäle der verbundenen PCUs und fordert sukzessive vorhandene Daten der Koinzidenz-Kanäle an, die von den Auffang-FIFOs der PCU über die Backplane übertragen werden.

Ereignisse mit hohen Treffermultiplizitäten stellen hohe Anforderungen an die Rekonstruktionsprogramme und es ist häufig schwerig, diese Ereignisse zu interpretieren. Außerdem können sie zu einer Blockierung des Triggersystems und demzufolge zu Totzeit führen. Im HERA – B Experiment werden spezielle Systeme eingesetzt, die ein Veto-Signal erzeugen, um die Verarbeitung solcher Ereignisse möglichst frühzeitig zu beenden. Die ECAL Energy Inhibit Card (ECAL EIC) generiert ein Veto-Signal, falls die Energiesumme im inneren Bereich des elektromagnetischen Kalorimeters einen einstellbaren Schwellenwert übersteigt. Das RICH-Veto-System erzeugt ein Veto-Signal, sobald die Trefferzahl im Ringbild-Čerenkov-Hodoskop oberhalb eines einstellbaren Schwellenwertes liegt. Dieses System wird zur Zeit entwickelt und in der kommenden Datennahmeperiode eingesetzt werden [Cru 01a]. Das Veto-Signal wird zusammen mit der BX-Nummer des dazugehörigen Ereignisses an die Pretrigger-Systeme weitergeleitet. Jeder PMG verteilt diese Informationen über die Backplane an die beiden im selben Segment angeschlossenen PCUs, wo das Veto-Signal und die Veto-BX-Nummer zu den CPLDs der einzelnen Koinzidenz-Kanäle geführt werden. Ist das Veto-Signal für ein Ereignis gesetzt, werden alle Koinzidenzdaten, die in die Auffang-FIFOs geschrieben werden, als ungültig markiert, so dass diese Ereignisse nicht weiter prozessiert werden.

3.1.3 Der Pretrigger Message Generator

Die Aufgabe des Pretrigger Message Generators (PMG) [Rie 00] ist es, die von den PCUs empfangenen Koinzidenzdaten in Nachrichten an die erste Triggerstufe zu übersetzen. Die Nachrichten in einem standardisierten Format [Ger 98] enthalten verschiedene Parameter, aus denen der FLT die RoI in MU4 ableitet, eine Impulsabschätzung sowie die BX-Nummer des Ereignisses.

Der Aufbau des PMGs ist schematisch in Abbildung 3.8 dargestellt. Auf dem PMG befindet

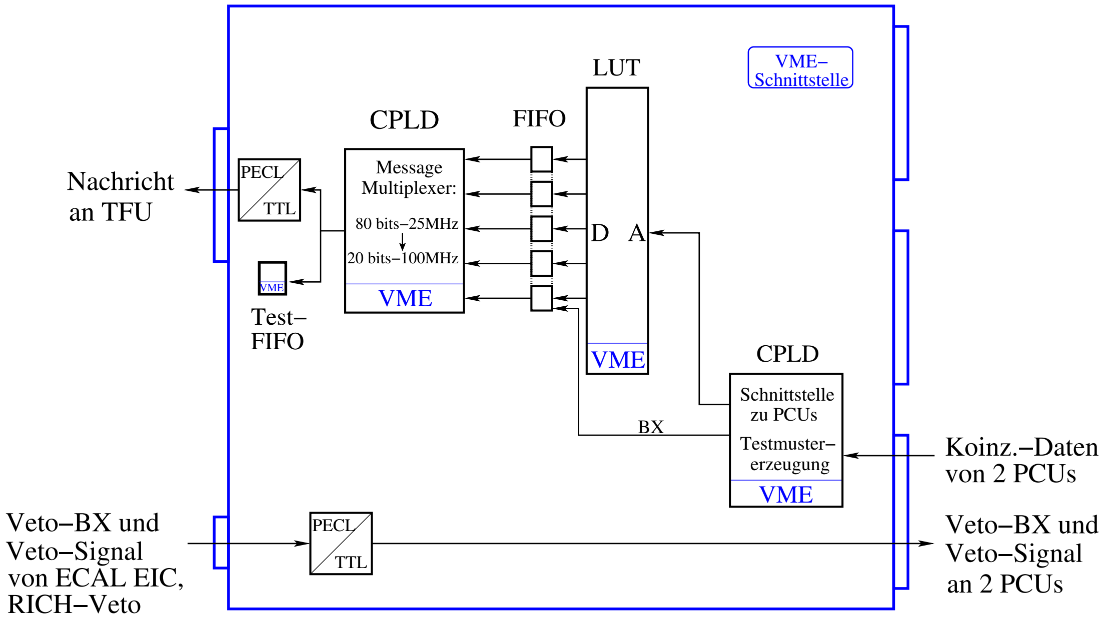


Abbildung 3.8: *Schematische Darstellung des PMGs (nach [Sch 01]). Ein CPLD kontrolliert die Schnittstelle zu den angeschlossenen PCUs. Die über die Backplane empfangenen Koinzidenzdaten werden mittels einer Look-up Table (LUT) in Nachrichten für den FLT übersetzt. Diese durchlaufen einen Multiplexer, werden in PECL-Signale umgewandelt und zum FLT übertragen. Der PMG leitet das Veto-Signal und die Veto-BX-Nummer von der ECAL Energy Inhibit Card (ECAL EIC) und vom RICH-Veto-System an die angeschlossenen PCUs weiter.*

sich ein programmierbarer Logikbaustein (CPLD) zur Kontrolle der Datenschnittstelle zu den angeschlossenen PCUs. Er wertet die über die Backplane übertragenen Kontrollsignale der maximal acht Koinzidenz-Kanäle auf den beiden PCUs aus, die im selben Segment installiert sind. Signalisiert ein Koinzidenz-Kanal, dass sich Koinzidenzdaten im Serialisierungs-FIFO befinden, so sendet der Kontrollbaustein auf dem PMG ein Signal, das den Datentransfer vom

Serialisierungs-FIFO zum Eingangsregister des PMGs initiiert. Sind in mehreren Koinzidenz-Kanälen gleichzeitig Daten vorhanden, so fordert der PMG sukzessive die Daten der einzelnen Kanäle an und stellt sicher, dass zu jedem Zeitpunkt nur ein Koinzidenz-Kanal Zugriff auf die gemeinsame Datenschnittstelle hat, um einen Kurzschluss zu vermeiden. Für die Erzeugung der Nachrichten an den FLT wird auch die x-Position der Koinzidenz benötigt, die in den von der PCU gesendeten Koinzidenzdaten nicht enthalten ist. Daher fügt der CPLD drei Bits hinzu, die der Unterscheidung der Koinzidenz-Kanäle dienen und aus denen unter Kenntnis der Zuordnung von Pretrigger-Modulen zu Detektorbereichen die genaue x-Position einer Koinzidenz bestimmt werden kann.

Die Nachrichten an den FLT werden mit Hilfe einer LUT generiert, die in einem RAM implementiert ist. Außer den acht Bits der BX-Nummer, die keinen Einfluss auf andere Parameter der FLT-Nachricht hat und unmittelbar und unverändert in die Nachricht übernommen wird, bilden die übrigen elf Bits der Koinzidenzdaten die Adresse für den Zugriff auf die LUT. Diese stellt an ihrem Datenausgang die aus den Koinzidenzdaten abgeleiteten Werte der Parameter bereit, die Bestandteil der FLT-Nachricht sind. Insgesamt besteht eine Nachricht aus 80 Bits, wobei 57 Bits durch die LUT bestimmt werden. Die BX-Nummer umfasst acht Bits, die verbleibenden 15 Bits sind für Parameter vorgesehen, die für Nachrichten vom Elektron-Pretrigger verwendet werden. Die von der LUT ausgegebenen Parameter der FLT-Nachricht und die BX-Nummer werden zunächst in einer FIFO-Stufe zwischengespeichert. Ein in einem CPLD [Glä 98] implementierter Multiplexer teilt die mit einer Rate von 25 MHz eingehenden Nachrichten in vier Teile zu je 20 Bits auf, die mit einer Rate von 100 MHz zum FLT übertragen werden, wobei die Signale vom TTL- (Transistor-Transistor Logic) ins PECL-Niveau (Positive Emitter Coupled Logic) konvertiert werden. Eine Kopie der zum FLT gesendeten Nachrichten wird in einem Test-FIFO abgespeichert, der maximal 128 Nachrichten aufnehmen und über die VME-Schnittstelle ausgelesen werden kann.

Neben der Erzeugung der Nachrichten für den FLT erfüllen die PMGs die Aufgabe, das Veto-Signal zusammen mit der Veto-BX-Nummer an die PCUs des jeweiligen Segments zu verteilen. Die von der ECAL EIC oder dem RICH-Veto-System generierten Signale gelangen über ein Verteilersystem [Rie 98] zu den PMGs, dort werden die Signale vom PECL- in das TTL-Niveau konvertiert und schließlich über die Backplane-Verbindung zu den beiden PCUs desselben Segments weitergeleitet.

Der PMG besitzt eine Schnittstelle zum VME-Bus, über die Funktionen zur Initialisierung und zur Funktionsüberwachung ausgeführt werden können. So dient die VME-Schnittstelle dazu, die LUT zu konfigurieren, indem die Daten in das RAM gespeichert werden. Zudem ist es möglich, die Daten aus der LUT zur Kontrolle des Inhalts zurückzulesen. Über die VME-Schnittstelle kann auch der Test-FIFO, der Kopien der an den FLT gesendeten Nachrichten enthält, ausgelesen werden.

3.2 Integration des Myon-Pretrigger-Systems in das HERA – B Experiment

Im Laufe der Datennahmenperiode des Jahres 2000 wurden sämtliche Komponenten des Myon-Pretriggers für das Pad-System in das HERA – B Experiment integriert und in Betrieb genommen. Damit die etwa 100 Elektronik-Module des Myon-Pretrigger-Systems in der

HERA – B Datennahmeumgebung zuverlässig und effizient eingesetzt werden konnten, wurde eine Online-Software entwickelt [Sch 01]. Sie basiert auf Treiberfunktionen, die den Zugriff auf die verschiedenen Pretrigger-Module über deren VME-Schnittstelle erlauben, um z. B. die Test-FIFOs auf der PCU und dem PMG auszulesen oder die LUT auf dem PMG zu konfigurieren. Die Online-Software besteht aus mehreren Prozessen, die verschiedene spezialisierte Funktionen ausführen und miteinander und auch mit Prozessen anderer Systeme kommunizieren.

Ein Bestandteil der Online-Software ist das Monitoring des Systems, das dazu dient, die korrekte Funktion des Myon-Pretriggers zu überwachen, und Rückschlüsse auf die Datenqualität ermöglicht. Durch die Analyse der Monitoring-Informationen konnten Fehlfunktionen der Pretrigger-Elektronik entdeckt und lokalisiert werden. Zudem wurde der Effekt defekter optischer Verbindungen und maskierter Kanäle untersucht, wobei die effektive Akzeptanz des Myon-Pretriggers in der Datennahmeperiode 2000 zu 93,9 % bestimmt wurde [Sch 01].

In der kommenden Datennahmeperiode des Jahres 2002 soll der Myon-Pretrigger für das Pixel-System vollständig in die HERA – B Datennahmeumgebung integriert und in Betrieb genommen werden, nachdem im Jahre 2000 die Elektronik-Module bereits installiert und erste Testmessungen durchgeführt wurden.

Kapitel 4

Softwareentwicklung für den Myon-Pretrigger

Im Rahmen dieser Arbeit wurde Software entwickelt, die es ermöglicht, das Verhalten des Myon-Pretrigger-Systems zu simulieren. Ein Simulationsprogramm wird unter anderem benötigt, um wichtige Kenngrößen des Myon-Pretrigger-Systems wie z. B. die Effizienz, mit der Kandidaten für Teilchenspuren gefunden werden, bestimmen zu können. Darüber hinaus können nur mit Hilfe der Simulation Informationen über interne Prozessierungsschritte des Myon-Pretrigger-Systems gewonnen werden, die beim Betrieb des realen Systems nicht ausgelesen werden können und somit nicht zugänglich sind. Ein Beispiel dafür ist die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Operation der Koinzidenzauswahlstufen innerhalb der Logikbausteine auf den Pretrigger Coincidence Units (PCU).

Mit Hilfe des Pretrigger Message Generators (PMG) werden die Nachrichten für die erste Triggerstufe aus den Koinzidenzdaten der PCU durch den Zugriff auf eine Look-up Table (LUT) erzeugt. Zur Berechnung der in den LUT-Bausteinen abgespeicherten Daten wird ein Programm benötigt, das ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.

4.1 Das Simulationsprogramm

Zunächst wird dargelegt, welcher Bedarf an einer Simulation des Myon-Pretrigger-Systems besteht und welche Anforderungen an das Simulationsprogramm gestellt werden. Daran anschließend wird das Myon-Pretrigger-System als abstraktes System im Rahmen der Systemtheorie klassifiziert und das zu seiner Beschreibung entworfene Simulationsmodell charakterisiert. Die Implementierung des Modells als Simulationsprogramm wird danach vorgestellt.

4.1.1 Der Bedarf an einer Simulation des Myon-Pretriggers

Eine Simulation des Myon-Pretrigger-Systems wird aus den folgenden Gründen benötigt:

- Die Simulation des gesamten Myon-Pretrigger-Systems erlaubt es, das Verhalten des realen Systems zu untersuchen. Aus einem Vergleich zwischen Simulation und realem System ergeben sich Informationen über wichtige Systemparameter, wie z. B. die Effizienz des Myon-Pretriggers, sowie Hinweise auf Defekte innerhalb der Pretrigger-Elektronik. Der Vergleich mit dem Ergebnis der Simulation ist die einzige Möglichkeit, die Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems zu bestimmen, da definierte Referenzsignale zur Kalibration im HERA – B Experiment nur sehr eingeschränkt erzeugt werden können.

- Die Simulation des Pretriggers liefert Informationen über interne Prozessierungsschritte der Pretrigger-Elektronik, welche im realen Betrieb nicht zugänglich sind. So erlaubt die Simulation bespielsweise, den Effekt der „2/4“- und „5/8“-Selektionsschritte der internen Pipeline des Koinzidenz-CPLDs (CPLD: Complex Programmable Logic Device) auf der PCU zu untersuchen. Diese Selektionsschritte wurden in Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

- Das Systemverhalten kann mit Hilfe der Simulation sowohl für aufgezeichnete Detektordaten als auch für nach der Monte-Carlo-Methode generierte Ereignisse untersucht werden. Mit Hilfe der Simulation können Vorhersagen über das Systemverhalten unter modifizierten Betriebsbedingungen gemacht werden. Beispielsweise kann die Koinzidenzrate für Wechselwirkungsraten vorhergesagt werden, unter denen das reale System noch nicht betrieben worden ist. Außerdem können Modifikationen der Hardware oder der LUTs vor der Implementation im realen System getestet werden.

- Als erstes Glied in einer Simulationskette für das gesamte Triggersystem des HERA – B Experimentes sucht die Simulation des Myon-Pretriggers analog zum realen Pretrigger-System Kandidaten für Myonspuren und generiert Triggernachrichten, die von den Simulationsprogrammen der ersten oder zweiten Triggerstufe als Startpunkte benötigt werden. In dieser Funktion wird die Simulation des Pretriggers verwendet, um beispielsweise neue Triggerszenarien und -strategien für das HERA – B Experiment zu untersuchen.

4.1.2 Die Anforderungen an die Simulation

Um dem oben genannten Bedarf gerecht zu werden, muss die Simulation des Myon-Pretrigger-Systems verschiedenen Anforderungen genügen:

- Das Verhalten des gesamten Myon-Pretrigger-Systems soll durch eine Simulation der logischen Bitoperationen beschrieben werden. Dies ermöglicht den Vergleich mit Daten, die im Betrieb des realen Systems an verschiedenen Stellen der Prozessierung ausgelesen werden können.

- Das Simulationsprogramm muss detailliert konfiguriert werden können, insbesondere muss die Konfiguration des realen Pretrigger-Systems nachgebildet werden können, so dass der Effekt defekter oder maskierter Kanäle bei der Simulation berücksichtigt wird.

- Sowohl reale Detektordaten als auch Monte-Carlo-Ereignisse sollen als Eingangsdaten für die Simulation verwendet werden können.

- Die Einzelschritte der Simulation sollen nachvollziehbar sein. Aus diesem Grund werden die Konfigurationseinstellungen und optional Informationen über die Prozessierung der Simulation protokolliert.

- Die Simulationssoftware soll modular aufgebaut sein, so dass Teile auch in anderen Programmen verwendet werden können, wie z. B. zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien.

- Da die Simulation des Myon-Pretriggers in verschiedene Analyseprogramme integrierbar sein soll, beispielsweise zur Simulation der gesamten Triggerkette, wird sie in Form einer Programmbibliothek erstellt.

4.1.3 Das Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird das Myon-Pretrigger-System zunächst im Rahmen der Systemtheorie als abstraktes System klassifiziert und anschließend das zu seiner Simulation entworfene Modell charakterisiert.

Die Klassifizierung des Myon-Pretrigger-Systems

Ein System, schematisch dargestellt in Abbildung 4.1, besteht aus einer Menge von Elementen, deren Eigenschaften durch verschiedene Attribute charakterisiert werden. Die Gesamtheit der Attribute aller Elemente beschreibt den Zustand des Systems. Das Verhalten des Systems wird durch eine Abfolge von Zuständen in der Zeit beschrieben. Zwischen den Elementen eines Systems bestehen Beziehungen, wobei besonders Interaktionsbeziehungen, bei denen der Zustand eines Elements den Zustand eines anderen Elements kausal beeinflusst, von Bedeutung sind. Nach der Art der Beziehungen eines Systems zu seiner Umgebung unterscheidet man offene und geschlossene Systeme. Ein offenes System hat mindestens eine Interaktionsbeziehung zur Systemumgebung.

Das Myon-Pretrigger-System erhält seine Eingangsdaten vom Auslesesystem des Myon-Detektors und sendet nach der Prozessierung der Daten Nachrichten an den First Level Trigger (FLT). Da sowohl der Detektor als auch der FLT zur Systemumgebung gehören, stellt der Myon-Pretrigger ein offenes System dar. Der Zustand des Myon-Pretriggers ändert sich mit der Zeit, es handelt sich also um ein dynamisches System, wobei die Zustandsänderungen in diskreten Schritten stattfinden, da es sich bei den Elementen um digitale Schaltungen handelt. Bei der Prozessierung des Myon-Pretriggers kommt es zu Rückkopplungen, zum Beipiel an der Schnittstelle zwischen PCU und PMG. Ein dynamisches System mit Rückkopplungen wird als kybernetisches System bezeichnet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Myon-Pretigger ein offenes, dynamisches, diskretes und kybernetisches System darstellt.

Das Modell des Myon-Pretrigger-Systems

Ein Modell ist ein Abbild des zu untersuchenden Systems und stellt die konzeptionelle Grundlage zur Implementierung des Simulationsprogrammes dar. In Abbildung 4.2 ist der Prozess der Modellbildung, durch den Systeme in Modelle abgebildet werden, und der Simulation schematisch dargestellt.

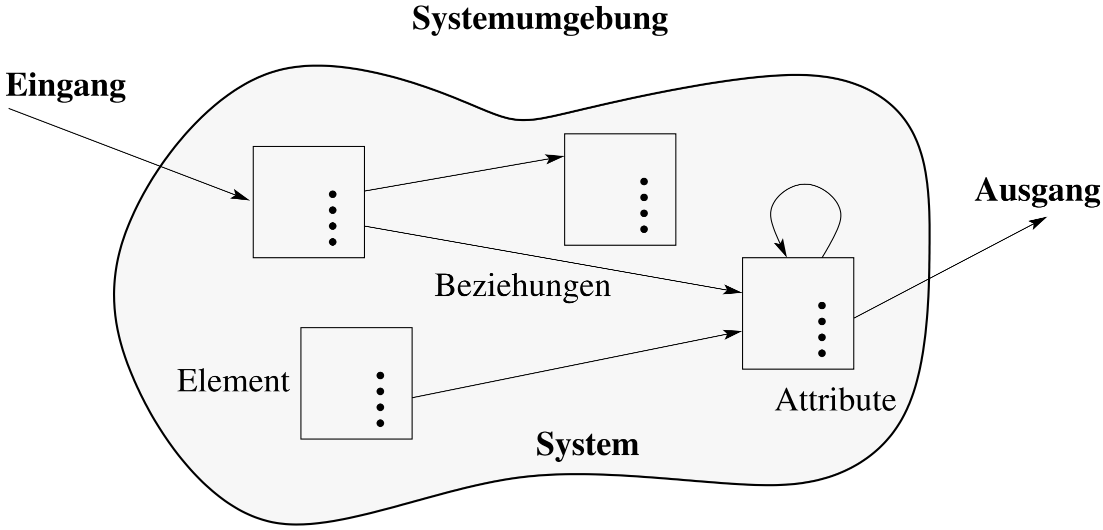


Abbildung 4.1: *Schematische Darstellung eines Systems (nach [Pag 91]). Dargestellt sind verschiedene Elemente des Systems (Rechtecke) mitsamt ihren Attributen (Punkte). Zwischen den Elementen bestehen Interaktionsbeziehungen, die durch Pfeile symbolisiert sind. Der Zustand eines Elementes, auf das eine Pfeilspitze zeigt, wird durch den Zustand des Elementes beeinflusst, von dem der Pfeil ausgeht. Zudem gibt es Beziehungen zwischen Elementen des Systems und Elementen aus der Systemumgebung, die als Eingang und Ausgang dargestellt sind.*

Zur Charakterisierung eines Modells kann eine Klassifizierung der Art der Zustandsübergänge herangezogen werden. Das zur Untersuchung des Verhaltens des Myon-Pretrigger-Systems entworfene Simulationsmodell ist dynamisch und diskret, entsprechend der Art der Zustandsänderungen des realen Systems. Das Verhalten der einzelnen im Modell abgebildeten Komponenten ist deterministisch, da bei einem gegebenen Zustand für bestimmte Eingangsdaten der Übergang in den Folgezustand immer eindeutig festgelegt ist.

Der Prozess der Modellbildung geht mit einer Abstraktion und einer Idealisierung des realen Systems einher. Dabei bestimmt die Fragestellung und Zielsetzung der mit Hilfe des Simulationmodells durchgeführten Untersuchungen, inwieweit eine vereinfachte Beschreibung möglich ist, so dass die Untersuchung besser handhabbar wird. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die wesentlichen Eigenschaften des Systems genau beschrieben werden müssen, damit die Simulationsergebnisse auf das Originalsystem übertragen werden können. Das Modell des Myon-Pretriggers beschreibt allein die Logikoperationen der digitalen Pretrigger-Elektronik in diskreten Zeitschritten. Die physikalischen Eigenschaften der elektronischen Bauelemente des Myon-Pretrigger-Systems, wie zum Beispiel Signalanstiegszeiten oder das Übersprechen zwischen Leitungen, werden im Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Eine weitere Idealisierung betrifft die Taktung der einzelnen Schaltungen, die einzelne Funktionen des Myon-Pretrigger-Systems ausführen. Im realen System werden verschiedene Taktgeber verwendet, da die Schaltkreise unabhängig voneinander und mit unterschiedlichen Taktfrequenzen arbeiten. Die Zeitdiskretisierung des Simulationsmodells ergibt sich aus den Zeitintervallen, die durch aufeinander folgende Ereignisse definiert werden. Dabei wird angenommen, dass

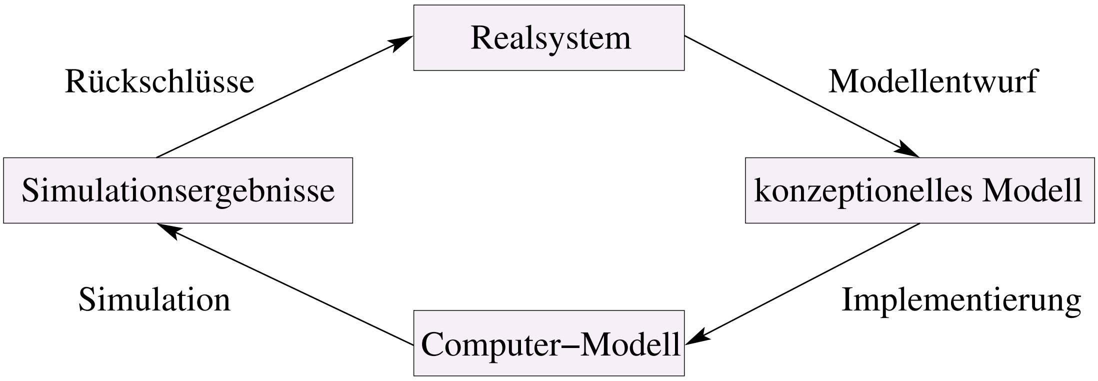


Abbildung 4.2: *Schematische Darstellung der Modellbildung und Simulation (nach [Pag 91]). Für ein Realsystem wird zunächst ein konzeptionelles Modell entworfen. Dieses wird als Computer-Modell in Form eines Simulationsprogrammes implementiert. Die Ergebnisse der Simulation lassen Rückschlüsse auf das modellierte Realsystem zu.*

die Ereignisse zu äquidistanten Zeitpunkten stattfinden und dass die Zeitdifferenz zwischen zwei Ereignissen gemäß der HERA-Taktrate $96\,\mathrm{ns} = (10{,}4\,\mathrm{MHz})^{-1}$ beträgt. Um den Aufwand und Rechenzeitbedarf der Simulation zu begrenzen, wurden sämtliche Prozessierungsschritte, die im realen System in einem festen zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal ablaufen, in Form von Prozessroutinen implementiert, bei deren Aufruf die Simulationszeit um einen festen Betrag erhöht wird. Dieser entspricht dem mittleren Zeitbedarf der jeweiligen Prozessierungsschritte und wurde durch Messungen am realen System bestimmt. Die ereignisgetrieben arbeitenden Schaltkreise des Systems, für die der Zeitbedarf der Prozessierung datenabhängig ist, sind im Simulationsmodell ebenfalls nachgebildet. Dabei findet für jedes Ereignis eine bestimmte Zahl von Zustandsübergängen statt, die sich aus dem Verhältnis der Taktfrequenz des jeweiligen Schaltkreises zu der Ereignisrate ergibt. Ein mit einer Taktrate von 100 MHz betriebener Schaltkreis führt bei einer Ereignisrate von etwa 10 MHz im Simulationsmodell pro Ereignis zehn Zustandsübergänge durch.

In den folgenden Abschnitten werden die für das Simulationsprogramm verwendete Software-Technologie und die Implementierung des Simulationsmodells vorgestellt.

4.1.4 Die verwendete Software-Technologie

Es wurde das Simulationsprogramm MUPRESIM entwickelt, in dem das zuvor beschriebene Simulationsmodell für das Myon-Pretrigger-System umgesetzt worden ist. Zum Entwurf des Simulationsprogramms wurde die objektorientierte Methode angewendet, die folgendermaßen definiert werden kann [Boo 94]:

> Objektorientierte Programmierung ist eine Implementierungsmethode, bei der Programme als eine kooperierende Ansammlung von Objekten aufgebaut sind. Jedes dieser Objekte stellt eine Instanz einer Klasse dar, und alle Klassen sind Teil einer Klassenhierarchie, die durch Vererbungsbeziehungen gekennzeichnet ist.

Die objektorientierte Programmierung basiert konzeptionell auf dem Objektmodell, dessen Hauptelemente die Abstraktion, Kapselung, Modularität und Hierarchie sind. Durch den Prozess der Abtraktion werden Eigenschaften und Verhaltensweisen von Objekten mit Hilfe von abstrakten Datentypen beschrieben, die als Klassen bezeichnet werden. Unter Kapselung wird die Trennung von Implementierung und Schnittstelle einer Abstraktion verstanden. Dies ist ein wichtiges Mittel, um Software wartbar und wiederverwendbar zu gestalten. Eine Kapselung wird dadurch erzielt, dass nur über seine Schnittstellen auf die Daten eines abstrakten Datentyps zugegriffen werden kann und dass Details der Implementierung eines Datentyps verborgen werden. Ein modularer Programmaufbau wird durch die Gruppierung von inhaltlich zusammenhängenden Programmteilen zu separat übersetzbaren Komponenten erzielt. Die hierarchische Anordnung der Abstraktionen in Form einer Klassenstruktur bringt die Beziehungen zwischen den modellierten Objekten zum Ausdruck. Die objektorientierte Entwurfsmethode ist zur Implementierung eines Simulationsmodells gut geeignet, da sie konzeptionell der Modellbildung zur Abstraktion eines realen Systems sehr ähnlich ist.

MUPRESIM ist in der Programmiersprache C++ erstellt, die Sprachelemente enthält, welche die objektorientierte Programmierung unterstützen. Die Wahl von C++ als Implementierungssprache ist auch deswegen von Vorteil, weil diese Programmiersprache im HERA – B Experiment zur Realisierung vieler Programmpakete – beispielsweise zur Ereignisrekonstruktion – eingesetzt wird, die in der HERA – B Softwareumgebung ARTE [Alb 95] zusammengefasst sind. ARTE stellt eine C++-Schnittstelle zur Verfügung, über die auf sämtliche Datenstrukturen zugegriffen werden kann. Durch die Einbindung der entsprechenden Programmbibliotheken kann die Simulation des Myon-Pretrigger-Systems in ein ARTE-basiertes C++-Programm integriert werden, das zudem den Zugriff auf die Detektordaten oder Daten von Monte-Carlo-Ereignissen ermöglicht.

4.1.5 Die Komponenten des Simulationsprogrammes

In den folgenden Abschnitten wird das Simulationsprogramm MUPRESIM beschrieben, dessen Struktur in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt ist. Gemäß der objektorientierten Entwurfsmethode sind die Komponenten des Simulationsmodells als Klassen implementiert, wobei sich die Relationen zwischen den Komponenten in der Klassenhierarchie widerspiegeln.

Mit Hilfe einer Konfigurationsklasse werden sämtliche Einstellungen gehandhabt, die der Konfiguration und Steuerung der Simulation dienen. Alle Informationen, welche die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems definieren, wie zum Beipiel die Zuordnung von Pretrigger-Kanälen zu Detektorbereichen oder die Maskierung heißer Kanäle, werden mit Hilfe einer System-Setup-Klasse verwaltet. Diese Klasse verwendet Instanzen einer Kabel- und einer Spaltenklasse, die dazu dienen, die Anordnung der Auslesekanäle und der Detektorspalten abzubilden. Das Verhalten der verschiedenen Elektronikmodule des Myon-Pretriggers wird durch entsprechende Klassen für das Pretrigger Link Board (PLB), die PCU und den PMG nachgebildet, die Instanzen der Koinzidenz- bzw. Nachrichtenklassen verwenden. Der Erzeugung der Triggernachrichten aus den Koinzidenzinformationen dient eine LUT-Klasse. Die Informationen zur Detektorgeometrie, die benötigt werden, um die verschiedenen Parameter der Triggernachrichten zu bestimmen, werden durch eine Geometrieklasse verwaltet.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Simulationsprogrammes beschrieben.

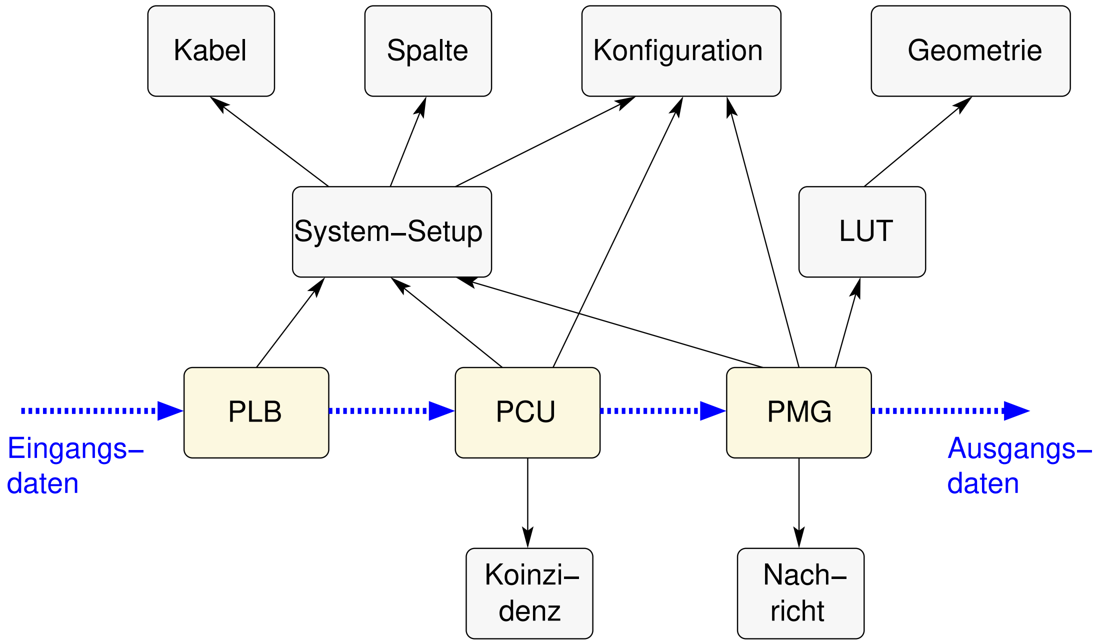


Abbildung 4.3: *Die Struktur des Simulationsprogrammes MUPRESIM. Gezeigt sind die wesentlichen Komponenten und ihre Relationen. Die Komponenten sind im Simulationsprogramm als Klassen oder Kollektionen mehrerer Klassen implementiert. Der Datenstrom durch das Myon-Pretrigger-System ist durch die gestrichelten Pfeile dargestellt. Die durchgezogenen Pfeile symbolisieren die Relationen zwischen den Komponenten. Eine Komponente, auf die eine Pfeilspitze zeigt, wird von der Komponente verwendet, von der der Pfeil ausgeht. Eine genauere Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.1.5*

Die Koinzidenzklasse

Diese Klasse stellt einen abstrakten Datentyp dar, in dem die Informationen über Koinzidenzen zusammengefasst sind. Detektiert die Simulation des Myon-Pretriggers eine Koinzidenz, so wird eine neue Instanz der Koinzidenzklasse gebildet und weiter verarbeitet. Die Koinzidenzklasse enthält als Datenelemente alle in Tabelle 3.1 aufgeführten Bestandteile der Koinzidenzdaten, wie sie im realen Pretrigger-System von der PCU zum PMG übertragen werden. Zusätzlich gibt es noch weitere Datenelemente, darunter die Latenzzeiten einer Koinzidenz nach verschiedenen Prozessierungsstufen sowie die Spalten- und Zeilennummern des getroffenen MU3-Pads.

Die Klasse für Triggernachrichten

Die Triggernachrichten, die das Simulationsprogramm zu gefundenen Koinzidenzen generiert, stellen Instanzen einer speziellen Klasse dar, deren Datenelemente den verschiedenen Parametern einer Triggernachricht entsprechen. Gemäß der Definition des Nachrichtenformats [Ger 98] setzen sich die von den Pretriggern und den Track Finding Units (TFU) verwendeten Triggernachrichten aus den in Tabelle 4.1 aufgelisteten Parametern zusammen.

Tabelle 4.1: *Das Format der Triggernachrichten. Angegeben ist die Bezeichnung der Nachrichtenparameter sowie ihre Bedeutung. Die für die einzelnen Parameter verwendete Anzahl von Bits ist aufgeführt, ebenso die Position des ersten Bits der jeweiligen Parameter innerhalb der Triggernachricht. Die Parameter, die mittels der LUT auf dem PMG bestimmt werden, sind markiert (✓),und es ist angegeben, ob die Parameterwerte fest oder variabel, d. h. abhängig von den Koinzidenzdaten, sind.*

Parameter		Länge in Bits	Position 1. Bit	LUT PMG	fest oder variabel
TDI	Identifikationsnummer Empfänger	8	0	✓	fest
$n\xi$	Nachrichtenverdoppelung	1	8	✓	variabel
ξ	x-Koordinate	10	9	✓	variabel
$d\xi$	Spursteigung	8	19	✓	variabel
$dd\xi$	Größe des Suchfensters	8	27	✓	variabel
η	y-Koordinate	9	35	✓	variabel
w	Zahl benachbarter Detektorzellen	2	44	✓	fest
all	Treffer in jeder TFU-Lage	1	46	✓	fest
BX	BX-Nummer	8	47	-	-
ID	Pretrigger-Identifikationsnummer	2	55	✓	fest
P	Impulsabschätzung	7	57	✓	variabel
$flag$	unbedingte Weiterleitung	1	64	✓	fest
E^+	Bremsstrahlungskorrektur Positron	7	65	✓	fest
E^-	Bremsstrahlungskorrektur Elektron	7	72	-	-
nc	bisher unbenutzt	1	79	-	-

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bestimmt, wie die Parameter der vom Myon-Pretrigger-System erzeugten Triggernachrichten auf der Grundlage der allgemeinen Definition des Nachrichtenformats berechnet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Parameter der Triggernachricht beschrieben, und es wird dargelegt, wie sich die einzelnen Parameter aus den Koinzidenzinformationen ergeben. Zudem wird gezeigt, wie aus einer Nachricht des Myon-Pretriggers die Region of Interest (RoI) in der Superlage MU4 bestimmt wird, in der die TFU nach Anodendrahttreffern sucht. Zunächst werden die Parameter beschrieben, die unmittelbar zur Definition einer RoI verwendet werden. In Abbildung 4.4 ist schematisch dargestellt, durch welche Parameter der Triggernachricht eine RoI in MU4 beschrieben wird und wie sich die Parameter aus der Trefferkombination zu einer Koinzidenz ergeben.

Der Parameter ξ beschreibt die x-Position einer Koinzidenz. Das höchstwertige Bit gibt das Vorzeichen an, während die übrigen neun Bits zur Kodierung der Position verwendet werden. Im Falle des Myon-Pretriggers entspricht ξ der Position $x_{\mathrm{MU3}}^{\mathrm{max}}$ des Randes des MU3-Pads einer Koinzidenz mit dem größten x-Wert:

$$\xi := x_{\mathrm{MU3}}^{\mathrm{max}} \; . \tag{4.1}$$

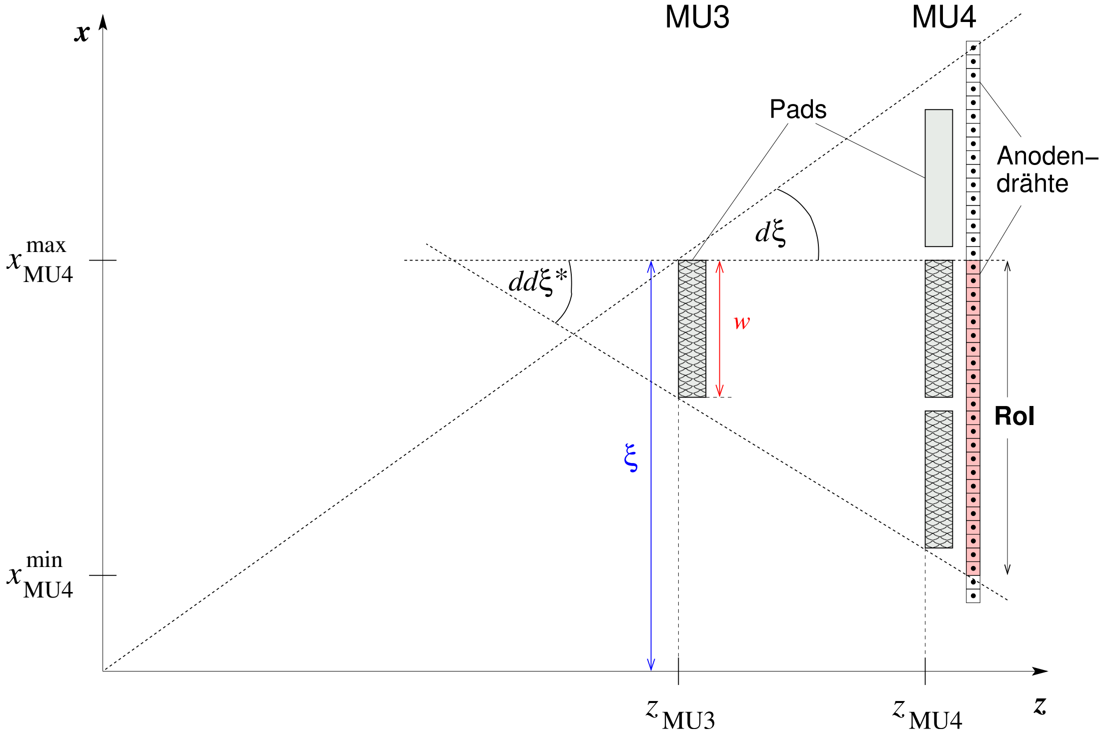


Abbildung 4.4: *Definition der Region of Interest (RoI) durch Parameter der Triggernachricht. Dargestellt ist eine Koinzidenz, bei der neben dem MU3-Pad zwei von drei MU4-Padpaaren getroffen sind (schraffiert). Die aufgeführten Parameter dienen dazu, die RoI in MU4 zu bestimmen, in der die TFU nach Anodendrahttreffern sucht.*

Der Parameter w gibt die Anzahl benachbarter Detektorzellen an, in denen die zu einer Koinzidenz gehörenden Treffer liegen. Der mögliche Wertebereich für w beträgt 0 bis 3, wobei $w = 0$ einer Detektorzelle entspricht, da es zu jeder Koinzidenz mindestens einen Treffer geben muss. Für die Nachrichten des Myon-Pretriggers ergibt sich w aus der Breite der zu einer Koinzidenz gehörenden Treffer in MU3. Da für jede Koinzidenz genau ein MU3-Pad getroffen ist, besitzt w für alle Nachrichten des Myon-Pretriggers den festen Wert

$$w = 0\ . \tag{4.2}$$

Wie oben beschrieben entspricht dieser Wert einer Breite von einer Detektorzelle, also einem MU3-Pad. Der Parameter $d\xi$ beschreibt die minimale Steigung eines Spurkandidaten in der x-z-Ebene relativ zu der Steigung der Spur eines Teilchens, das vom Target kommt und unendlich großen Impuls besitzt. Im Fall des Myon-Pretriggers ergibt sich $d\xi$ als Winkel in der x-z-Ebene zwischen der Geraden durch die Punkte (0,0) und (ξ,z_{MU3}) und der Geraden durch die Punkte (ξ,z_{MU3}) und ($x_{\mathrm{MU4}}^{\mathrm{max}}$,$z_{\mathrm{MU4}}$). Es gilt folgende Definition:

$$d\xi := \frac{x_{\mathrm{MU3}}^{\mathrm{max}} \cdot z_{\mathrm{MU4}} - x_{\mathrm{MU4}}^{\mathrm{max}} \cdot z_{\mathrm{MU3}}}{z_{\mathrm{MU3}} \cdot (z_{\mathrm{MU4}} - z_{\mathrm{MU3}})} = \frac{\xi \cdot \frac{z_{\mathrm{MU4}}}{z_{\mathrm{MU3}}} - x_{\mathrm{MU4}}^{\mathrm{max}}}{z_{\mathrm{MU4}} - z_{\mathrm{MU3}}}\ . \tag{4.3}$$

Somit kann aus den Nachrichtenparametern ξ und $d\xi$ unter Kenntnis der z-Positionen der MU3- und MU4-Superlagen die Position $x_{\mathrm{MU4}}^{\mathrm{max}}$ der MU4-Suchregion bestimmt werden.

Durch den Parameter $dd\xi$ wird die Größe der RoI in MU4 beschrieben. Er ist definiert durch

$$dd\xi := (x_{\text{MU4}}^{\max} - x_{\text{MU4}}^{\min}) - (x_{\text{MU3}}^{\max} - x_{\text{MU3}}^{\min}) = (x_{\text{MU4}}^{\max} - x_{\text{MU4}}^{\min}) - w\,. \tag{4.4}$$

In der Abbildung 4.4 ist der Winkel $dd\xi^*$ dargestellt, wobei gilt:

$$dd\xi^* = \frac{dd\xi}{z_{\text{MU4}} - z_{\text{MU3}}}\,. \tag{4.5}$$

Aus den Parametern ξ und $d\xi$ ergibt sich mit Gleichung (4.3) $x_{\text{MU4}}^{\max}$ und daraus zusammen mit $dd\xi$ und w die Position $x_{\text{MU4}}^{\min}$ und somit die gesamte Suchregion in MU4. Falls die RoI in MU4 mehr als 32 Anodendrähte umfasst, so ist es notwendig, zwei Triggernachrichten zu erzeugen, da eine TFU maximal 32 Detektorkanäle in einer RoI adressieren kann. Dazu wird der Nachrichtenparameter $n\xi$ auf eins gesetzt, wodurch der empfangenden TFU signalisiert wird, dass die gesamte RoI mehr als 32 Detektorkanäle umfasst.

Der Parameter η gibt die Steigung eines Spurkandidaten in der y-z-Ebene an. Für die Nachrichten des Myon-Pretriggers wird η folgendermaßen definiert:

$$\eta := \frac{y_{\text{MU3}}}{z_{\text{MU3}}}\,, \tag{4.6}$$

wobei y_{MU3} die y-Position der Mitte des MU3-Pads einer Koinzidenz ist. Da die Pad-Kammern der Superlagen MU3 und MU4 nur eine Lage von Anodendrähten besitzen, die senkrecht zur x-z-Ebene verlaufen, können die TFUs durch Hinzunahme der Drahttrefferinformationen nur die x-Koordinaten der Spurkandidaten bestimmen. Durch die Drahttrefferinformation wird im Vergleich zu den Pretriggerinformationen eine verbesserte Auflösung erzielt. Eine RoI in MU3 und MU4 ist nur in x-Richtung begrenzt, wozu die Parameter ξ, $d\xi$, $dd\xi$ und w dienen. Die TFUs der Superlage MU1 verwenden die Trefferinformationen aller drei Stereolagen und können daher auch die y-Positionen der Spurkandidaten bestimmen. Eine RoI in MU1 muss auch in y-Richtung definiert und begrenzt werden, wobei sich die y-Position des Zentrums der RoI unmittelbar aus dem Parameter η der Myon-Pretrigger-Nachricht und der z-Position der MU1-Superlage ergibt:

$$y_{\text{MU1}}^{\text{RoI}} = \eta \cdot z_{\text{MU1}}\,. \tag{4.7}$$

Die Begrenzung der RoI in y-Richtung ergibt sich aus der Überlappung von jeweils 32 Drähten der drei Stereolagen. Die Größe der RoI in y-Richtung ist für viele Spurkandidaten nicht ausreichend, um den Treffer der Spur in MU1 mit einer hinreichend hohen Effizienz finden zu können. Dies liegt zum einen daran, dass die Genauigkeit des durch den Myon-Pretrigger bestimmten Parameters η durch die Größe eines MU3-Pads limitiert wird. Zum anderen muss bei der Extrapolation von MU3 nach MU1 der Effekt der Vielfachstreuung berücksichtigt werden, da sich zwischen den beiden Spurkammerlagen zwei Eisen-/Betonabsorberlagen mit einer Gesamtdicke von ca. 2 m befinden, wodurch sich die Unsicherheit der Extrapolation nach MU1 vergrößert. Um eine hinreichend hohe Trefferfindungseffizienz in MU1 zu erzielen, ist es notwendig, eine RoI in y-Richtung vergrößern zu können. Dies wird realisiert, indem der Myon-Pretrigger für eine Koinzidenz mehrere – bis zu vier – Triggernachrichten zum FLT sendet, die sich lediglich durch den Wert des Parameters η unterscheiden. Dieser wird so variiert, dass sich bei der Extrapolation nach MU1 in y-Richtung überlappende Suchregionen ergeben, so dass effektiv eine Vergrößerung der RoI in MU1 erzielt wird. Zurzeit werden für eine Koinzidenz durch den Myon-Pretrigger entweder eine oder drei Nachrichten mit unterschiedlichem

η generiert. Die Entscheidung, wie viele Triggernachrichten erzeugt werden, basiert auf einer Abschätzung des Effekts der Vielfachstreuung. Dazu wird aus der bekannten Weglänge durch die Absorberlagen sowie dem durch den Pretrigger abgeschätzten Wert für den Teilchenimpuls die mittlere Ablenkung durch Vielfachstreuung berechnet. Übersteigt dieser Wert eine vorgegebene Schwelle, die der Größe der Detektorzellen in MU1 in y-Richtung entspricht, so werden drei Nachrichten erzeugt, ansonsten eine.

Die Funktion der Parameter, die nicht der Definition der RoIs des FLT dienen, wird im Folgenden erläutert.

- Der Parameter ID wird verwendet, um den Ursprung der Nachrichten der verschiedenen Pretrigger-Systeme eindeutig zu markieren. Dies ermöglicht den Betrieb des FLT im Zähltriggermodus, indem die Trigger Decision Unit (TDU) die Anzahl von Spurkandidaten in einem Ereignis zählt, getrennt nach der ID des Pretrigger-Systems. Die Nachrichten des Myon-Pretriggers besitzen den Wert $ID = 1$.

- Der Parameter BX ist die Bunch-Crossing-Nummer (BX-Nummer), die zur zeitlichen Markierung der Ereignisdaten verwendet wird. Akzeptiert der FLT ein Ereignis, dient die BX-Nummer der Pretriggernachricht dazu, die Daten des entsprechenden Ereignisses aus den Zwischenspeichern auszulesen.

- Der Parameter TDI erlaubt es, eine Triggernachricht gezielt an bestimmte Empfangsmodule zu adressieren. Im Myon-Pad-System verarbeitet in den Superlagen MU3 und MU4 je eine TFU die von den PMGs der oberen bzw. unteren Detektorhälfte empfangenen Nachrichten, so dass die Empfangsmodule durch die Verkabelung zwischen Myon-Pretrigger und FLT eindeutig festgelegt sind. Daher wird für alle Nachrichten des Myon-Pretriggers im Pad-System der Wert $TDI =$ `0xff` verwendet, um sicherzustellen, dass die empfangende TFU in MU4 unabhängig von ihrer Identifikationsnummer die Nachrichten verarbeitet.

- Der Parameter all zeigt an, dass jede an der Prozessierung beteiligte TFU eine Trefferkoinzidenz für diese Nachricht gefunden hat. Für alle Nachrichten des Myon-Pretriggers wird $all = 0$ gesetzt.

- Durch den Parameter $flag$ werden die TFUs veranlasst, unabhängig vom Resultat ihrer Treffersuche eine empfangene Nachricht an die nächste TFU-Lage weiterzuleiten.

- Die Parameter E^+ und E^- sind nur für Nachrichten des Elektron-Pretriggers von Bedeutung für die Prozessierung durch den FLT. Findet der Elektron-Pretrigger im Bereich eines Clusters eines Elektron- bzw. Positronkandidaten einen weiteren Cluster, so wird angenommen, dass es sich dabei um ein Bremsstrahlungsphoton handelt. Der Pretrigger berechnet aus der rekonstruierten Energie und Position des Bremstrahlungsclusters eine Energiekorrektur für den Leptonkandidaten. Da nicht bekannt ist, ob es sich dabei um ein Elektron oder ein Positron handelt, wird eine Energiekorrektur E^+ für die Positronhypothese und eine Energiekorrektur E^- für die Elektronhypothese bestimmt.

  Für die Nachrichten des Myon-Pretriggers wertet der FLT die Parameter E^+ und E^- nicht aus. Der Parameter E^+ wird auf einen festen Wert gesetzt, so dass durch die bekannte Bitsequenz beispielsweise die Übertragung der Nachrichten zum FLT überwacht werden kann ohne Einfluss auf die Operation des FLT.

- Der Parameter P stellt eine Abschätzung des Impulses eines Spurkandidaten dar. Im Falle des Myon-Pretriggers wird dieser Wert als Funktion des Abstandes $r_{\text{MU3}} = r(x_{\text{MU3}}, y_{\text{MU3}})$ vom Protonstrahl bestimmt, wobei x_{MU3} und y_{MU3} die Positionen des Mittelpunktes des MU3-Pads einer Koinzidenz sind. Folgende Relation liegt der Impulsabschätzung zugrunde:
$$\frac{\mathrm{r}_{\text{MU3}}}{z_{\text{MU3}}} \approx \frac{p_{\mathrm{T}}}{\mathrm{p}_z} \approx \frac{p_{\mathrm{T}}}{\mathrm{p}} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{p} \approx p_{\mathrm{T}} \cdot \frac{z_{\text{MU3}}}{\mathrm{r}_{\text{MU3}}} . \tag{4.8}$$
Diese basiert auf der Annahme, dass die Spur vom Target ausgeht und dass die Komponenten des Impulsvektors parallel zu den jeweiligen Komponenten des Ortsvektors sind. Die Ablenkung im Magnetfeld und durch Vielfachstreuung wird nicht berücksichtigt, und der Anteil des Transversalimpulses am Gesamtimpuls im Laborsystem wird vernachlässigt. Der in der Triggernachricht des Myon-Pretriggers enthaltene Wert von P stellt eine untere Schranke für den Impuls eines Spurkandidaten dar, indem zu seiner Berechnung ein minimaler Transversalimpuls von $p_{\mathrm{T}} = 0{,}5\,\mathrm{GeV}/c$ verwendet wird. Da nur Myonspuren mit einem Impuls größer als etwa $5\,\mathrm{GeV}/c$ die Absorberlagen durchqueren können, wird P folgendermaßen berechnet:
$$P = \max\left(5\,\mathrm{GeV}/c\,;\ 0{,}5\,\mathrm{GeV}/c \cdot \frac{z_{\text{MU3}}}{\mathrm{r}_{\text{MU3}}}\right) . \tag{4.9}$$
- Alle bisher aufgeführten Parameter umfassen zusammen 79 der insgesamt 80 Bits einer Triggernachricht. Das verbleibende Bit wird formell als Parameter nc bezeichnet, der bisher nicht ausgewertet und für alle Nachrichten des Myon-Pretriggers auf Null gesetzt wird.

Die Geometrieklassen

Die Kenntnis der Geometrie des Myon-Detektors wird für verschiedene Funktionen der Myon-Pretrigger-Software benötigt. Um aus Koinzidenzdaten Triggernachrichten erzeugen zu können, müssen die Positionen und Abmessungen sämtlicher Detektorzellen – Pads und Pixel – der Myon-Superlagen MU3 und MU4 bekannt sein. Diese Informationen werden sowohl von dem Simulationsprogramm benötigt als auch von dem Programm, das dazu dient, die LUT-Konfigurationsdateien zu generieren, die auf den PMGs zur Erzeugung der Triggernachrichten verwendet werden. Um Monte-Carlo-Ereignisse als Eingangsdaten der Myon-Pretrigger-Simulation verarbeiten zu können, ist die Kenntnis der Detektorgeometrie ebenfalls erforderlich. Hier dient sie dazu, Treffer anhand ihrer räumlichen Koordinaten einzelnen Detektorzellen zuzuordnen.

Die Informationen zur Detektorgeometrie werden mit Hilfe einer hierarchischen Kollektion verschiedener Klassen verarbeitet, die in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt ist. Die grundlegenden Komponenten dieser Kollektion sind Klassen zur Beschreibung allgemeiner Detektorzellen. Diese sind als Rechtecke in einer Detektorzellen-Klasse implementiert, die als Datenfelder die Kantenlängen sowie die Koordinaten des Mittelpunktes einer Zelle enthält. Zusätzlich wird der Zelle ein Effizienzwert zugewiesen, der bei der Verarbeitung von Monte-Carlo-Ereignissen verwendet werden kann, um die Treffernachweiseffizienz der Detektoren nachzubilden. Die Zellindex-Klasse besitzt als Datenfelder die Superlagen-, Spalten- und Zeilennummer einer Detektorzelle. Durch die Angabe dieser drei Zahlen ist eine Detektorzelle innerhalb des Pad- oder Pixel-Systems eindeutig bestimmt. Daher werden die Objekte

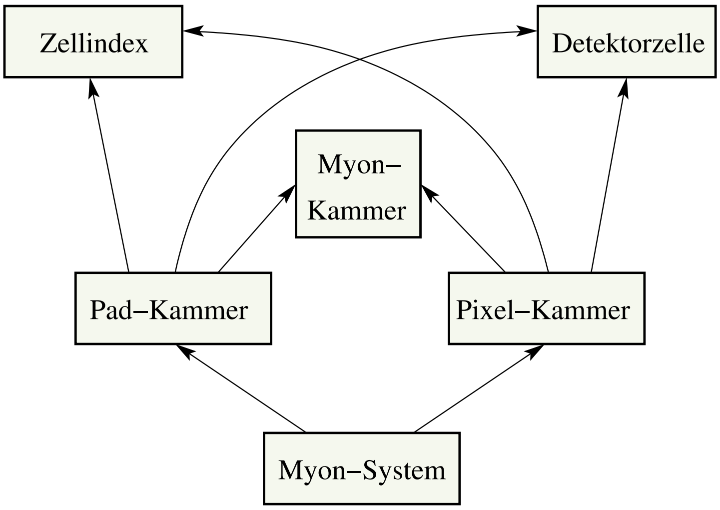


Abbildung 4.5: *Die Klassenkollektion für Geometrieinformationen. Die Pfeile symbolisieren die Beziehungen zwischen den einzelnen Klassen. Dabei werden Instanzen einer Klasse, auf die eine Pfeilspitze zeigt, von der Klasse verwendet, von der der Pfeil ausgeht. Die Detektorzellen-Klasse dient als Grundlage, um die Positionen und Größen von Pads, Pixeln und Pseudo-Pads zu beschreiben. Mit Hilfe der Zellindex-Klasse wird auf Detektorzellen zugegriffen. Diese Klassen werden verwendet, um die Geometrie der Pad- und Pixel-Kammern mit Hilfe entsprechender Klassen zu beschreiben, wobei die beiden Kammertypen gemeinsamen Attribute in der Myon-Kammer-Klasse enthalten sind. Die Myon-System-Klasse beinhaltet die Informationen über die Anordnung aller Kammern für das Pad- und Pixel-System.*

der Zellindex-Klasse verwendet, um auf Detektorzellen-Objekte zuzugreifen. Die Klasse für Myon-Kammern enhält als Datenfelder alle Parameter, die sowohl für Pad- als auch für Pixel-Kammern verwendet werden, wie z. B. die Bezeichnung einer Kammer und die Positionen der Kammerecken. Die Klassen für die Pad- und Pixel-Kammern besitzen alle Eigenschaften der Myon-Kammern-Klasse und enthalten weitere Datenfelder, die für den jeweiligen Kammertyp spezifisch sind. Sie verwenden Objekte der Detektorzellen- und der Zellindex-Klasse, um den internen Aufbau der Kammer aus Pads bzw. Pixeln zu beschreiben. Die Anordnung aller Pad- und Pixel-Kammern wird durch die Myon-System-Klasse gehandhabt. Bei der Initialisierung des Programms wird ein Objekt dieser Klasse erzeugt, das die Schnittstelle für sämtliche Zugriffe auf Geometrieinformationen darstellt.

Als Quelle der Geometrieinformationen dienen verschiedene Datenstrukturen innerhalb der ARTE-Softwareumgebung, die die Geometriedaten einzelner Kammern enthalten. Beim Füllen dieser Strukturen werden die nominellen Geometrieparameter der Kammern gegebenenfalls korrigiert, um die tatsächliche Positionierung und Ausrichtung der Detektorelemente zu berücksichtigen. Die Geometriedaten werden aus den ARTE-Datenstrukturen gelesen, wobei für jede Kammer ein Objekt der Pad- bzw. Pixel-Kammer-Klasse erzeugt wird, das über sämtliche Geometriedaten der jeweiligen Kammer verfügt. Diese Kammer-Objekte werden im Objekt der Myon-System-Klasse in speziellen Datenstrukturen abgelegt. Optional können sämtliche Informationen, die zur Generierung aller Instanzen der Kammern notwendig sind, in einer

Datei im ASCII-(American Standard Code for Information Interchange) oder binären Format gespeichert werden. Indem die Geometrieinformationen aus einer solchen Datei gelesen werden, ist es möglich, die Geometrieklassen unabhängig von den ARTE-Geometriedaten – auch außerhalb eines ARTE-Programmes – zu verwenden.

Klassen zur Erzeugung der Triggernachrichten

Das Erzeugen von Triggernachrichten ist eine wichtige Funktion des Simulationsprogrammes, die auch benötigt wird, um die Dateien zur Konfiguration der LUTs auf den PMGs zu erstellen. Mehrere Klassen werden dazu verwendet, den Zugriff auf die LUT und das Erzeugen der Triggernachrichten zu modellieren. Eine dieser Klassen beschreibt LUT-Adressen, die auf dem PMG verwendet werden, um auf den RAM-Baustein mit den LUT-Daten zuzugreifen. Die LUT-Adressen ergeben sich, wie in Tabelle 4.2 gezeigt, aus den von den PCUs empfangenen Koinzidenzdaten.

Tabelle 4.2: *Das Format der LUT-Adressen für das Pad-System. Insgesamt setzen sich die Adressen aus 18 Bits zusammen. Aufgeführt sind die verschiedenen Adressparameter, deren Bitlänge, die Position des ersten Bits innerhalb des Adresswortes sowie die Bedeutung der Parameter. Für das Pixel-System sind die Adressparameter für das MU4-Muster und die Koinzidenzadresse vertauscht. Fünf der Adressbits werden vom Myon-Pretrigger nicht verwendet.*

Adress-Parameter	Länge in Bits	Position des 1. Bits	Bedeutung
Mehrfachnachrichten	2	0	Adressbereich für Mehrfachnachrichten
MU4-Muster	3	2	Bitmuster der MU4-Treffer der Koinzidenz
Koinzidenzadresse	4	7	Position des MU3-Pads der Koinzidenz
Zyklus-Nummer	1	14	Zyklus-Nummer der Koinzidenz
MU3-Spalte	3	15	Nummer der MU3-Spalte ($0 \ldots 7$)

Die beiden niedrigstwertigen Bits der LUT-Adresse sind nicht durch Koinzidenzparameter belegt, sondern dienen dazu, die Erzeugung mehrerer Triggernachrichten zu einem Koinzidenzdatensatz zu ermöglichen. Dies wird – wie oben bei der Beschreibung des Formats der Triggernachrichten erläutert – benötigt, damit ein hinreichend großer Suchbereich für den FLT in der Superlage MU1 definiert werden kann. Für jede Koinzidenz stehen also vier LUT-Adressen zur Verfügung, für die sämtliche Adressbits, die einem Koinzidenzparameter entsprechen, identisch sind und nur die beiden niedrigstwertigen Bits variieren. Die unter diesen Adressen abgespeicherten Daten entsprechen Triggernachrichten, die sich nur im Wert des Parameters η unterscheiden, aus dem die y-Position der RoI in MU1 bestimmt wird. Die Information, wie viele Triggernachrichten zu einem Koinzidenzdatensatz erzeugt werden, ist in den LUT-Daten selbst enthalten. Ist das niedrigstwertige Bit des von der LUT ausgegebenen Datensatzes auf den Wert „1“ gesetzt, so zeigt dies an, dass eine weitere Triggernachricht unter der nächsthöheren LUT-Adresse vorliegt. In diesem Fall inkrementiert eine Kontrollschaltung auf dem PMG, die den Wert des Bits auswertet, die LUT-Adresse um eins, so dass die dort abgespeicherten Daten ausgelesen werden.

Das MU4-Muster der Koinzidenz belegt die folgenden drei Bits der Adresse. Die Position des MU3-Pads einer Koinzidenz wird durch die vier Bits umfassende Koinzidenzadresse und die Zyklus-Nummer beschrieben. Zur eindeutigen Kennzeichnung der MU3-Spalte werden drei Bits benötigt, da ein PMG die Daten von zwei PCUs, d. h. maximal acht PCU-Kanälen verarbeitet. Insgesamt sind 18 Bits zur Adressierung der LUT auf den PMGs vorgesehen, von denen im Myon-Pretrigger-System elf zur Kodierung der Koinzidenzdaten und zwei zur Erzeugung von Mehrfachnachrichten dienen. Durch die höhere Zahl von Adressbits ist es möglich, die gleichen PMG-Module auch für das High-p_T-Pretrigger-System zu verwenden, wo zur eindeutigen Kodierung der Koinzidenzdaten eine größere Zahl von Adressbits erforderlich ist.

Die LUT-Adressen-Klasse stellt eine Funktion bereit, die aus einer Adresse die Spalten- und Zeilennummern des MU3-Pads und der MU4-Pads einer Koinzidenz in den jeweiligen Superlagen bestimmt. Dazu ist es erforderlich, auf die Informationen über die Zuordnung der Detektorspalten zu den Kanälen der Pretrigger-Elektronik zuzugreifen. Die Werte aller Parameter der Triggernachricht werden mit Hilfe einer speziellen Klasse bestimmt. Dazu werden die Spalten- und Zeilennummern der MU3- und MU4-Pads einer Koinzidenz an ein Objekt dieser Klasse übergeben, das daraus die entsprechenden räumlichen Positionen und die Größen des MU3-Pads und der MU4-Pads ermittelt, indem auf die Informationen über die Detektorgeometrie zugegriffen wird. Wie im obigen Abschnitt beschrieben, sind die Werte der Nachrichtenparameter dadurch vollständig bestimmt. Gemäß der Definition des Nachrichtenformats, das in Tabelle 4.1 gezeigt ist, steht für die einzelnen Parameter innerhalb der Triggernachricht jeweils eine bestimmte Zahl von Bits zur Verfügung. Zur Binärkodierung der Parameter werden Routinen aus der FLT-Programmbibliothek verwendet, wodurch eine konsistente Kodierung und Dekodierung innerhalb der Pretrigger-Systeme und des FLT gewährleistet ist. Die einzelnen kodierten Parameter werden schließlich zu der gesamten Triggernachricht zusammengefügt.

Die Beschreibung der System-Konfiguration

Zur Beschreibung der System-Konfiguration wird eine Klasse verwendet, die die Informationen zur Anordnung der Auslesekanäle des FED-Systems für die Myon-Pad- und -Pixel-Kammern sowie die Zuordnung der Detektorspalten zu den Pretrigger-Kanälen verwaltet. Dabei werden Objekte zweier grundlegender Klassen eingesetzt, mit denen Detektorspalten und Auslesekabel beschrieben werden.

Die Klasse für Detektorspalten. Ein Kanal der Myon-Pretrigger-Elektronik verarbeitet die Daten einer MU3-Spalte und der zugehörigen MU4-Spalten. Die Zuordnung der Detektorspalten zu Pretrigger-Kanälen wird von der Simulationssoftware bei der Auslese von Detektordaten, bei der Maskierung heißer Pads und bei der Erzeugung der Triggernachrichten benötigt. Die Informationen über diese Zuordnung werden bei der Initialisierung der Simulationssoftware aus einer Konfigurationsdatei eingelesen. Dabei werden Instanzen der Spaltenklasse, welche die in Tabelle 4.3 aufgeführten Datenfelder besitzt, generiert und in der System-Konfiguration-Klasse in einer assoziativen Datenstruktur gespeichert, die als Map (engl.: Karte oder Abbildung) bezeichnet wird. In einer Map werden Paare, bestehend aus

Tabelle 4.3: *Die Datenfelder der Spaltenklasse. Die MU3-Spalten sind fortlaufend nummeriert (Pad-System: 132 Spalten, Pixel-System: 16 Spalten); durch die Nummer des Crates, Segments und des Kanals wird der Elektronikkanal des Myon-Pretrigger-Systems eindeutig bestimmt, der die Daten der entsprechenden MU3-Spalte verarbeitet. Die Nummern der drei (zwei) MU4-Spalten, die zur Koinzidenzsuche im Pad-(Pixel-)System benötigt werden, sind ebenso wie die Bitmasken für die MU3- und MU4-Spalten als Datenfelder in der Spaltenklasse implementiert.*

Datenfeld	Erläuterung
MU3-Spalte	Nummer der MU3-Spalte
Crate	Nummer des Crates, in dem sich die PCU befindet
Segment	Nummer des Segments innerhalb des Crates
Kanal	Nummer des PCU-Kanals innerhalb des Segments
MU4-Spalten	Nummern der drei zur Koinzidenzberechnung benötigten MU4-Spalten
Masken	Bitmasken für die MU3-Spalte und die zugehörigen MU4-Spalten

einem Schlüssel und einem ihm zugeordneten Wert, geordnet abgelegt, wobei verschiedene Ordnungsrelationen verwendet werden können. Als Schlüssel für die Map der Spaltenobjekte dient die Nummer der MU3-Spalte des zugeordneten Objekts der Spaltenklasse.

Die Klasse für Auslesekabel. Die Trefferinformationen der Myon-Pad-Kammern und -Pixel-Kammern sind binär in FED-Datenblöcken abgespeichert, auf die beispielsweise innerhalb der ARTE-Softwareumgebung zugegriffen werden kann. Jeder Datenblock umfasst die Trefferdaten eines FED-Crates und wird durch eine eindeutige Identifikationsnummer gekennzeichnet. Ein Treffer eines Detektorkanals wird durch ein auf den Wert „1“ gesetztes Bit gekennzeichnet. Die Zuordnung eines Treffers zu einem Detektorkanal ist durch die Position des entsprechenden Bits innerhalb des FED-Datenblockes festgelegt. Diese Zuordnung wird durch die Konfiguration des FED-Systems für die Myon-Kammern mit Hilfe von FED-Auslesekabeln beschrieben. Jedem Kabel, dem 16 aufeinander folgende Bits eines FED-Datenblockes entsprechen, wird eine Bezeichnung zugewiesen, die sich aus der Position der Detektorkanäle ergibt, deren Daten über das Auslesekabel übertragen werden [Har 99]. Bei der Initialisierung des Simulationsprogrammes werden die Informationen über die Konfiguration des FED-Systems der Pad- und Pixel-Kammern eingelesen und in Form von Objekten einer speziellen Klasse abgespeichert, die Auslesekabel beschreiben und mit Hilfe derer die FED-Daten Detektorzellen zugeordnet werden. In Tabelle 4.4 sind die Datenfelder dieser Klasse dargestellt.

Die Objekte der Auslesekabel-Klasse werden in eine Struktur geschachtelter Maps eingefügt, die in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt ist. Die Klasse für die System-Konfiguration enthält je eine Map für die FED-Systeme des Pad- und Pixel-Systems. Für jedes FED-Crate gibt es einen Eintrag in der jeweiligen Map. Dabei dient die Indentifikationsnummer des FED-Crates als Schlüssel, dem als Wert eine weitere Map zugeordnet ist. Diese Map beschreibt die

Tabelle 4.4: *Die Datenfelder der Klasse für Auslesekabel. Jedes Kabel wird durch einen Namen eindeutig gekennzeichnet. Weitere Datenfelder sind die Identifikationsnummer des FED-Crates, in dem sich das Kabel befindet, und die Nummer des Kabels. Aus dem Namen des Kabels ergeben sich die Nummern der Superlage, der Spalte und des Zyklus der Detektorspalte, deren Daten über das Auslesekabel übertragen werden. Schließlich enthält die Klasse das Datenwort der Detektortreffer.*

Datenfeld	Erläuterung
Name	Bezeichnung des FED-Auslesekabels
FED-ID	Identifikationsnummer des FED-Crates
Nummer	Nummer des FED-Auslesekabels
Superlage	Nummer der Superlage der Myon-Pad-Kammer (aus „Name“)
Spalte	Nummer der Spalte (aus „Name“)
Zyklus	Zyklus-Nummer (aus „Name“)
Treffermuster	Datenwort für Trefferinformationen

Anordnung der Kabel innerhalb des FED-Crates, wobei die Kabelnummer als Schlüssel und ein Objekt der Auslesekabel-Klasse als zugeordneter Wert verwendet wird.

Die Klasse für das Pretrigger Link Board

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, empfängt das PLB die Eingangsdaten der Myon-Pad- und -Pixel-Kammern vom FED-System und sendet diese in zwei Zyklen pro Ereignis zusammen mit Kontrollinformationen zur PCU. Die Simulation des Myon-Pretrigger-Systems enthält eine Klasse, welche die Funktion des PLBs beschreibt. Die Instanz dieser Klasse erzeugt aus den FED-Daten das Datenformat an der Eingangsschnittstelle der PCU. Da das PLB die Daten in einem vorhersagbaren zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal prozessiert, ist die Modellierung des PLBs in der Simulation rein funktional. Der Beitrag des PLBs zur Latenzzeit der Myon-Pretrigger-Nachrichten wird in Form eines festen Wertes berücksichtigt, der durch Messungen am realen System bestimmt wurde.

Die Klasse für die Pretrigger Coincidence Unit

Die PCU sucht, wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, in den Eingangsdaten nach Trefferkoinzidenzen in den Superlagen MU3 und MU4 nach dem in Abbildung 3.2 dargestellten Schema. Da die vier Koinzidenz-Kanäle einer PCU unabhängig voneinander arbeiten, ist es hinreichend, dass in der Simulation des Myon-Pretrigger-Systems die PCU durch eine Klasse beschrieben wird, die die Funktion eines Koinzidenz-Kanals nachbildet. Bei der Initialisierung des Simulationsprogrammes wird ein Objekt dieser Klasse erzeugt, das für jedes Ereignis die vom PLB-Objekt empfangenen Daten verarbeitet. Zunächst werden die Eingangsdaten der MU3-Spalte und der drei zugehörigen MU4-Spalten an das PCU-Objekt übergeben. Daran anschließend

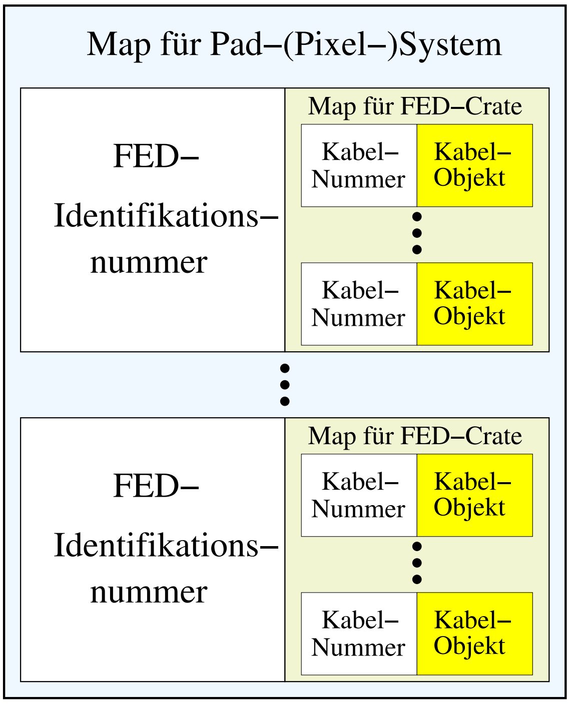


Abbildung 4.6: *Schematische Darstellung der Map-Datenstrukturen für die FED-Auslesekabel. Die FED-Systeme des Pad- und Pixel-Systems werden in der System-Konfiguration-Klasse durch je eine Map beschrieben, die für jedes FED-Crate einen Eintrag enthält. Die Identifikationsnummern der FED-Crates werden als Schlüssel verwendet, die den Schlüsseln zugeordneten Daten sind wiederum Maps für die einzelne FED-Crates. Diese Maps enthalten die Objekte der Auslesekabel-Klasse, auf die über die Kabelnummer als Schlüssel zugegriffen werden kann.*

werden die Prozessierungsschritte der internen Pipelinestufen des zentralen Logikbausteins eines Koinzidenz-Kanals ausgeführt (vgl. Abbildung 3.7).

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, werden die Eingangsdaten maskiert, wobei jedes Bit auf den Wert „0“ gesetzt werden kann, um so Treffer in defekten Kanälen zu unterdrücken. Die in diesem Schritt verwendeten Masken werden aus Informationen der Objekte der Spaltenklasse bestimmt, auf die über das System-Konfiguration-Objekt zugegriffen wird. Danach werden die Bits der MU4-Daten paarweise logisch verodert, und die Koinzidenzsuche wird durchgeführt. Durch Zugriffe auf interne LUTs werden für die gefundenen Koinzidenzen die Adressen, d. h. die Positionen des MU3-Pads der Koinzidenz, bestimmt. Bei diesem Prozessierungsschritt werden Koinzidenzdaten verworfen, falls in einer Gruppe von vier benachbarten MU3-Pads mehr als zwei Koinzidenzen auftreten. Nach diesem als „2/4“-Selektion bezeichneten Schritt werden in der letzten Pipelinestufe die Koinzidenzdaten den fünf Ausgabekanälen des Logikbausteins zugewiesen. Falls nach der „2/4“-Selektion mehr als fünf Koinzidenzen innerhalb eines Zyklus verbleiben, so werden in dieser Stufe diejenigen fünf Koinzidenzen ausgewählt, die dem Protonstrahlrohr am nächsten gelegen sind, und die anderen Koinzidenzen werden verworfen („5/8“-Selektion). Bis zu dieser letzten Pipelinestufe des Koinzidenz-CPLDs werden die Daten auf der PCU in einem festen zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal verarbeitet, wohingegen die weitere Prozessierung ereignisgetrieben ist. Das Simulationsprogramm kann in zwei verschiedenen Modi verwendet werden, für die sich die weitere Verarbeitung der Daten grundsätzlich unterscheidet:

1. Durch die detaillierte Simulation der an der weiteren Verarbeitung der Daten beteiligten Schaltungen ist es möglich, den Zeitbedarf der ereignisgetrieben arbeitenden Prozessierungsschritte zu bestimmen. In diesem Modus kommt es zu Rückkopplungen zwischen Schaltungselementen der PCU und des PMGs. Daher wird dieser Modus in Abschnitt 4.1.6 genauer beschrieben, nachdem die Implementierung des PMGs im Simulationsprogramm dargestellt worden ist.

2. Alternativ kann eine rein funktionale Simulation der weiteren Prozessierung ohne Berücksichtigung des Zeitbedarfs durchgeführt werden. In diesem Modus stehen die Nachrichten des Myon-Pretriggers zusammen mit den Trefferdaten in derselben Ereignisroutine zur Verfügung. Dies wird beispielsweise benötigt, wenn die Simulation des Myon-Pretriggers Startpunkte für die Simulationsprogramme der ersten oder zweiten Triggerstufe liefert.

   Bei der rein funktionalen Simulation werden die nach der „5/8“-Selektion verbleibenden Koinzidenz-Objekte an die Instanz der PMG-Klasse übergeben.

Die Klasse für den Pretrigger Message Generator

Wie in Abschnitt 3.1.3 dargelegt, empfängt der PMG die Koinzidenzdaten der acht Koinzidenz-Kanäle der beiden im selben Segment befindlichen PCUs und erzeugt daraus Triggernachrichten, die zum FLT gesendet werden. Die Daten werden vollständig ereignisgetrieben prozessiert, wobei sämtliche Schaltungen asynchron zum HERA-Taktsignal arbeiten. Wie für die ereignisgetrieben arbeitenden Schaltungselemente der PCU existieren auch für den PMG zwei Simulationsmodi: Die detaillierte Modellierung der Schaltungselemente des PMG erlaubt es, den Zeitbedarf der Prozessierung in der Simulation zu bestimmen. In diesem Modus, der in Abschnitt 4.1.6 beschrieben wird, sind Rückkopplungen zwischen den Schaltungselementen des PMGs und denen der PCU-Kanäle zu berücksichtigen. In dem alternativen Simulationsmodus ist lediglich die zentrale Funktion des PMGs in dem Simulationsmodell implementiert, d. h. die Erzeugung der Triggernachrichten aus den empfangenen Koinzidenzdaten.

Der PMG wird durch eine Klasse modelliert. Bei der Initialisierung des Simulationsprogramms wird ein Objekt als Instanz dieser Klasse erzeugt, an das die Koinzidenzen, die von der Simulation der PCU gefunden worden sind, als Objekte der entsprechenden Koinzidenz-Klasse übergeben werden. Aus den empfangenen Koinzidenzdaten werden Triggernachrichten erzeugt, wie zuvor beschrieben wurde. Dazu wird zunächst aus den Koinzidenzdaten ein Objekt der LUT-Adresse-Klasse generiert, deren Format in Tabelle 4.2 aufgeführt ist. Damit lassen sich die Spalten- und Zeilennummern des MU3- und der MU4-Pads einer Koinzidenz bestimmen, woraus durch den Zugriff auf die Informationen zur Detektorgeometrie die Position und Größe dieser Pads ermittelt wird. Aus diesen Informationen werden die Werte sämtlicher Parameter der Triggernachricht bestimmt, die schließlich mit Hilfe von Routinen aus der FLT-Programmbibliothek in ein standardisiertes Binärformat transformiert und zu der 80 Bits umfassenden Triggernachricht zusammengesetzt werden. Alle zu einer Koinzidenz erzeugten Triggernachrichten werden in einen Datencontainer eingefüllt, auf den über eine Funktion der PMG-Klasse zugegriffen werden kann.

Die Konfigurationsklasse

Diese Klasse dient der Konfiguration des Simulationsprogrammes für das Myon-Pretrigger-System. Sie stellt eine Schnittstelle für den Programmbenutzer bereit, der über eine Konfigurationsdatei verschiedene Einstellungen vornehmen kann. Zu Beginn der Ausführung des Simulationsprogrammes wird diese Datei eingelesen, dabei werden die Benutzereinstellungen ausgewertet und in der Instanz der Konfigurationsklasse gespeichert. Wie in Abbildung 4.3 dargestellt, greifen verschiedene Komponenten des Simulationsprogrammes auf die von der Konfigurationsklasse verwalteten Informationen zu. In der folgenden Liste sind die wichtigsten Einstellungen aufgeführt, die in der Konfigurationsdatei vorgenommen werden können.

- Es ist anzugeben, ob Monte-Carlo Ereignisse oder Detektordaten als Eingangsdaten verarbeitet werden sollen. Alternativ können vom Simulationsprogramm generierte Testdaten in der Form verwendet werden, wie sie im HERA – B Experiment vom FED-System auf Veranlassung des Fast Control Systems (FCS) erzeugt werden können.
- Der Typ der LUT zur Erzeugung der Triggernachrichten ist festzulegen. Dabei stehen drei verschiedene LUT-Konfigurationen zur Auswahl, die in Abschnitt 4.2 beschrieben werden.
- Der Benutzer muss spezifizieren, aus welcher Quelle die Informationen zur Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems zu beziehen sind. Dabei besteht die Wahl zwischen ASCII-Dateien und verschiedenen Tabellen in der HERA – B spezifischen Datenbank [Amo 00, Sch 01].
- Der Simulationsmodus ist festzulegen. Dabei ist anzugeben, ob eine rein funktionale Simulation oder eine detaillierte Simulation der ereignisgetrieben arbeitenden Schaltungen durchgeführt wird, aus der der Zeitbedarf der Datenprozessierung hervorgeht.

4.1.6 Detaillierte Simulation zur Bestimmung des Zeitbedarfs der Datenprozessierung

Während die Daten durch das Myon-Pretrigger-System bis einschließlich der Pipelinestufen des Koinzidenz-CPLDs auf der PCU in einem festen zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal verarbeitet werden, ist die weitere Prozessierung auf der PCU und dem PMG ereignisgetrieben, d. h. abhängig von der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Koinzidenzen. Die Latenzzeit des Myon-Pretriggers ist daher variabel, und die Verteilung der Latenzzeitwerte der erzeugten Triggernachrichten kann nicht vorhergesagt werden.

Um den Zeitbedarf der ereignisgetrieben arbeitenden Prozessierungschritte bestimmen zu können, sind die daran beteiligten Schaltungen, die als Zustandsautomaten realisiert sind, detailliert in der Simulation nachgebildet. Alle Zustandsübergänge der Schaltungen sind in dem Simulationsprogramm implementiert.

Bei der Simulation müssen alle Koinzidenz-Kanäle eines Segmentes, d. h. acht Kanäle auf zwei PCUs, sowie der PMG zusammenhängend behandelt werden, da es zwischen den einzelnen Schaltungen auf diesen Modulen zu Rückkopplungen kommt, die den Zeitbedarf der Prozessierung entscheidend beeinflussen. In Abbildung 4.7 sind schematisch die verschiedenen Schaltungen der beiden PCUs und des PMGs eines Segmentes dargestellt, die miteinander in Beziehung stehen. Auf jedem der acht Kanäle der beiden PCUs befindet sich eine Schal-

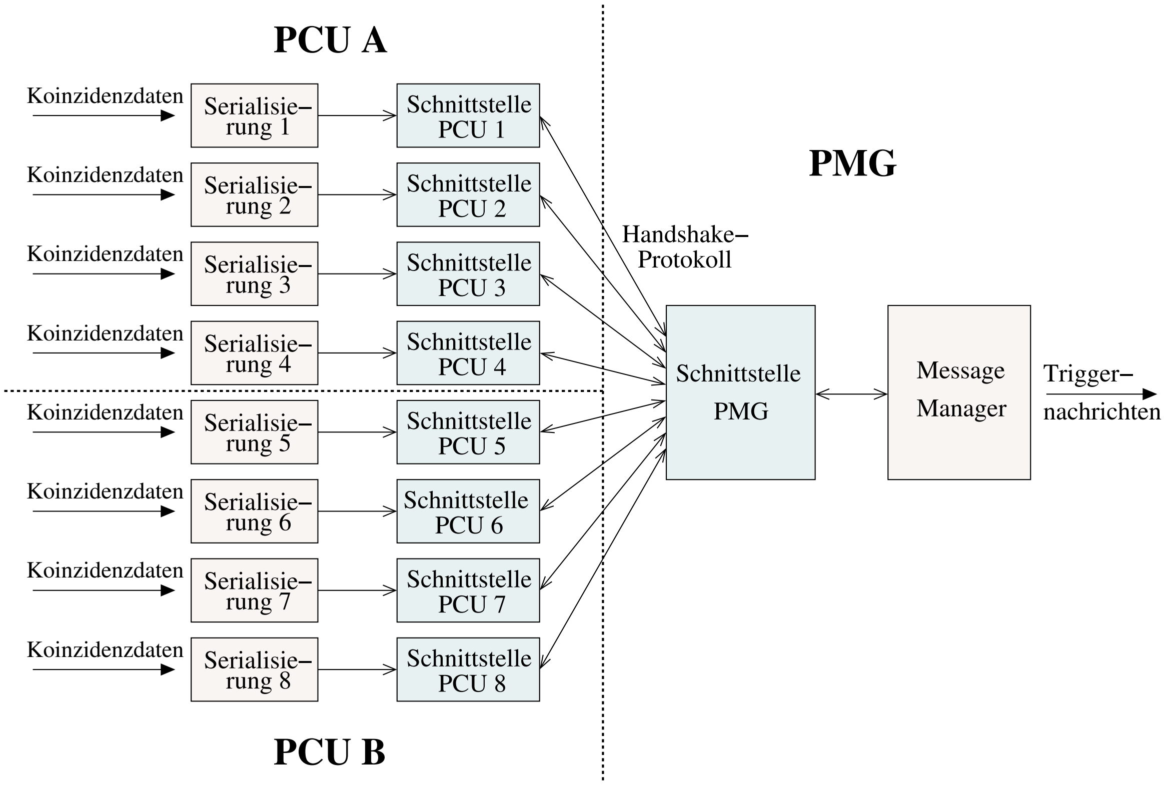


Abbildung 4.7: *Schaltungen der PCUs und des PMGs eines Segmentes und ihre Interaktionsbeziehungen. Für jeden der acht Koinzidenz-Kanäle eines Segmentes – jeweils vier pro PCU – führt eine Schaltung die Serialisierung der Koinzidenzdaten durch. Die Schnittstelle zwischen den PCUs und dem PMG verwendet ein Handshake-Protokoll (engl.: Handschlag) und wird durch eine Schaltung pro PCU-Kanal und eine Schaltung auf dem PMG realisiert, die die Schnittstelle zu allen acht Koinzidenz-Kanälen kontrolliert. Die Verarbeitung der Koinzidenzdaten auf dem PMG und die Erzeugung der Triggernachrichten wird durch eine weitere Schaltung gesteuert, den Message Manager. Die Pfeile zwischen den Schaltungen symbolisieren, dass die Schaltung, auf die die Pfeilspitze zeigt, durch Zustandsänderungen der anderen Schaltung beeinflusst wird. Doppelpfeile zeigen folglich an, dass sich die entsprechenden Schaltungen gegenseitig beeinflussen.*

tung, die die Koinzidenzdaten, die von den Koinzidenz-CPLDs in Auffang-FIFOs geschrieben werden, serialisiert und im Serialisierungs-FIFO ablegt. Die Koinzidenzdaten aller acht PCU-Kanäle werden über eine gemeinsame Datenschnittstelle zum PMG transferiert. Zur Kontrolle des Datentransfers zwischen den PCUs und dem PMG wird ein Handshake-Protokoll (endl.:

Handschlag) verwendet. Auf jedem Koinzidenz-Kanal überwacht dazu eine Schnittstellenschaltung den Füllstand der Serialisierungs-FIFOs und sendet, sobald sich Koinzidenzdaten darin befinden, ein Signal zu einer Schaltung auf dem PMG, die die Schnittstelle kontrolliert und den Datentransfer von den PCU-Kanälen zum PMG steuert. Ein weiterer Zustandsautomat ist für die Erzeugung der Triggernachrichten aus den Koinzidenzdaten zuständig. In Abbildung 4.7 symbolisieren Pfeile die Beziehungen zwischen den verschiedenen Schaltungen, wobei eine Schaltung, auf die eine Pfeilspitze zeigt, von Zustandsänderungen der Schaltung beeinflusst wird, von der der Pfeil ausgeht. Durch Doppelpfeile verbundene Schaltungen beeinflussen sich dementsprechend gegenseitig. Die in der Abbildung dargestellten Beziehungen können folgendermaßen charakterisiert werden:

- Die Serialisierungsschaltungen schreiben die von den Koinzidenz-CPLDs parallel in die Auffang-FIFOs ausgegebenen Koinzidenzdaten in das Serialisierungs-FIFO. Dadurch werden die Schnittstellenschaltungen beeinflusst, die den Füllstand dieser FIFOs überwachen.

- Eine Zustandsänderung der Schnittstellenschaltungen der einzelnen PCU-Kanäle bewirkt, dass die die Datenschnittstelle kontrollierende Schaltung auf dem PMG den Transfer der Koinzidenzdaten veranlasst. Da die Daten einzelner Koinzidenz-Kanäle sequentiell übertragen werden müssen, stellt die PMG-Schaltung mittels Kontrollsignalen sicher, dass stets nur ein PCU-Kanal auf die gemeinsamen Datenleitungen zugreift. Damit übt die Schnittstellenschaltung auf dem PMG Einfluss auf die Schnittstellenschaltungen der angeschlossenen PCU-Kanäle aus.

- Sind die Koinzidenzdaten zum PMG übertragen, steuert eine spezielle Schaltung – in Abbildung 4.7 als Message Manager bezeichnet – die Erzeugung der Triggernachrichten. Die Verarbeitungsstufen auf dem PMG stellen eine Pipeline dar, wobei die Daten verschiedene Zwischenspeicherstufen durchlaufen. Neue Koinzidenzdaten von PCU-Kanälen können erst dann empfangen werden, wenn die im Eingangsdatenspeicher befindlichen Daten zur nächsten Speicherstufe gesendet worden sind. Dadurch wirkt sich die Prozessierung des Message Managers auf die Schaltung zur Schnittstellensteuerung aus.

Im Folgenden werden die Einzelschaltungen beschrieben.

Die Serialisierungsschaltung

In Abbildung 4.8 ist ein Flussdiagramm dargestellt, das die Funktion der Serialisierungsschaltung auf der PCU zeigt. Wird bei der Prozessierung der Daten eines Zyklus wenigstens eine Koinzidenz gefunden, so schreibt der Koinzidenz-CPLD einen Koinzidenzdatensatz in jedes der fünf Auffang-FIFOs. Dabei werden gültige Koinzidenzen durch ein auf den Wert „1“ gesetztes Valid-Bit gekennzeichnet. Die gültigen Koinzidenzen werden geordnet nach ihrer Koinzidenzadresse in die Auffang-FIFOs ausgegeben, wobei die dem Protonstrahlrohr am nächsten liegende Koinzidenz in das erste FIFO geschrieben wird, die nächste in das zweite FIFO etc. Bei weniger als fünf gültigen Koinzidenzen werden als ungültig markierte Koinzidenzdaten in die übrigen Auffang-FIFOs übertragen. Die Serialisierungsschaltung überprüft

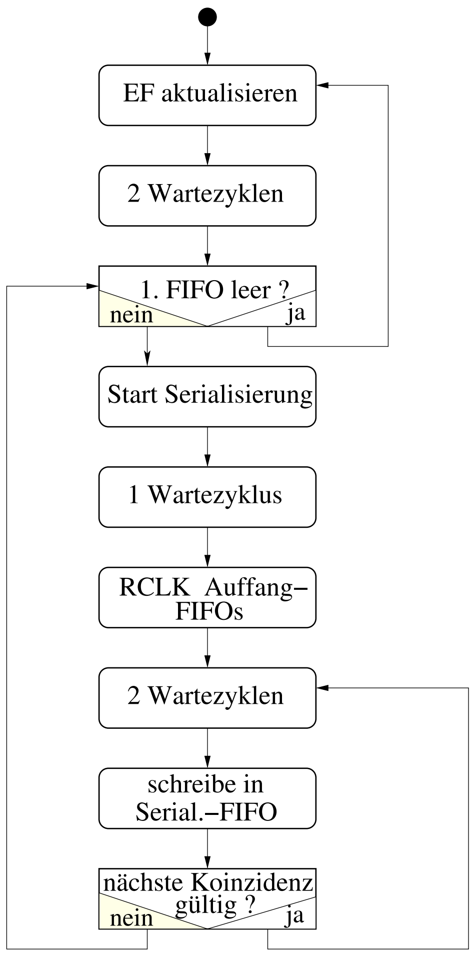


Abbildung 4.8: *Flussdiagramm der Serialisierungsschaltung auf den PCU-Kanälen. Zunächst wird das Empty Flag (EF) aktualisiert, das den Füllstand des ersten Auffang-FIFOs kennzeichnet. Befinden sich Koinzidenzdaten darin, beginnt der Serialiserungsprozess. Dazu werden Kontrollsignale für alle Auffang-FIFOs und für das Serialisierungs-FIFO erzeugt. Mit einem Taktsignal Read Clock (RCLK) werden die an unterster Stelle in den Auffang-FIFOs stehenden Daten in die Ausgaberegister übertragen. Nach zwei Wartezyklen werden die Daten des ersten FIFOs in das Serialisierungs-FIFO geschrieben. Ist der Koinzidenzdatensatz im nächsten FIFO gültig, so wird er ins Serialisierungs-FIFO übertragen. Werden als ungültig markierte Koinzidenzdaten gefunden, bricht der Serialisierungsprozess ab.*

den Füllstand des ersten Auffang-FIFOs, indem sie das Empty Flag (EF) auswertet, ein Kontrollsignal des FIFOs, das aktiv ist, solange sich keine Daten in dem FIFO-Baustein befinden. Damit stets der aktuelle FIFO-Füllstand signalisiert wird, muss das EF periodisch aktualisiert werden. Dazu generiert die Serialisierungsschaltung ein Taktsignal für die Leseseite des FIFOs und wertet das EF des ersten FIFOs nach zwei Wartezyklen aus, die benötigt werden, damit das aktualisierte Kontrollsignal stabil ist. Dieser Zyklus wiederholt sich, solange das FIFO leer ist. Zeigt das EF an, dass sich Koinzidenzdaten im ersten FIFO befinden, so beginnt die Datenserialisierung damit, dass die Serialisierungschaltung zu allen Auffang-FIFOs ein Kontrollsignal sendet, das es ermöglicht, die an unterster Stelle liegenden Daten in die Ausgaberegister der FIFOs zu schreiben. Gleichzeitig wird durch ein weiteres Kontrollsignal das Serialisierungs-FIFO in den Zustand versetzt, Daten auf der Schreibseite aufnehmen zu können. Nach einem Wartezyklus erzeugt die Serialisierungsschaltung ein als Read Clock (RCLK) bezeichnetes Taktsignal, damit die untersten Daten in die Ausgaberegister der Auffang-FIFOs übertragen werden. Dann werden durch Setzen eines weiteren Kontrollsignals die Daten im Ausgaberegister des ersten Auffang-FIFOs auf die Datenleitungen zum Serialisierungs-FIFO gelegt. Nach zwei Wartezyklen wird ein Taktsignal erzeugt, mit dem die Koinzidenzdaten in das Serialisierungs-FIFO übernommen werden. Dann überprüft die Serialisierungsschaltung das Valid-Bit der Koinzidenzdaten, die sich im Ausgaberegister des nächsten Auffang-FIFOs befinden. Sind diese Koinzidenzdaten als gültig markiert, so werden sie auf die Datenleitungen zum Serialisierungs-FIFO gelegt und nach zwei Wartezyklen übertragen. Dieser Zyklus wiederholt sich höchstens für alle verbleibenden Auffang-FIFOs und bricht ab, sobald in einem Auffang-FIFO ungültige Koinzidenzdaten gefunden werden. In den nachfolgenden Auffang-FIFOs befinden sich ebenfalls ungültige Koinzidenzdaten, was durch die Regeln bei der Ausgabe der Koinzidenzen aus dem CPLD festgelegt ist. Daher wird im nächsten Schritt das zwischenzeitlich aktualisierte EF des ersten Auffang-FIFOs überprüft.

Die Datenschnittstellenschaltung auf der PCU

Je zwei PCUs und ein PMG bilden ein Segment. Die Koinzidenzdaten aller acht Kanäle der beiden PCUs werden über eine Datenschnittstelle zum PMG transferiert, der aus den Koinzidenzdaten Triggernachrichten erzeugt. Die Schnittstelle ist als Datenbus realisiert, so dass sichergestellt werden muss, dass stets nur ein PCU-Kanal Daten zum PMG überträgt, um einen Kurzschluss zu vermeiden. Zur Kontrolle des Datentransfers befindet sich auf jedem PCU-Kanal eine spezialisierte Schaltung sowie eine Schaltung auf dem PMG, die die Schnittstelle kontrolliert und den Zugriff steuert, wobei ein Handshake-Protokoll zur Kommunikation zwischen den Schaltungen verwendet wird. In Abbildung 4.9 sind die Operationen der Schnittstellenschaltung der PCU in Form eines Flussdiagrammes dargestellt. Über den Ruhe- und Startzustand gelangt die Schaltung in einen Zustand, in dem sie das EF-Kontrollsignal des Serialisierungs-FIFOs aktualisiert, das anzeigt, ob sich Koinzidenzdaten im FIFO befinden. Dazu generiert die Schaltung ein Taktsignal für die Leseseite des Serialisierungs-FIFOs und wertet das EF nach zwei Wartezyklen aus. Befinden sich keine Daten im Serialisierungs-FIFO, so geht die Schaltung in den Ruhezustand über, ansonsten wird ein Kontrollsignal (REN: read enable) erzeugt, das es ermöglicht, die an unterster Stelle im Serialisierungs-FIFO stehenden Daten in dessen Ausgaberegister zu übertragen. Das dazu nötige Taktsignal (RCLK: read clock) wird nach einem Wartezyklus generiert. Nach einem weiteren Wartezyklus setzt die Schaltung das Signal Data Available (DAV), das der Schnittstellenschaltung auf dem PMG

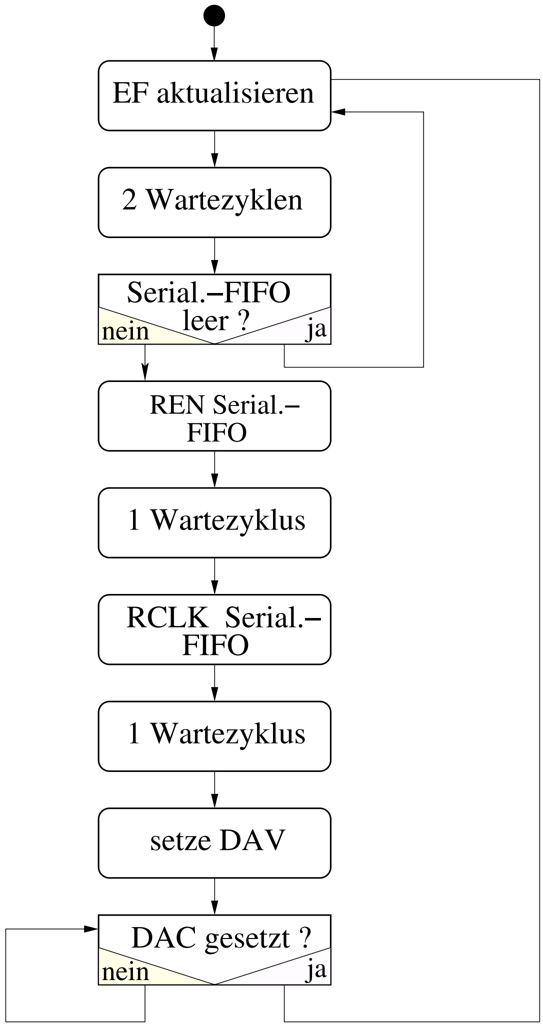


Abbildung 4.9: *Flussdiagramm der Schnittstellenschaltung auf den PCU-Kanälen. Die Schaltung überwacht den Füllstand des Serialisierungs-FIFOs. Dazu wird das Empty Flag (EF) des FIFOs aktualisiert. Befinden sich Koinzidenzdaten im FIFO, wird ein Signal Read Enable (REN) und nach einem Wartezyklus ein Taktsignal Read Clock (RCLK) erzeugt. Damit werden die an unterster Stelle im FIFO befindlichen Daten in das Ausgaberegister übertragen. Die Schaltung wartet auf das Signal Data Accept (DAC), das die Schnittstellenschaltung auf dem PMG setzt, um den Transfer der Koinzidenzdaten zu veranlassen.*

signalisiert, dass Koinzidenzdaten stabil im Ausgaberegister des Serialisierungs-FIFOs anstehen. Die PCU-Schaltung verharrt in Erwartung des Signals Data Accept (DAC) der PMG-Schaltung, das die Übertragung der Koinzidenzdaten initiiert, in einer Endlosschleife. Das vom PMG gesendete DAC-Signal schaltet die Koinzidenzdaten, die sich im Ausgaberegister des Serialisierungs-FIFOs befinden, auf die Leitungen des Datenbusses, so dass sie vom PMG übernommen werden können. Gleichzeitig fungiert das DAC-Signal als Rücksetzsignal der Schnittstellenschaltung auf dem PCU-Kanal, die sich somit wieder im Ruhezustand befindet. Anschließend wird erneut das EF-Kontrollsignal aktualisiert.

Die Datenschnittstellenschaltung auf dem PMG

Die Datenschnittstelle zwischen den PCU-Kanälen und dem PMG wird von einer Schaltung auf dem PMG kontrolliert, deren Funktion in Abbildung 4.10 als Flussdiagramm dargestellt ist. Diese Schaltung überprüft zunächst die DAV-Signale, durch welche die Schnittstellenschaltungen der PCU-Kanäle anzeigen, dass Koinzidenzdaten an den PMG zu übertragen sind. Ist wenigstens eines der acht DAV-Signale gesetzt, so wird der aktuelle Wert aller acht DAV-Signale eingefroren. Anschließend wird sukzessive je ein Koinzidenzdatensatz von allen PCU-Kanälen übernommen, für die das DAV-Signal gesetzt war. Daten können nur empfangen werden, falls das Eingangsregister des PMGs frei und nicht mit zuvor übernommenen Koinzidenzdaten belegt ist. Daher überprüft die Schnittstellenschaltung den Füllstand des Eingangsregisters und sendet, sobald es frei ist, ein DAC-Signal zum PCU-Kanal. Dieses Signal schaltet die im Ausgaberegister des Serialisierungs-FIFOs befindlichen Koinzidenzdaten auf die Datenbusleitungen und dient zugleich als Rücksetzsignal für die Schnittstellenschaltung des PCU-Kanals. Nach einem Wartezyklus werden die Daten in das Eingangsregister des PMGs übernommen. Falls ein weiteres der eingefrorenen DAV-Signale gesetzt ist, wird anschließend der Füllstand des Eingangsregisters überprüft, um die Daten des entsprechenden PCU-Kanals übernehmen zu können. Sind alle eingefrorenen DAV-Signale überprüft, so werden im Folgezustand die jetzt aktuellen DAV-Signale ausgewertet.

Die Schaltung zur Steuerung der Nachrichtenerzeugung

Die weitere Verarbeitung von Koinzidenzdaten, die über die Datenschnittstelle von der PCU in das Eingangsregister des PMGs übertragen worden sind, wird von einer als Message Manager bezeichneten Schaltung gesteuert. Die Funktion dieser Schaltung ist als Flussdiagramm in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Schaltung überprüft zunächst, ob sich Koinzidenzdaten im Eingangsregister des PMGs befinden. Die Koinzidenzdaten fungieren als Adresse für den Lesezugriff auf die LUT, welche die den Koinzidenzdaten entsprechenden Werte der Nachrichtenparameter enthält. Dazu werden die Koinzidenzdaten in einen Datenpuffer kopiert, der mit den Adressleitungen des LUT-Speicherbausteins verbunden ist. Die Koinzidenzdaten müssen solange in dem LUT-Puffer verbleiben, bis sämtliche Triggernachrichten zu dieser Koinzidenz generiert sind. Daher überprüft der Message Manager, ob sich noch Koinzidenzdaten im LUT-Puffer befinden. Sobald dieser frei ist, werden die Koinzidenzdaten aus dem Eingangsregister entnommen und in den LUT-Puffer geschrieben. Nach einem Wartezyklus stehen die von der LUT ausgegebenen Werte der Nachrichtenparameter stabil auf den Datenleitungen an. Der Message Manager wertet das in den ausgegebenen LUT-Daten enthaltene MMF-Kontrollbit

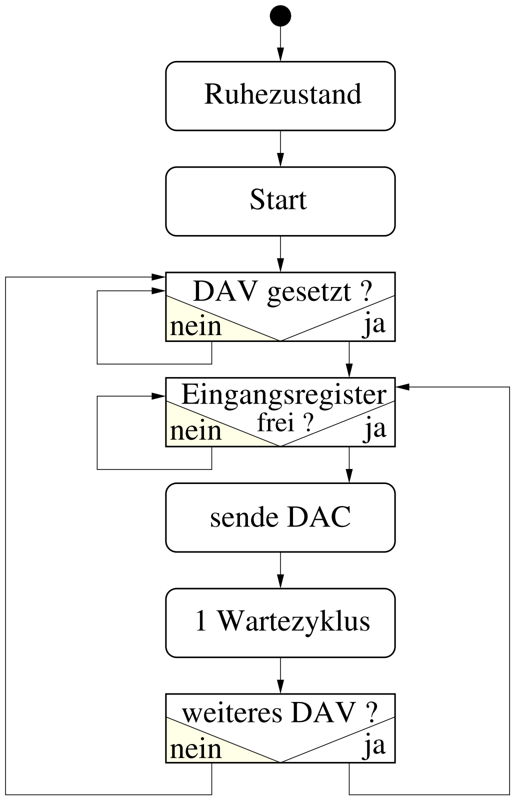


Abbildung 4.10: *Flussdiagramm der Schnittstellenschaltung auf dem PMG. Diese Schaltung steuert den Datenaustausch zwischen den PCU-Kanälen und dem PMG. Ist wenigstens eins der Kontrollsignale Data Available (DAV) aller angeschlossener PCU-Kanäle gesetzt, wird der momentane Zustand aller DAV-Signale eingefroren. Ist das PMG-Eingangsregister frei, wird ein Signal Data Accept (DAC) nacheinander zu allen PCU-Kanälen gesendet, für die das eingefrorene DAV-Signal gesetzt ist. Das DAC-Signal veranlasst den Transfer der Koinzidenzdaten zum PMG.*

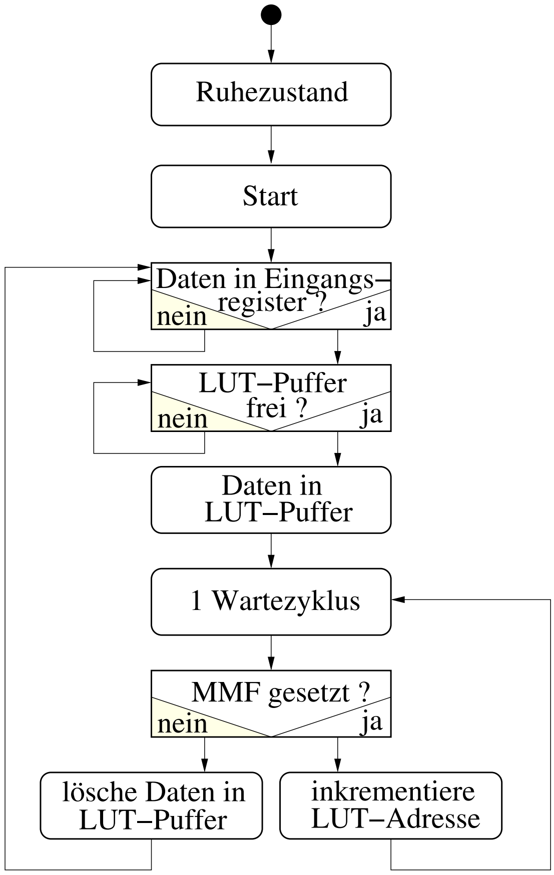


Abbildung 4.11: *Flussdiagramm des Message Managers auf dem PMG. Bei der Initialisierung durchläuft die Schaltung den Ruhe- und Startzustand. Befinden sich Koinzidenzdaten im Eingangsregister des PMGs, so werden diese in den Datenpuffer für die LUT-Adressen übertragen, wenn dieser unbelegt ist. Nach einem Wartezyklus stehen die Daten am Ausgang der LUT zur Verfügung. Ist das Multiple Message Flag (MMF) in den Daten gesetzt, so befindet sich unter der nächsthöheren Adresse eine weitere Triggernachricht zu diesem Koinzidenzdatensatz in der LUT.*

(Multiple Message Flag) aus, das – wenn es auf „1“ gesetzt ist – signalisiert, dass eine weitere Triggernachricht zu diesem Koinzidenzdatensatz zu erzeugen ist. In diesem Fall inkrementiert der Message Manager die im LUT-Puffer befindliche LUT-Adresse um eins, so dass nach einem Wartezyklus die Parameterwerte der nächsten Triggernachricht ausgegeben werden. Dieser Zyklus wiederholt sich solange, bis das MMF-Bit auf „0“ gesetzt und damit keine weitere Triggernachricht mehr zu erzeugen ist. Dann werden die Koinzidenzdaten im LUT-Puffer gelöscht, und anschließend wird der Füllstand des Eingangsregisters überprüft.

Modellierug der Taktung der Zustandsautomatenschaltungen

Im realen Myon-Pretrigger-System sind die Zustandsautomaten in programmierbaren Logikbausteinen implementiert, in denen die Prozessierung asynchron zum HERA-Taktsignal verläuft. Die Serialisierungs- und die Schnittstellenschaltung eines PCU-Koinzidenz-Kanals befinden sich in einem Logikbaustein, der mit einer Taktrate von 100 MHz betrieben wird. Die Schnittstellenschaltung und der Message Manager auf dem PMG sind in getrennten Bausteinen implementiert, die ein Taktsignal mit einer Rate von 50 MHz verwenden. Die Modellierung der Taktung dieser Schaltungen in der Simulation basiert auf der folgenden Idealisierung: Die Zeitdiskretisierung im Simulationsmodell wird von der Ereignisrate abgeleitet. Es wird angenommen, dass das Zeitintervall zwischen zwei nacheinander von der Simulation prozessierten Ereignissen 100 ns beträgt, entsprechend der Ereignisrate von ungefähr 10 MHz. Um die höhere Taktrate zu berücksichtigen, mit der die Schaltungen der Zustandsautomaten betrieben werden, werden im Simulationsprogramm für jedes Ereignis zehn Zustandsübergänge der PCU-Schaltungen ausgeführt. Für die PMG-Schaltungen werden im Simulationsprogramm pro Ereignis fünf Zustandsübergänge durchgeführt, entsprechend der Taktrate von 50 MHz, mit der diese Schaltungen im realen System betrieben werden. Um die Interaktionsbeziehungen zwischen den Schaltungen auch während der Simulationsschritte eines Ereignisses zu berücksichtigen, werden die Zustandsübergänge der verschiedenen Schaltungen in Zyklen durchgeführt, die in Abbildung 4.12 schematisch gezeigt sind. Zunächst wird für die Serialisierungschaltungen auf allen PCU-Kanälen ein Zustandsübergang durchgeführt, anschließend für jede Schnittstellensschaltung auf allen PCU-Kanälen. Da die Taktrate, mit der die PCU-Schaltungen betrieben werden, doppelt so groß ist wie die der PMG-Schaltungen, führen alle PCU-Schaltungen noch einen weiteren Zustandsübergang aus, bevor für die Schnittstellenschaltung und den Message Manager auf allen PMGs ein Zustandsübergang stattfindet. Dieser Zyklus wiederholt sich fünfmal für jedes Ereignis, so dass insgesamt zehn Zustandsänderungen der PCU-Schaltungen und fünf Zustandsänderungen der PMG-Schaltungen durchgeführt werden. Der Zustand aller Schaltungen wird nach jedem Prozessierungschritt gespeichert, und die Folge der Zustandsübergänge wird auch über die Grenzen einzelner Ereignisse fortgeführt.

Untersuchungen zum Zeitbedarf der Datenprozessierung des Myon-Pretriggers werden in Kapitel 5 vorgestellt.

4.1.7 Quellen für die Informationen zur System-Konfiguration

Beim Betrieb des Myon-Pretrigger-Systems erfüllt die Online-Software [Sch 01] die wichtige Funktion, alle relevanten Informationen zu protokollieren, die notwendig sind, um die Konfiguration und den Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt seines Betriebs rekonstruieren

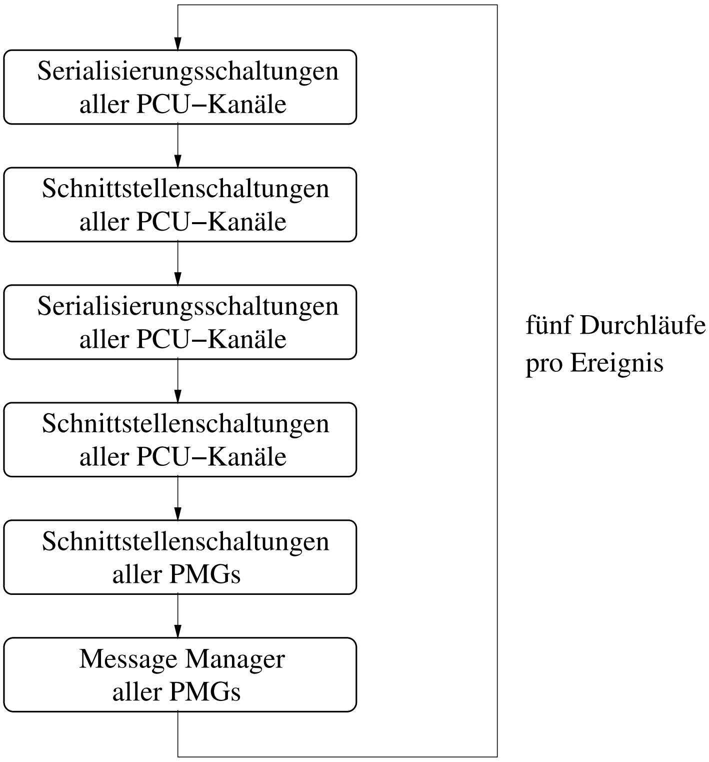


Abbildung 4.12: *Zyklus der Zustandsänderungen der PCU- und PMG-Schaltungen im Simulationsprogramm. Jedes Kästchen stellt einen Zustandsübergang der entsprechenden Schaltungen dar. Für jedes Ereignis wird der gezeigte Zyklus fünfmal durchlaufen, so dass die PCU-Schaltungen zehn und die PMG-Schaltungen fünf Zustandsübergänge pro Ereignis durchführen.*

zu können. Dazu werden Einträge in verschiedenen Tabellen der HERA−B Datenbank verwendet, deren Version durch eine Major- und eine Minor-Nummer (engl. für Haupt- und Neben-Nummer) eindeutig charakterisiert wird. Ändern sich bestimmte Konfigurationsparameter, so erzeugt die Online-Software einen neuen Eintrag in den entsprechenden Tabellen der Datenbank.

Wie in Abschnitt 4.1.5 beschrieben, werden verschiedene Klassen verwendet, um die Informationen über die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems im Simulationsprogramm zu implementieren. Zu diesen Informationen gehören

- die Zuordnung von Detektorkanälen zu Kanälen der Pretrigger-Elektronik,
- die Anordnung der Detektordaten in den Datenblöcken der FED-Systeme,
- die Maskierung von Elektronikkanälen und
- der Status der optischen Verbindungen zwischen PLB und PCU.

Das Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger kann auf verschiedene Quellen dieser Informationen zugreifen. Neben den Tabellen der HERA – B Datenbank können alternativ Dateien im ASCII-Format verwendet werden. Dies liegt darin begründet, dass bis auf die letzten Wochen der Datennahme im Jahr 2000 nicht die Datenbank, sondern lokale Dateien von der Online-Software verwendet wurden. Eine wichtige Anforderung an das Simulationsprogramm besteht darin, dass die von der Simulation verwendete Systemkonfiguration den Zustand des realen Systems widerspiegelt. Vor allem wenn ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit aufgezeichneten Resultaten des realen Systems durchgeführt wird, ist es notwendig, dass für jedes Ereignis die im Simulationsprogramm implementierte Systemkonfiguration exakt den Bedingungen während der Datennahme entspricht. Änderungen der Konfiguration des realen Systems müssen durch das Simulationsprogramm berücksichtigt werden, indem die Systemkonfiguration in der Simulation auch entsprechend verändert wird. Bei der Prozessierung eines Ereignisses liest das Simulationsprogramm die Ereigniszeit, d. h. den Zeitpunkt, zu dem das Ereignis im HERA – B Experiment aufgezeichnet wurde, und überprüft, ob es zu dieser Ereigniszeit neue Versionen der Tabellen in der Datenbank gibt. Falls dem so ist, wird die Systemkonfiguration in der Simulation entsprechend der neuen Tabelleneinträge modifiziert. Die alternativ als Quellen der Konfigurationsinformationen verwendeten ASCII-Dateien besitzen einen Dateinamen, der den Zeitpunkt, zu dem die Datei erzeugt wurde, enthält. Ausgehend von der Ereigniszeit bestimmt das Simulationsprogramm anhand ihres Namens die Dateien, die eingelesen werden müssen, um die während der Datennahme verwendete Systemkonfiguration für die Simulation zu implementieren.

4.1.8 Die Benutzerroutinen des Simulationsprogrammes

Das Simulationsprogramm für das Myon-Pretrigger-System stellt zwei Benutzerroutinen zur Verfügung, die in ein Anwenderprogramm zu implementieren sind, um die Simulation durchführen und auf ihre Ergebnisse zugreifen zu können:

1. Durch den einmaligen Aufruf der Initialisierungsroutine zu Programmbeginn werden die Objekte der verschiedenen Klassen erzeugt, die vom Simulationsprogramm verwendet werden. Die Datei, die die Benutzereinstellungen zur Konfiguration des Simulationsprogramms enthält, wird eingelesen, und eine Datei wird erzeugt, in welche die Informationen abgelegt werden, die die Prozessierung der Simulation protokollieren. Zudem werden die Informationen zur Geometrie der Myon-Pad- und -Pixel-Kammern gelesen, wie auch die Informationen zur Konfiguration des FED-Systems und zur Zuordnung der Detektorspalten zu den Kanälen der Pretrigger-Elektronik.

2. Bei der Prozessierung jedes Ereignisses wird die Ereignisroutine aufgerufen, um die Simulation des Myon-Pretriggers durchzuführen. Zunächst wird anhand der Ereigniszeit überprüft, ob neue Versionen der Konfigurationsinformationen aus der Datenbank gelesen werden müssen. Anschließend werden die Eingangsdaten eingelesen, die Koinzidenzsuche wird durchgeführt, und Triggernachrichten zu den gefundenen Koinzidenzen werden erzeugt. Die Ereignisroutine füllt die Objekte der gefundenen Koinzidenzen und der erzeugten Triggernachrichten in Datencontainer, die beim Aufruf der Routine als Parameter übergeben werden.

4.1.9 Einsatz des Simulationsprogrammes

Das Programm zur Simulation des Myon-Pretrigger-Systems wird eingesetzt, um die Nachweiseffizienz des Myon-Pretriggers zu bestimmen und erlaubt es dabei auch, Fehlfunktionen der Hardware zu erkennen. Ergebnisse einer Analyse zur Nachweiseffizienz werden in Abschnitt 5.1 vorgestellt. Weitere Fragestellungen zum Verhalten des Myon-Pretriggers, beispielsweise die Akzeptanz für bestimmte physikalische Prozesse oder die Latenzzeiten der Triggernachrichten können nur mit Hilfe des Simulationsprogrammes untersucht werden.

Ein wichtiger Einsatzbereich für das Simulationsprogramm war die Entwicklung eines Triggeralgorithmus für die Datennahme im Jahr 2000. Dieser als FLTm (für FLT muon) bezeichnete Algorithmus diente als Ersatz für den FLT, der im Jahr 2000 installiert und in Betrieb genommen wurde und erst kurz vor Ende der Datennahme zur Ereignisselektion eingesetzt wurde. Praktisch alle Datensätze, die Ereignisse mit Zerfallsprozessen $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ enthalten, wurden mit einer Triggerkonfiguration aufgezeichnet, die aus dem dem Myon-Pretrigger und dem SLT bestand. Als Teil des SLT-Programmes wurde der FLTm-Algorithmus eingesetzt [Eig 00]. Die Funktionsweise dieses Algorithmus soll im Folgenden kurz beschrieben werden. Eine umfassende Darstellung findet sich z. B. in [Hus 01b]. Für Ereignisse mit wenigstens zwei Koinzidenzen wurden die Triggernachrichten des Myon-Pretriggers zum SLT übertragen. Der FLTm-Algorithmus ermittelte aus den Nachrichtenparametern eine RoI in der Superlage MU2, in der nach Treffern in der 0°-Lage der Tube-Kammern gesucht wurde. Falls wenigstens ein Treffer gefunden wurde, wurden anschließend sämtliche Treffer in der 0°-Lage in MU1 ausgelesen. Jeder MU1-Treffer wurde mit allen MU2-Treffern kombiniert, und für jede Kombination wurde durch Extrapolation die x-Position eines angenommenen Treffers in MU3 bestimmt. Falls diese mit der Position einer Koinzidenz des Pretriggers übereinstimmte, wurde das Ereignis durch den FLTm-Algorithmus akzeptiert. Aus den Treffern in MU1 und MU2 sowie der Koinzidenzposition wurde durch Extrapolation eine RoI in der Superlage TC2 des äußeren Spurkammersystems bestimmt. Diese bildete den Startpunkt für die Standardspurrekonstruktion durch den SLT.

Mit Hilfe der Simulation des Myon-Pretriggers wurden die Routinen entwickelt, die innerhalb des FLTm-Programmes dazu verwendet werden, die Triggernachrichten des Myon-Pretriggers aus dem FLT-Datenblock auszulesen und daraus die RoI für die Suche nach Treffern in der Superlage MU2 zu bestimmen. Ferner wurden Studien des FLTm-Algorithmus mit Hilfe der Pretrigger-Simulation durchgeführt, um die Größe der RoIs zu optimieren. Da die Simulation Triggernachrichten in der gleichen Form erzeugt wie das reale Myon-Pretrigger-System, konnten für die Simulation die Triggeralgorithmen in derselben Form verwendet werden wie im Datennahmebetrieb.

Die Simulation des Myon-Pretriggers ist über eine spezielle Schnittstelle fest in die Simulation des FLT integriert. In Analogie zur Funktion der Pretrigger-Hardware stellt die Pretrigger-Simulation für Myon-Kandidaten die ersten RoIs für die Spursuche des FLT bereit. Wesentliche Beiträge lieferte die Simulation bei der Inbetriebnahme des FLT zur Überprüfung und Optimierung der Parameter zur Spurrekonstruktion. Der Vergleich der aufgezeichneten Triggerinformationen des FLT mit dem Ergebnis der Simulation erlaubt es, die Akzeptanz und Effizienz des FLT zu ermitteln [Fle 01].

Ein alternatives Konzept für eine erste Triggerstufe wurde vorgeschlagen [Bal 01]. Dieses basiert auf Koinzidenzen des High-p_T- mit dem ECAL- oder dem Myon-Pretrigger anstelle der iterativen Spurrekonstruktion im Spurkammersystem. Verschiedene Untersuchungen mit Monte-Carlo-Ereignissen wurden durchgeführt, um das Potential des vorgeschlagenen Triggerkonzepts zu ergründen. Zur Simulation des Myon-Pretrigger-Systems wurde dabei das zuvor beschriebene Simulationsprogramm eingesetzt.

4.2 Das Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien

Auf den PMGs des Myon-Pretrigger-Systems werden zu den von den PCUs gefundenen Koinzidenzen Triggernachrichten erzeugt, die zur nachfolgenden Triggerstufe gesendet werden. Die Triggernachrichten bestehen aus verschiedenen Parametern, die der nachfolgenden Triggerstufe dazu dienen, die RoIs für die Spursuche und -rekonstruktion festzulegen. Um die Parameter der Triggernachrichten zu bestimmen, werden LUTs eingesetzt, die die Werte der Nachrichtenparameter für alle möglichen Koinzidenzendatensätze enthalten. Auf dem PMG bildet ein Koinzidenzdatensatz das Adresswort für den Zugriff auf die LUT, die die Nachrichtenparameter als Datenwort ausgibt. Zur Konfiguration der LUTs werden ASCII-Dateien verwendet, die die vorher berechneten Werte aller Nachrichtenparameter enthalten. Diese Dateien werden bei der Initialisierung des Myon-Pretrigger-Systems von der Online-Software gelesen und die enthaltenen Konfigurationsdaten werden über die VME-Schnittstelle der PMGs in die für die LUTs vorgesehenen RAM-Bausteine geschrieben [Sch 01].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm erstellt, das benötigt wird, um die Konfigurationsdateien für die LUTs zu erzeugen. Dieses Programm wird im Folgenden beschrieben.

4.2.1 Die Anforderungen an das Programm

An das Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Die Werte mehrerer Nachrichtenparameter hängen von den Positionen der Detektorzellen ab. Daher ist es notwendig, auf die Informationen zur Detektorgeometrie zuzugreifen. Dabei sollen auch Korrekturdaten berücksichtigt werden, die die Abweichungen der tatsächlichen von den nominellen Positionen angeben.

- Der Myon-Pretrigger kann in verschiedenen Konfigurationen des HERA–B Triggersystems eingesetzt werden. Es ist erforderlich, eine der jeweiligen Konfiguration angepasste Parametrisierung der Triggernachrichten zu verwenden. Zusätzlich soll eine spezielle Kodierung der Triggernachrichten für den Testbetrieb des Myon-Pretriggers bereitgestellt werden.

- Die LUTs für die einzelnen PMGs sind alle verschieden, da die Werte der Nachrichtenparameter positionsabhängig sind und jedem PMG bis zu acht benachbarte Spalten aus verschiedenen Bereichen des Detektors zugeordnet sind. Daher müssen die Informationen darüber, welche Detektorspalten durch welche Kanäle des Myon-Pretrigger-Systems verarbeitet werden, vorhanden sein.

4.2.2 Der Aufbau und die Funktion des Programmes

Um den oben aufgeführten Anforderungen gerecht zu werden, benötigt das Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien folgende grundlegende Funktionen:

- Die Geometriedaten, d. h. die Positionen aller Detektorzellen einschließlich der Korrekturdaten müssen eingelesen werden.
- Die Informationen über die Konfiguration des Myon-Pretriggers, d. h. die Zuordnung der Detektorspalten zu Elektronikkanälen, sind einzulesen.
- Die Werte der Nachrichtenparameter sind zu berechnen. Dabei sollen die folgenden Parametrisierungen verwendet werden können:
  - Bei der als „PHYS_MM" (Abkürzung für: PHYSics parameters, Multiple Messages) bezeichneten Parametrisierung werden die Parameter so berechnet, wie es in Abschnitt 4.1.5 dargestellt ist. Die Parameter der Nachricht beschreiben eine RoI in der Superlage MU4. Dabei ist vorgesehen, dass zu einem Koinzidenzdatensatz mehrere – maximal vier – Triggernachrichten erzeugt werden können. Dies ist erforderlich, um den Suchbereich für die TFUs in der Superlage MU1 in y-Richtung und damit die Effizienz, dort den zum Spurkandidaten gehörigen Treffer zu finden, zu vergrößern. Die für eine Koinzidenz generierten Triggernachrichten unterscheiden sich nur im Wert des Parameters η, der die y-Position des MU3-Pads einer Koinzidenz beschreibt und zur Extrapolation nach MU1 verwendet wird.
  - Werden die Nachrichten des Myon-Pretriggers direkt an den SLT gesendet, so wird die Funktionalität, Mehrfachnachrichten zu erzeugen, nicht benötigt, da der SLT die Größe einer Suchregion beliebig innerhalb einer Detektorlage vergrößern kann. Um die Zahl der zum SLT übertragenen Nachrichten zu minimieren, wird für diese Triggerkonfiguration eine Parametrisierung eingesetzt, bei der immer genau eine Triggernachricht zu einer Koinzidenz erzeugt wird. Diese als „PHYS_SM" (für: PHYSics parameters, Single Message) bezeichnete Parametrisierung unterschiedet sich ansonsten nicht von der „PHYS_MM"-Parametrisierung.
  - Für Testmessungen wurde eine spezielle Parametrisierung entworfen, die als „DEA" (für Data Equals Address) bezeichnet wird. Dabei werden die einzelnen Parameter eines Koinzidenzdatensatzes – die Koinzidenzadresse, das MU4-Muster, die Zyklus- und BX-Nummer sowie die Nummer des PCU-Kanals – jeweils in verschiedene Parameter der Triggernachricht kopiert. Somit stehen über die Auslese der Triggernachrichten Informationen über Koinzidenzen in der Form zur Verfügung, wie sie von der PCU zum PMG übermittelt werden.

Diese Punkte stellen einen Teil der Funktionalität des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Simulationsprogramms für das Myon-Pretrigger-System dar. Dadurch, dass die Simulationssoftware aus einzelnen Modulen besteht, können die zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien benötigten Funktionen durch Komponenten des Simulationsprogramms bereitgestellt werden. Dazu zählen die Konfigurationsklasse zur Programmsteuerung, die Geometrieklassen, die System-Setup-Klassen zur Beschreibung der Konfiguration des Myon-Pretriggers, die Nachrichten-Klasse und die Klassenkollektion zur Beschreibung der Nachrichtenerzeugung. Das

Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien verwendet diese Klassen als abstrakte Datentypen. Die Struktur dieser Klassen und ihre Funktionalität sind in Abschnitt 4.1.5 erläutert.

Abbildung 4.13 zeigt den Ablauf des Programms als Flussdiagramm. Während der Initialisie-

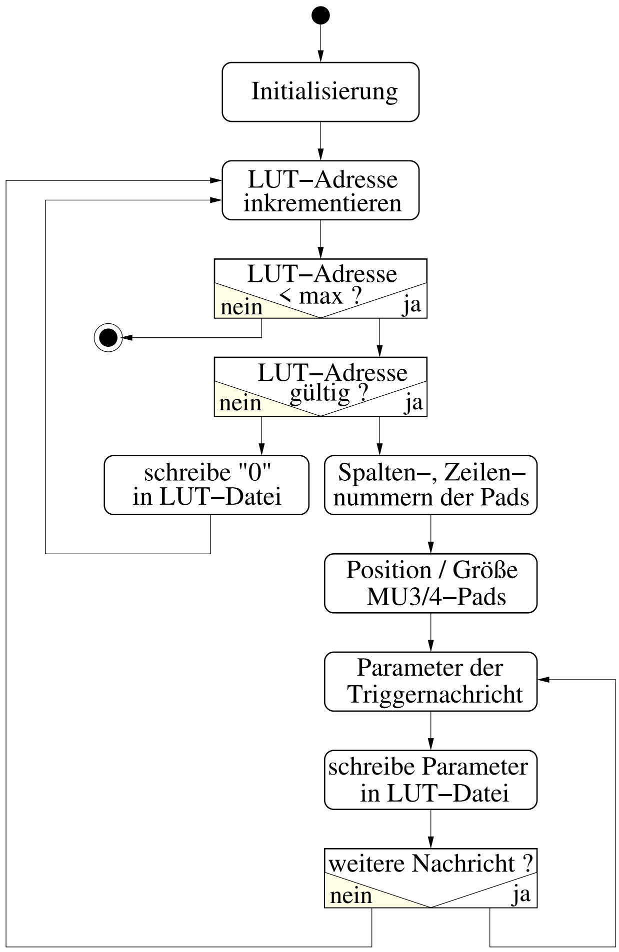


Abbildung 4.13: *Flussdiagramm des Programmes zur Erstellung der LUT-Konfigurationsdateien. Nach der Initialisierung wird der gesamte LUT-Adressbereich in einer Schleife durchlaufen. Sind die Koinzidenzdaten zu einer Adresse ungültig wird eine „0“ in die Ausgabedatei geschrieben. Ansonsten werden die Werte der Parameter der Triggernachrichten berechnet und in die LUT-Konfigurationsdatei ausgegeben.*

rung des Programms werden Objekte der verschiedenen Klassen erzeugt, eine Ausgabedatei für die LUT-Konfigurationsdaten wird angelegt, und die Benutzereinstellungen zur Steuerung des Programms werden aus einer Konfigurationsdatei eingelesen. Diese Datei besitzt das gleiche Format wie die für das Simulationsprogramm verwendete. Die LUT muss die Werte der Nachrichtenparameter für alle möglichen Koinzidenzdatensätze enthalten. Daher wird zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien der gesamte LUT-Adressbereich durchlaufen, der entsprechend der 18 Adressbits $2^{18} = 262144$ Adressen umfasst. Zu jeder LUT-Adresse werden die zugehörigen Daten bestimmt und in die Ausgabedatei geschrieben. Wie in Tabelle 4.2 aufgeführt, entsprechen die LUT-Adressen den Koinzidenzparametern, wobei die beiden niedrigstwertigen Bits der Adresse zur Erzeugung von bis zu vier Nachrichten reserviert sind. Nachdem die LUT-Adresse in einer Schleife inkrementiert worden ist, wird überprüft, ob die aktuelle LUT-Adresse einem gültigem Koinzidenzdatensatz entspricht, d. h. ob die aus der LUT-Adresse extrahierten Koinzidenzparameter alle gültige und konsistente Werte besitzen. Eine LUT-Adresse, für die alle Bits des MU4-Musters den Wert „0“ besitzen, ist beispielsweise ungültig, da eine Koinzidenz wenigstens ein getroffenes Pad oder Pseudo-Pad in MU4 voraussetzt. Beschreibt eine LUT-Adresse einen ungültigen Koinzidenzdatensatz, wird eine „0“ in die LUT-Konfigurationsdatei geschrieben. Sind alle aus der Adresse bestimmten Koinzidenzparameter gültig, so werden daraus die Spalten- und Zeilennummern des MU3-Pads und der getroffenen MU4-Pads der Koinzidenz bestimmt. Dazu wird auf die Informationen über die Zuordnung der Kanäle des Pretriggers zu Detektorspalten zugegriffen, die bei der Initialisierung des Programms eingelesen wurden. Die Geometrieklassen stellen die Informationen bereit, die benötigt werden, um aus den Spalten- und Zeilennummern der Pads deren Positionen und Größen zu bestimmen. Anschließend werden die Werte aller Parameter der Triggernachricht berechnet, mit Hilfe von Routinen aus der FLT-Programmbibliothek binär kodiert und zu dem LUT-Datenwort zusammengefasst. Dieses wird in Form von zwei 32 Bit-Datenworten in die Ausgabedatei geschrieben. Falls zu einem Koinzidenzdatensatz mehrere Triggernachrichten zu erzeugen sind, so wird der binär kodierte Wert des Nachrichtenparameters η – nur darin unterscheiden sich die Mehrfachnachrichten voneinander – für jede weitere Nachricht um eins erhöht, und die so modifizierten LUT-Daten werden in die Datei geschrieben. Nach Durchlaufen des gesamten Adressbereichs wird das Programm beendet.

4.3 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde Software entwickelt, die es ermöglicht, das Verhalten des Myon-Pretrigger-Systems zu simulieren. Darüber hinaus wurde ein Programm erstellt, das Konfigurationsdateien für die LUTs auf den PMGs erzeugt.

Das Simulationsprogramm wird benötigt, um wichtige Kenngrößen des Myon-Pretriggers, wie z. B. die Nachweiseffizienz für Trefferkoinzidenzen, zu bestimmen. Zudem können nur mit Hilfe der Simulation Informationen über interne Prozessierungsschritte des Pretrigger-Systems gewonnen werden, da die Überwachungsfunktionen der Online-Software nicht darauf zugreifen können. Das Simulationsprogramm ermöglicht es ferner, Modifikationen der Hardware oder der Programmierung von Logikbausteinen zu untersuchen, bevor sie implementiert werden. Schließlich wird die Simulation für den Myon-Pretrigger benötigt, um Triggernachrichten als Startpunkte für die Simulationsprogramme der höheren Triggerstufen zu erzeugen.

Die Grundlage des Simulationsprogramms bildet ein konzeptionelles Modell. Dieses beschreibt die wesentlichen Eigenschaften und Funktionen des Systems, die durch die Simulation nachgebildet werden sollen. Zum Entwurf des Simulationsmodells wird der Myon-Pretrigger als abstraktes System klassifiziert. Der Myon-Pretrigger stellt ein offenes System dar, das mit Komponenten der Systemumgebung in Beziehung steht. So empfängt der Myon-Pretrigger seine Eingangsdaten vom FED-System und sendet Triggernachrichten zum FLT oder SLT. Der Myon-Pretrigger ist ein dynamisches System, dessen Zustand sich in diskreten Zeitschritten ändert. Bei der Datenprozessierung kommt es zu Rückkopplungen zwischen verschiedenen

Elementen des Systems, z. B. an der Datenschnittstelle zwischen PCU und PMG. Das entwickelte Simulationsmodell beschreibt die Logikoperationen der digitalen Myon-Pretrigger-Elektronik in diskreten Zeitschritten.

Das Modell wurde in Form des Simulationsprogrammes MUPRESIM implementiert, zu dessen Entwurf eine objektorientierte Methode angewendet wurde, die konzeptionell dem Verfahren der Modellbildung ähnlich ist. Das Programm wurde modular in Form von Klassenbibliotheken erstellt, so dass Teilfunktionen leicht in anderen Programmen verwendet werden können, z. B. zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien. Die Komponenten des Simulationsmodells sind als Klassen im Simulationsprogramm implementiert, wobei sich die Relationen zwischen den Komponenten in der Hierarchie der Klassen widerspiegeln.

Die Konfigurationsklasse stellt eine Benutzerschnittstelle zur Verfügung, die es erlaubt, in einer Konfigurationsdatei verschiedene Einstellungen vorzunehmen, die den Ablauf des Simulationsprogramms steuern.

Von grundlegender Bedeutung für das Simulationsprogramm sind die Klassen zur Beschreibung von Koinzidenzen und Triggernachrichten. Objekte der Koinzidenz-Klasse werden im Simulationsprogramm erzeugt, um die Daten zu gefundenen Trefferkoinzidenzen zusammenzufassen. Die Klasse für Triggernachrichten enthält alle Informationen über die einzelnen Nachrichtenparameter. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ermittelt, wie die Parameter der vom Myon-Pretrigger-System erzeugten Triggernachrichten auf der Grundlage der allgemeinen Definition des HERA – B Nachrichtenformats berechnet werden.

Informationen über die Positionen und Abmessungen sämtlicher Detektorzellen des Myon-Pad- und -Pixel-Systems werden benötigt, um die Parameter der Triggernachrichten zu berechnen. Die Kenntnis der Detektorgeometrie ist zudem Voraussetzung für die Verarbeitung von Monte-Carlo-Ereignissen als Eingangsdaten. Im Simulationsprogramm werden die Informationen zur Detektorgeometrie mit Hilfe einer Klassenkollektion verarbeitet. Diese besteht aus grundlegenden Klassen für einzelne Detektorzellen, sowie Klassen, die den Aufbau der Detektorkammern aus Zellen bzw. den Aufbau des Pad- und Pixel-Systems aus Kammern beschreiben.

Die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems wird mit Hilfe einer Klasse beschrieben, die es erlaubt, auf Informationen zur Zuordnung der Detektorspalten zu den Pretrigger-Kanälen sowie zur Anordnung der Auslesekanäle des FED-Systems zuzugreifen. Das Simulationsprogramm kann verschiedene Quellen dieser Informationen verwenden. Zum einen kann auf diverse Tabellen der HERA – B Datenbank zugegriffen werden, die jeweils einen Teil der benötigten Informationen bereitstellen. Die Datenbank wurde erst gegen Ende der Datennahme im Jahr 2000 von der Online-Software verwendet, um die Konfigurationsdaten des Myon-Pretriggers abzuspeichern. Zuvor wurden statt der Datenbank ASCII-Dateien eingesetzt. Das Simulationsprogramm kann die Daten zur Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems auch aus diesen Dateien einlesen. Während der Prozessierung überprüft das Simulationsprogramm anhand der Ereigniszeit, ob neue Konfigurationseinstellungen eingelesen werden müssen. Dadurch wird erreicht, dass die im Simulationsprogramm implementierte Konfiguration exakt die Bedingungen während der Datennahme widerspiegelt. Die automatische Aktualisierung der System-Konfiguration ist eine entscheidende Voraussetzung für den Vergleich der Simulationsergebnisse mit aufgezeichneten Daten des Myon-Pretriggers.

Die Funktion der verschiedenen Hardware-Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems wird durch separate Klassen beschrieben. Die PLB-Klasse dient dazu, aus den eingelesenen FED-Daten das Datenformat an der Eingangsschnittstelle der PCU zu erzeugen. Das Objekt der PCU-Klasse übernimmt zunächst die Eingangsdaten. Anschließend werden alle Prozessierungschritte der internen Pipelinestufen des zentralen Logikbausteins der PCU ausgeführt. Nach der Maskierung wird die Koinzidenzsuche durchgeführt, und die Koinzidenzparameter werden bestimmt. Vor der Ausgabe der Koinzidenzen werden zwei Selektionsstufen durchlaufen, um die Zahl der Koinzidenzen der Zahl verfügbarer Ausgabekanäle anzupassen. Bis zu dieser Stelle werden die Daten in einem festen Bezug der HERA-Taktsignal verarbeitet, während die weitere Prozessierung auf der PCU und dem PMG ereignisgetrieben, d. h. abhängig vom Auftreten von Koinzidenzen und ihrer Verteilung, ist. Das Simulationsprogramm kann in zwei verschiedenen Modi eingesetzt werden. Entweder kann eine detaillierte Simulation der an der weiteren Verarbeitung beteiligten Schaltungen durchgeführt werden, die die Rückkopplungen zwischen diesen Schaltungen berücksichtigt und es ermöglicht, den Zeitbedarf der Prozessierungsschritte zu bestimmen. Alternativ kann die weitere Prozessierung rein funktional simuliert werden. Dabei stehen die Triggernachrichten bereits innerhalb des Ereignisses zur Verfügung, dessen Trefferdaten verarbeitet worden sind. Dieser Modus wird beispielsweise benötigt, wenn die Pretrigger-Simulation Startpunkte für die Simulationsprogramme der höheren Triggerstufen liefert. Zur Beschreibung der Funktion des PMGs, Triggernachrichten zu empfangenen Koinzidenzdaten zu erzeugen, wird eine weitere Klasse verwendet.

Um den Zeitbedarf der ereignisgetrieben arbeitenden Prozessierungsschritte bestimmen zu können, sind die daran beteiligten Zustandsautomaten-Schaltungen detailliert in der Simulation nachgebildet. Die betrifft die Schaltungen zur Serialisierung der Koinzidenzdaten auf den PCU-Kanälen, die Schaltungen zum Austausch der Koinzidenzdaten zwischen den PCU-Kanälen und dem PMG sowie die Schaltung auf dem PMG, die die Erzeugung der Triggernachrichten steuert. Im realen System sind die Zustandsautomaten in programmierbaren Logikbausteinen implementiert, die asynchron zum HERA-Taktsignal mit Taktraten von 100 bzw. 50 MHz betrieben werden. Im Simulationsprogramm wird idealisierend angenommen, dass die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Ereignissen 100 ns beträgt, entsprechend der Ereignisrate von ungefähr 10 MHz. Um die Interaktionsbeziehungen zwischen den verschiedenen Schaltungen innerhalb eines Ereignisses zu berücksichtigen, werden die Zustandsänderungen für die einzelnen Schaltungen in Zyklen ausgeführt. Dabei wird sukzessive für die verschiedenen Schaltungen für alle Kanäle je ein Zustandsübergang durchgeführt. Insgesamt führen die PCU-Schaltungen je zehn und die PMG-Schaltungen je fünf Zustandsübergänge pro Ereignis durch, entsprechend dem Verhältnis der jeweiligen Taktrate zur Ereignisrate. Nach jedem Prozessierungschritt wird der Zustand für alle Schaltungen gespeichert. Die Folge der Zustandsübergänge wird auch über die Grenzen einzelner Ereignisse fortgeführt.

Auf den PMGs werden zu den von den PCUs empfangenen Koinzidenzdaten Triggernachrichten für die nachfolgende Triggerstufe erzeugt. Dazu werden LUTs verwendet, die die Werte der Nachrichtenparameter für alle möglichen Koinzidenzdaten enthalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm erstellt, das es ermöglicht, Dateien zu erzeugen, die zur Konfiguration der LUTs benötigt werden. Dieses Programm besitzt einen Teil der Funktionalität des Simulationsprogramms. Der modulare Aufbau ermöglicht es, Komponenten des Simulationsprogramms auch zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien zu verwenden.

Die Koinzidenzdaten bilden die Adresse für den Zugriff auf die LUT. Um die Werte der Nachrichtenparameter für alle möglichen Koinzidenzen zu berechnen, durchläuft das Programm den gesamten LUT-Adressbereich. Zu jeder LUT-Adresse werden zunächst die Parameter der Koinzidenz bestimmt. Besitzen nicht alle Koinzidenzparameter gültige und konsistente Werte, so wird eine „0“ in die LUT-Konfigurationsdatei geschrieben. Für gültige Koinzidenzparameter werden die Positionen und Größen der Trefferbereiche in MU3 und MU4 bestimmt. Danach werden die Werte aller Parameter der Triggernachricht berechnet, binär kodiert und in die Konfigurationsdatei geschrieben.

Der Myon-Pretrigger wird in verschiedenen Konfigurationen des HERA-B Triggersystems eingesetzt. Das entwickelte Programm ermöglicht es, LUT-Konfigurationsdateien mit angepassten Parametrisierungen der Triggernachrichten zu erzeugen. Für den Betrieb des Myon-Pretriggers mit dem FLT bzw. dem SLT werden die Parameter auf der Grundlage der allgemeinen Definition des HERA-B Nachrichtenformats berechnet. Die Möglichkeit, mehrere Triggernachrichten zu einer Koinzidenz zu erzeugen, wird nur beim Betrieb mit dem FLT benötigt. Werden die Nachrichten des Myon-Pretrigger direkt zum SLT gesendet, so wird eine Parametrisierung verwendet, für die immer eine Triggernachricht zu einer Koinzidenz erzeugt wird. Eine weitere Parametrisierung der Triggernachrichten wurde entwickelt, die die Analyse von Daten aus dem Testbetrieb des Myon-Pretriggers deutlich vereinfacht.

Das Simulationsprogramm und das Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien sind für das Pad-System vollständig implementiert worden. Für das Pixel-System stehen Programme mit einer eingeschränkten Funktionalität zur Verfügung. Die Simulation des Myon-Pretriggers für das Pixel-System kann bisher Monte-Carlo-Ereignisse als Eingangsdaten verwenden, während Trefferdaten des FED-Systems noch nicht verarbeitet werden können. Dazu muss die Funktionalität des Pixel Mapping Boards (PMB) im Simulationsprogramm nachgebildet werden, das einzelne Pixel-Auslesekanäle zu Pseudo-Pads für den Pretrigger zusammenfasst. Die funktionale Simulation der PCU, mit einem im Vergleich zum Pad-System modifizierten Koinzidenzschema, ist implementiert. Somit können Informationen über Koinzidenzen im Pixel-System durch das Simulationsprogramm gewonnen werden. Die Erzeugung der Triggernachrichten zu gefundenen Koinzidenzen im Simulationsprogramm erfordert einige Modifikationen gegenüber dem Pad-System. Diese stellen jedoch rein programmtechnische und keine prinzipiellen Änderungen dar, da für das Pixel-System dieselbe Definition der Nachrichtenparameter wie für das Pad-System verwendet wird. Für das Pixel-System stehen bisher nur LUT-Konfigurationsdateien mit der speziell für Testmessungen entworfenen Parametrisierung zur Verfügung. Damit wurden am Ende der Datennahmeperiode 2000 erste Tests des Myon-Pretriggers im Pixel-System im Betrieb des HERA-B Experimentes durchgeführt. Die Erweiterungen der Software, die notwendig sind, damit das Simulationsprogramm Triggernachrichten für das Pixel-System erzeugen kann, erlauben es auch, die zum Betrieb mit FLT und SLT benötigten LUT-Konfigurationsdateien zu erstellen.

Kapitel 5

Untersuchungen zum Verhalten des Myon-Pretrigger-Systems

In diesem Kapitel werden verschiedene Analysen vorgestellt, die dazu dienen, das Verhalten des Myon-Pretrigger-Systems zu untersuchen. Diese Analysen erfordern den Einsatz des Simulationsprogramms, das in Abschnitt 4.1 beschrieben wurde.

Dabei wird eine wichtige, charakteristische Kenngröße des Myon-Pretrigger-Systems bestimmt, die Nachweiseffizienz für Trefferkoinzidenzen. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Ereignissen wird die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für den Zerfall $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ermittelt. Darüber hinaus werden Ergebnisse von Studien zur Latenzzeit des Myon-Pretriggers vorgestellt. Dabei wird die Abhängigkeit der Latenzzeit von der primären Wechselwirkungsrate untersucht.

Schließlich wird eine Untersuchung zu Treffermultiplizitäten in verschiedenen Komponenten des HERA – B Detektors präsentiert. Die Ergebnisse dieser Studie stellen eine Grundlage für die Entwicklung eines RICH-Multiplizitäts-Veto-Systems dar.

5.1 Die Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems

Die Kenntnis der Nachweiseffizienz des Myon-Pretriggers ist eine wichtige Grundlage für jede Analyse, die auf Daten beruht, auf deren Selektion der Myon-Pretrigger Einfluss hatte. Um einen möglichst unverzerrten Schätzwert für eine gesuchte Größe aus den Messwerten bestimmen zu können, muss auch der Effekt der Effizienz des Myon-Pretriggers berücksichtigt werden. Das Ziel der in diesem Abschnitt präsentierten Untersuchung ist es zu bestimmen, mit welcher Effizienz das Myon-Pretrigger-System vorhandene Trefferkoinzidenzen nachweist. Dazu werden Daten aus dem Jahr 2000 verwendet, weswegen sich die Analyse auf das Pad-System beschränkt, da der Myon-Pretrigger für das Pixel-System zu dieser Zeit nicht vollständig in Betrieb genommen war.

Das grundlegende Prinzip jeder Methode zur Effizienzbestimmung besteht darin, definierte Eingangsdaten zu erzeugen, für die die Antwortsignale des zu untersuchenden Systems genau vorhergesagt werden können. Die Effizienz ergibt sich dabei aus dem Vergleich der tatsächlichen Antwortsignale mit den vorhergesagten. Im HERA – B Experiment können Referenzsignale als Eingangsdaten nur eingeschränkt mit Hilfe des Fast Control Systems (FCS) erzeugt werden. Das FCS veranlasst dazu die Front End Driver (FED), in einem festgelegten zeitlichen Abstand Signale zu generieren, die von der nachfolgenden Elektronik genau wie Detektorsignale verarbeitet werden. Allerdings gibt es nur drei Arten dieser FCS-Testdaten, die sich durch das Muster der erzeugten Treffersignale unterscheiden. Entweder wird für alle Detektorkanäle ein Treffersignal generiert oder für die mit ungerader oder gerader Kanalnummer. Um die Effizienz einzelner Elektronikkanäle des Myon-Pretriggers mit FCS-Testdaten bestimmen zu können, wäre es notwendig, eine von dem betrachteten Kanal abhängige Maskierung der Eingangsdaten im Koinzidenz-CPLD (Complex Programmable Logic Device) der PCU vorzunehmen. Die vom Myon-Pretrigger erzeugten Nachrichten müssten so abgespeichert werden, dass bei der Analyse der Daten für jedes Ereignis die jeweils aktuelle Maskierung rekonstruiert werden kann. Diese Prozedur zur Effizienzbestimmung ist nicht praktikabel.

Zur Bestimmung der Effizienz wird daher eine alternative Methode verwendet, die von der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Simulation für das Myon-Pretrigger-System Gebrauch macht. Dabei werden im Strahlbetrieb des HERA – B Experimentes Daten aufgezeichnet, die sowohl die Trefferinformationen des Myon-Detektors als auch die vom Myon-Pretrigger-System erzeugten Triggernachrichten enthalten, ohne dass der Pretrigger Einfluss auf die Ereignisselektion nimmt. Diese Daten werden mit der Simulation des Myon-Pretriggers verarbeitet, die Koinzidenzen in den aufgezeichneten Trefferdaten sucht und die zugehörigen Triggernachrichten erzeugt. Die Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems wird durch einen Vergleich der im Datennahmebetrieb erzeugten Triggernachrichten mit den von der Simulation berechneten Triggernachrichten bestimmt.

Zunächst wird erläutert, welche Datensätze für diese Untersuchung verwendet werden, daran anschließend werden die Analysemethoden und die Resultate vorgestellt.

5.1.1 Die Triggerkonfiguration zur Datennahme und die verwendeten Datensätze

Grundlage für die hier vorgestellte Effizienzanalyse sind Ereignisdaten, die ohne Einfluss des Myon-Pretriggers selektiert werden, jedoch die vom Myon-Pretrigger-System generierten Triggernachrichten enthalten. Dazu ist es notwendig, den First Level Trigger (FLT) zu verwenden, da dieser im Gegensatz zu den Pretrigger-Systemen eine Schnittstelle zur Data Acquisition (DAQ) besitzt, über die Triggerinformationen zu den Ereignisdaten hinzugefügt werden können. In Abbildung 5.1 sind die zur Datennahme verwendeten Konfigurationen des Pretriggers und des FLT schematisch dargestellt. Der FLT wird in einer Konfiguration betrieben, die als transparenter Modus bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass die Track Finding Units (TFU) keine Spursuche und -rekonstruktion durchführen, sondern die von den Pretrigger Message Generators (PMG) erzeugten Triggernachrichten empfangen und diese zur Trigger Decision Unit (TDU) weiterleiten. Für ein akzeptiertes Ereignis liest die DAQ die Triggerinformationen der TDU aus und fügt sie als speziellen Datenblock, der im Folgenden als FLT-Datenblock bezeichnet wird, zu den übrigen Ereignisdaten hinzu, die als Data Summary Tapes (DST) archiviert werden. Bis zur TDU werden die Daten in der oberen und unteren Detektorhälfte getrennt und unabhängig voneinander prozessiert.

Die Daten, die für die hier präsentierte Bestimmung der Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems analysiert werden, wurden mit der beschriebenen Konfiguration des Triggersystems, d. h. unter Verwendung des FLT im transparenten Modus, aufgezeichnet. Der Myon-Pretrigger

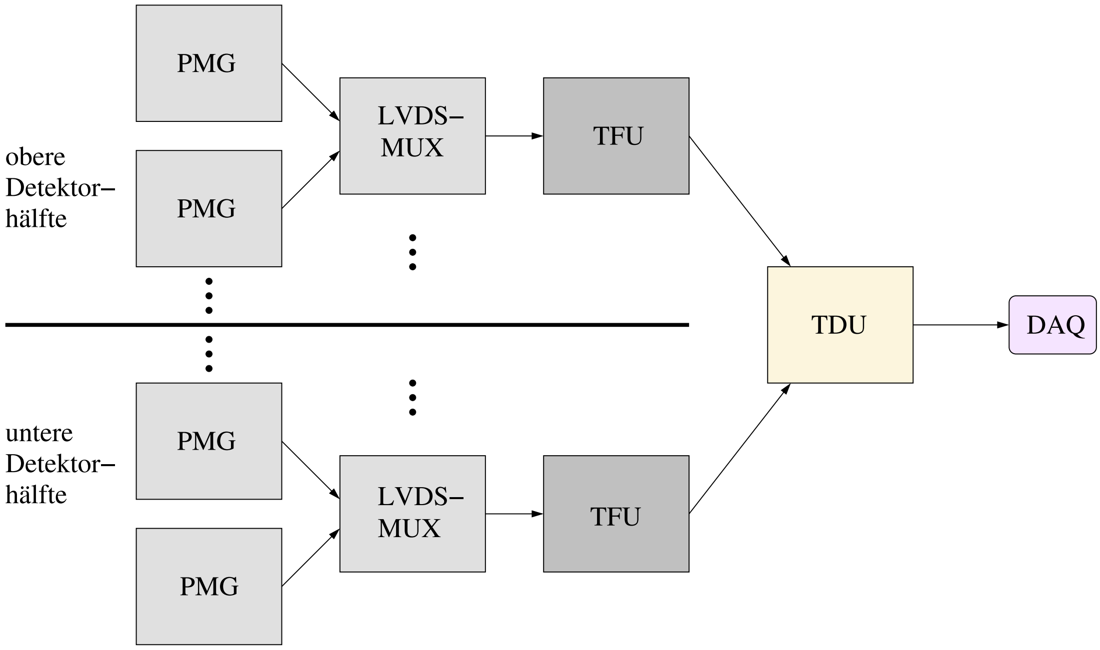


Abbildung 5.1: *Konfiguration des Triggersystems für die Effizienzdatennahme. Die Pretrigger Message Generators (PMG) senden die Triggernachrichten des Myon-Pretrigger-Systems über die LVDS-Multiplexer (LVDS-MUX) zu Track Finding Units (TFU). Diese übertragen die Nachrichten zur Trigger Decision Unit (TDU), die eine Schnittstelle zur Data Acquisition (DAQ) besitzt, über die die Triggerinformationen ausgelesen und archiviert werden. Bis zur TDU werden die Daten der oberen und unteren Detektorhälfte unabhängig voneinander verarbeitet. Für jede Detektorhälfte werden neun PMGs, fünf LVDS-MUX und eine TFU eingesetzt.*

hatte keinen Einfluss auf die Ereignisselektion, um eine systematische Beeinflussung der Effizienzbestimmung zu vermeiden. Stattdessen wurde der Second Level Trigger (SLT) verwendet, auf dessen Prozessoren ein Programm ausgeführt wurde, das die Funktion des Myon-Pretriggers emulierte, indem es nach dem in Abbildung 3.2 dargestellten Schema nach Trefferkoinzidenzen im Myon-Pad-System suchte und Ereignisse selektierte, in denen wenigstens eine Koinzidenz gefunden wurde. Gegenüber dem im HERA – B Experiment verfügbaren Random Trigger, der Ereignisse für eine zufällig gewählte Bunch Crossing Number (BX-Nummer) selektiert, bietet die SLT-Pretrigger-Emulation den Vorteil, Ereignisse um etwa einen Faktor 10 anzureichern, die Triggernachrichten des Myon-Pretriggers im FLT-Datenblock enthalten.

Für die hier vorgestellte Analyse werden zwei separate Datensätze betrachtet. In Tabelle 5.1 sind einige Angaben zu beiden Datensätzen aufgeführt. Der erste entspricht Run 15 424 und der zweite den Runs 17 042 und 17 044, zusammenfassend im Folgenden als Run 17 04x bezeichnet. Beide Datensätze umfassen jeweils etwa 500 000 Ereignisse, die bei einer mittleren Wechselwirkungsrate am Target von 5 MHz aufgezeichnet wurden. Für beide Datennahmen wurden Look-up Tables (LUT) des Typs „PHYS_SM“ verwendet. Bei dieser Parametrisierung wird zu einer Koinzidenz stets genau eine Triggernachricht erzeugt. In Abschnitt 4.2

wurden diese und weitere Parametrisierungen näher erläutert. In Tabelle 5.1 ist der Anteil an Ereignissen angegeben, die durch die SLT-Pretrigger-Emulation bzw. den Random Trigger selektiert wurden. Während jeder Datennahme werden durch den Random Trigger stets Ereignisse mit einer mittleren Rate von 4 Hz ausgewählt.

Tabelle 5.1: *Die für die Effizienzanalyse verwendeten Datensätze. Es werden zwei Datensätze untersucht, Run 15 424 sowie Runs 17 042 und 17 044. Die beiden Datensätze wurden mit einem zeitlichen Abstand von zweieinhalb Monaten jeweils bei einer mittleren Wechselwirkungsrate am Target von* 5 MHz *aufgezeichnet. Für die einzelnen Runs ist jeweils die Gesamtzahl der archivierten Ereignisse angegeben. Zusätzlich ist die Zahl der Ereignisse aufgeführt, die durch den Second Level Trigger (SLT) selektiert wurden, der die Funktion des Myon-Pretriggers emulierte, bzw. durch den Random Trigger, der während der Datennahme stets Ereignisse mit einer mittleren Rate von* 4 Hz *auswählte. In Klammern ist jeweils der Anteil an der Gesamtereigniszahl des Runs angegeben. In der letzten Zeile sind die beiden Runs 17 042 und 17 044 zusammengefasst.*

		Target-	Zahl der Ereignisse		
Run-Nummer	Datum	Rate [MHz]	SLT	Random Trigger	Gesamt
15 424	29.5.2000	5	492 304 (98,3 %)	8 435 (1,7 %)	500 739
17 042	14.8.2000	5	207 735 (93,9 %)	13 396 (6,1 %)	221 131
17 044	14.8.2000	5	273 044 (95,8 %)	11 934 (4,2 %)	284 978
17 04x	14.8.2000	5	480 779 (95,0 %)	25 330 (5,0 %)	506 109

5.1.2 Die Methode zur Bestimmung der Effizienz des Myon-Pretriggers

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Daten werden durch die Simulation des Myon-Pretriggers prozessiert. Durch den Vergleich der vom Simulationsprogramm erzeugten Triggernachrichten mit den aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Nachrichten des Myon-Pretrigger-Systems wird die Effizienz bestimmt. Diese Methode setzt voraus, dass die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems zur Zeit der Datennahme für die Simulation exakt nachgebildet wird, um eine systematische Beeinflussung der ermittelten Effizienzwerte zu vermeiden. Insbesondere ist es für die Simulation des Myon-Pretriggers erforderlich zu berücksichtigen, dass während der Datennahme die automatische Aktualisierung der Maskierung heißer Kanäle durch die Online-Software aktiviert war. Die Informationen über die jeweils maskierten Pretrigger-Kanäle wurden von der Online-Software in Form von ASCII-Dateien archiviert, wobei nach einer Aktualisierung der Maskierung jeweils eine neue Datei angelegt wurde. Die Dateinamen enthalten den Zeitpunkt, zu dem die Aktualisierung erfolgte, so dass der Maskierungszustand zu jedem Zeitpunkt der Datennahme rekonstruiert werden kann. Bei der Initialisierung des Simulationsprogrammes werden die Zeiten aller Maskenaktualisierungen aus den Dateinamen entnommen und abgespeichert. Während der Simulation wird für jedes Ereignis anhand der Ereigniszeit überprüft, ob die aktuell verwendete Maskierung für dieses Ereignis noch gültig ist oder ob eine neue Datei eingelesen und die Maskierung aktualisiert werden muss.

Neben der Maskierung heißer Kanäle wird die Qualität der optischen Datenübertragungsstrecken zwischen den Pretrigger Link Boards (PLB) und den PCUs für die Simulation berücksichtigt. Die Online-Software klassifizierte die Pretrigger Optical Links (POL) auf der Grundlage der Rate fehlerhaft übertragener Kontrolldaten. Diese Informationen wurden regelmäßig aktualisiert und zusammen mit den Maskierungsinformationen in den Dateien abgespeichert. Für die Simulation werden zusätzlich zu den heißen diejenigen Pretrigger-Kanäle maskiert, für die die optischen Verbindungen nicht initialisiert und daher keine Trefferdaten übertragen werden konnten.

Zur Bestimmung der Effizienz wird zu jeder vom Simulationsprogramm erzeugten Triggernachricht eine übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock desselben Ereignisses gesucht. Für jeden Elektronikkanal des Myon-Pretrigger-Systems, d. h. für jedes MU3-Pad, dessen Position durch die Spaltennummer s und die Padnummer p gekennzeichnet ist, wird ein Effizienzwert $\varepsilon(s,p)$ wie folgt bestimmt:

$$\varepsilon(s,p) = \frac{\mathrm{N}_{\mathrm{match}}(s,p)}{\mathrm{N}_{\mathrm{sim}}(s,p)} \; . \tag{5.1}$$

Dabei bezeichnet $\mathrm{N}_{\mathrm{sim}}(s,p)$ die Gesamtzahl aller von der Simulation erzeugten Triggernachrichten für das jeweils betrachtete MU3-Pad und $\mathrm{N}_{\mathrm{match}}(s,p)$ die Zahl der Triggernachrichten, für die eine übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock gefunden wird.

Eine vom Simulationsprogramm erzeugte und eine aus dem FLT-Datenblock ausgelesene Triggernachricht des Myon-Pretrigger-Systems werden als übereinstimmend betrachtet, falls diejenigen Parameter identische Werte besitzen, die vom FLT benötigt werden, um die Position und Größe einer Region of Interest (RoI) zu bestimmen:

- Der Parameter ξ beschreibt die x-Position des MU3-Pads einer Koinzidenz.
- Aus den Parametern $d\xi$ und $dd\xi$ wird ausgehend vom MU3-Pad die Position und Größe der RoI in MU4 ermittelt. Damit die TFU die Anodendrahttreffer eines Spurkandidaten in der Superlage MU4 finden und so die Rekonstruktion der Spur im FLT durchgeführt werden kann, müssen also ξ, $d\xi$ und $dd\xi$ korrekt bestimmt werden.
- Durch den Parameter η ist die y-Position des MU3-Pads gegeben. Da die TFUs in MU4 und MU3 über keine Trefferinformationen in y-Richtung verfügen, ist die vom Pretrigger bestimmte y-Position entscheidend, um die RoI in MU1 zu bestimmen.

Eine detaillierte Beschreibung der Parameter der Triggernachrichten findet sich in Abschnitt 4.1.5.

Aufgrund der Funktionsweise der FLT-Komponenten ist es nicht möglich, im transparenten Modus sämtliche Parameter der vom Myon-Pretrigger-System erzeugten Triggernachrichten unverändert in den FLT-Datenblock zu übertragen. So werden die Werte der Parameter $d\xi$ und $dd\xi$ vom FLT derart modifiziert, dass nicht auf die vom Myon-Pretrigger bestimmten Werte zurückgeschlossen werden kann. Deshalb können diese Parameter bei der Bestimmung der Effizienzwerte nicht berücksichtigt werden. Die Werte von ξ und η werden durch den FLT nicht verändert. Im Rahmen der hier präsentierten Effizienzanalyse werden daher Triggernachrichten als übereinstimmend betrachtet, deren Parameter ξ und η identisch sind.

5.1.3 Die Bestimmung der Effizienz

Status der Systeminstallation und maskierte Datenkanäle

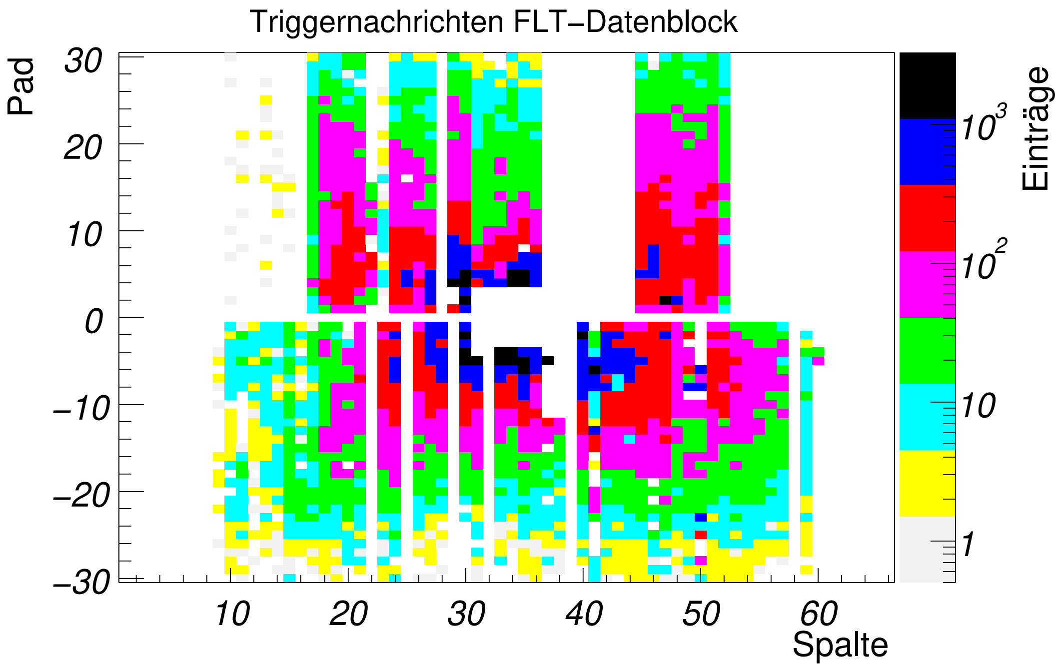
Für die Simulation werden die Kanäle des Myon-Pretrigger-Systems, die während der Datennahme aufgrund heißer Pads oder Defekten in der Pretrigger-Elektronik maskiert waren oder für die die optischen Datenübertragungen nicht initialisiert werden konnten, ebenfalls maskiert. Dazu werden die Maskierungsinformationen aus den von der Online-Software während der Datennahme erzeugten Dateien verwendet, wobei zeitliche Änderungen der Maskierung durch das Simulationsprogramm berücksichtigt werden.

Um den Stand der Installation des Myon-Pretrigger-Systems zu veranschaulichen, sind in den Abbildungen 5.2 und 5.3 die Verteilungen der vom Pretrigger erzeugten Triggernachrichten für die beiden untersuchten Datensätze dargestellt. Die Nachrichten des Myon-Pretriggers werden für jedes Ereignis aus dem FLT-Datenblock ausgelesen, und aus den Parametern ξ und η werden die Spalten- und Padnummern des MU3-Pads der Koinzidenz bestimmt. Zusätzlich ist jeweils gezeigt, welche Datenkanäle in den Superlagen MU3 und MU4 maskiert waren.

Zum Zeitpunkt der ersten Datennahme (Run 15 424) war die Installation des Myon-Pretriggers für das Pad-System noch nicht abgeschlossen. Es fehlten die PCUs in der oberen und unteren Detektorhälfte, die die Daten der am weitesten außen liegenden Spalten verarbeiten. In der $+y$-Hälfte waren die Spalten 1 bis 4 sowie die Spalten 65 und 66 noch nicht mit PCUs bestückt, in der $-y$-Hälfte traf dies auf die Spalten 1 bis 4 und die Spalten 61 bis 66 zu.

Durch den Ausfall eines Nachrichten-Multiplexers (LVDS-MUX) in der $+y$-Hälfte konnten von zwei PMGs keine Triggernachrichten zum FLT übertragen werden. Dies betraf insgesamt 16 Spalten, und zwar die Spalten 37 bis 44 und 53 bis 60. Ein PLB, das die Trefferdaten der MU4-Spalten 9 bis 16 verarbeitete, war fehlerhaft konfiguriert. Zur Korrektur von Signallaufzeiten wird die vom FCS empfangene BX-Nummer durch das PLB um eins dekrementiert. Für das fehlerhaft konfigurierte PLB wurde die BX-Nummer um 32 vermindert, so dass die Daten der MU4-Spalten gegenüber den Daten der MU3-Spalten um 31 Bunch Crossings verzögert wurden. Dadurch konnten in dem entsprechenden Bereich keine Koinzidenzen gefunden werden, die mit dem Durchgang eines Teilchens korreliert waren, sondern lediglich zufällige, von Treffern aus verschiedenen, zeitlich verschobenen Ereignissen herrührende. Um den Anteil nicht installierter oder maskierter Datenkanäle zu bestimmen, wird die Gesamtzahl der Kanäle, also der Pads, benötigt. In Tabelle 5.2 ist die Zahl der Pads für die beiden Superlagen MU3 und MU4 für den Bereich des gesamten Systems als auch für die $+y$- und $-y$-Hälften getrennt angegeben. Dadurch, dass eine MU3-Spalte 30 und eine MU4-Spalte 29 Pads besitzt, ist die Zahl der Pads in MU3 höher als in MU4. Wegen des Ausschnitts für das Elektronstrahlrohr gibt es in der $-y$-Hälfte in MU3 und MU4 jeweils acht Pads weniger als in der $+y$-Hälfte. Für MU4 muss berücksichtigt werden, dass eine MU4-Spalte aufgrund des Koinzidenzschemas zu drei Koinzidenz-Kanälen beiträgt. Das Koinzidenzschema sowie die Bezeichnung der MU4-Spalten ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Für die Koinzidenz-Kanäle am Rande des Pad-Systems, die die Daten der MU3-Spalten 1, 66 in der $+y$- und $-y$-Richtung verarbeiten, gibt es nur je zwei MU4-Spalten. Die fehlende Spalte entspricht dabei immer dem MU4R-Beitrag zum Koinzidenzmuster.

Wie in den gezeigten Häufigkeitsverteilungen in den Abbildungen 5.2 und 5.3 zu erkennen,



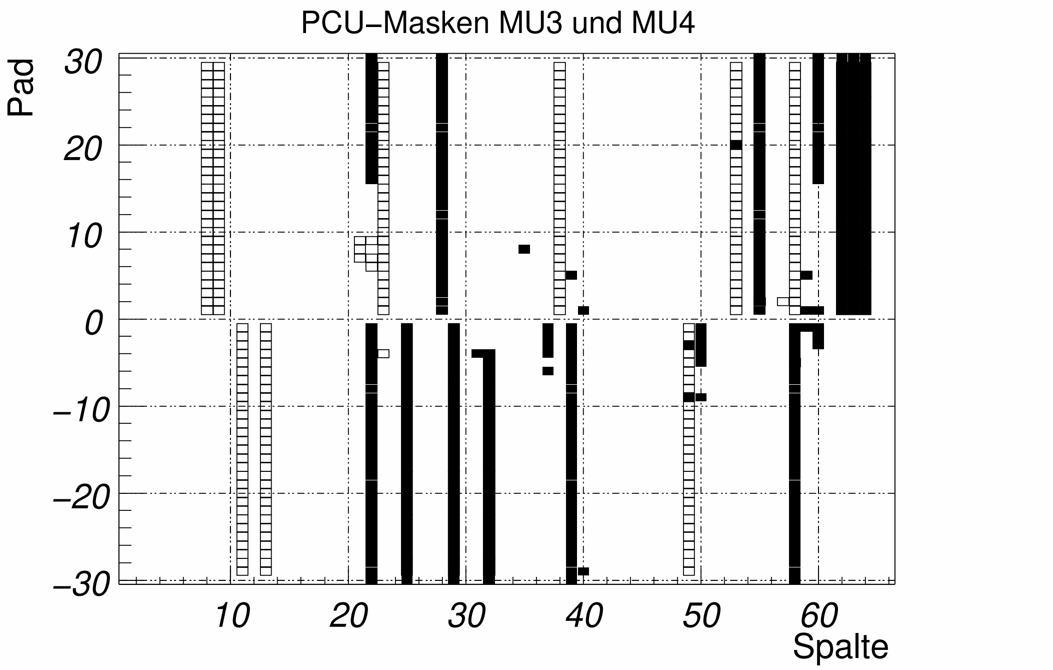
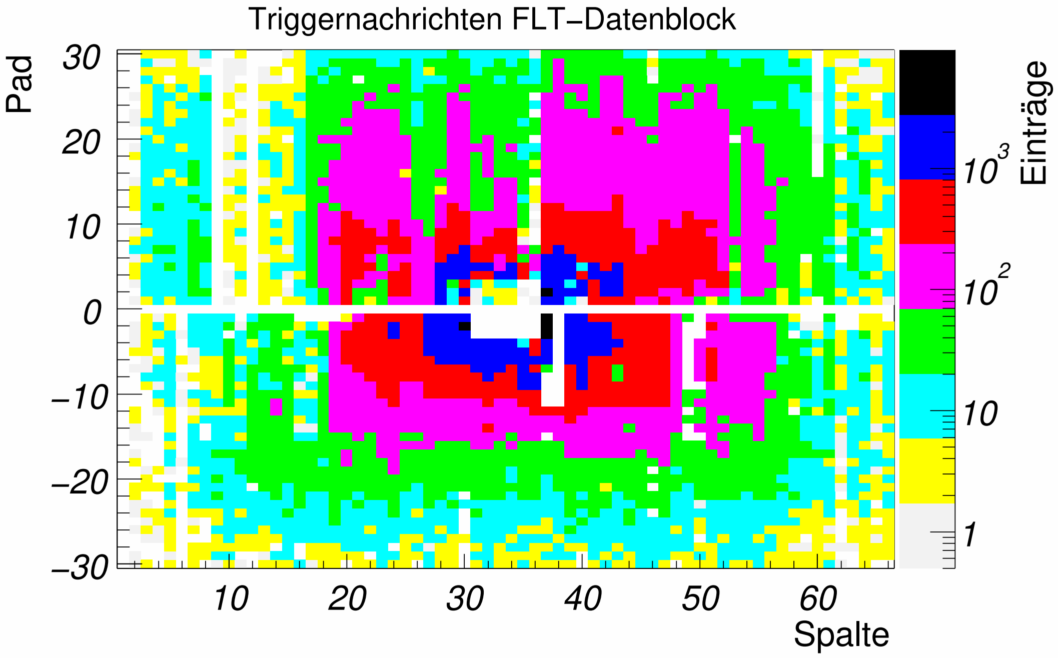


Abbildung 5.2: *Darstellung der Verteilung der Triggernachrichten des Myon-Pretriggers (oben) und der maskierten Kanäle (unten) für Run 15424 am 29.5.2000. Für die aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Nachrichten werden aus den Parametern ξ und η die Spalten- und Padnummern des MU3-Pads der Koinzidenz bestimmt. Die für die Verarbeitung im Koinzidenz-CPLD der PCU maskierten Kanäle der Superlage MU3 sind als ausgefüllte Rechtecke dargestellt, die der Superlage MU4 als nicht-gefüllte Rechtecke. Der Flächeninhalt eines Rechtecks ist jeweils proportional zu dem Anteil der Ereignisse, für die der entsprechende Kanal maskiert war. Alle Rechtecke besitzen maximalen Flächeninhalt, d. h. die entsprechenden Kanäle waren während der gesamten Datennahme maskiert. Die Padnummern sind für die Spalten in der $-y$-Hälfte negativ dargestellt.*



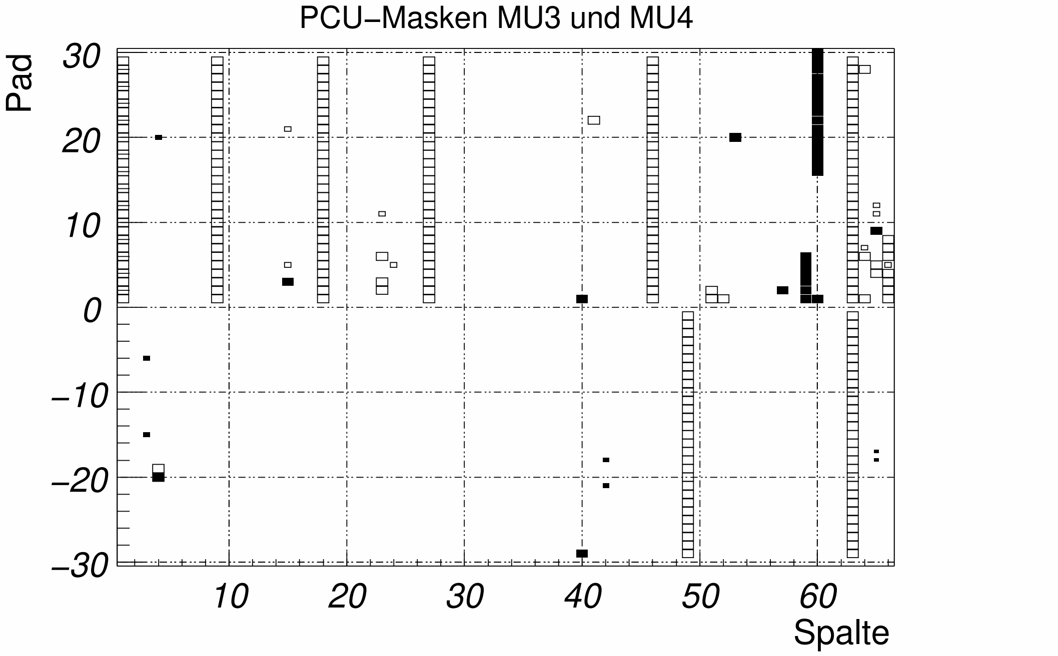


Abbildung 5.3: *Die Verteilung der Triggernachrichten des Myon-Pretriggers (oben) und der maskierten Kanäle (unten) für Run 17 04x am 14.8.2000. Die Art der Darstellung entspricht der in Abbildung 5.2. Der zentrale Ausschnitt für das Protonstrahlrohr und das Pixel-System ist zu erkennen, wie auch der Auschnitt für das Elektronstrahlrohr in der $-y$-Hälfte in den Spalten 37 und 38. In der unteren Abbildung ist zu sehen, dass einige Kanäle nur für einen Teil der Datennahme maskiert waren.*

Tabelle 5.2: *Anzahl von Pads in MU3 und MU4. In der $-y$-Hälfte gibt es in beiden Superlagen jeweils acht Pads weniger wegen des Ausschnitts für das Elektronstrahlrohr. Die Unterscheidung der MU4-Spalten nach ihrem Beitrag zum Koinzidenzmuster ist im Text erläutert.*

Superlage	Detektorbereich gesamt	$+y$	$-y$
MU3	3916	1962	1954
MU4L, MU4M	3784	1896	1888
MU4R	3668	1838	1830

ist die Zahl der erzeugten Triggernachrichten für Pads im zentralen Bereich um das Protonstrahlrohr herum deutlich höher als im äußeren Bereich des Detektors. Daher führen maskierte Datenkanäle nahe dem Protonstrahlrohr zu einem relativ größeren Verlust an Triggernachrichten als maskierte Kanäle im Randbereich des Detektors. Um dies quantitativ zu berücksichtigen, werden Gewichte $g(s,p)$ für jedes Pad abhängig von der Spaltennummer s und der Padnummer p berechnet:

$$g(s,p) = \exp\left(-\left[\left(\frac{s-a}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{p-b}{c_2}\right)^2\right]^{d/2}\right) . \tag{5.2}$$

Diese Funktion beschreibt die Häufigkeitsverteilung der Koinzidenzen. Die Werte der Parameter werden durch eine Anpassung an eine Koinzidenzverteilung für Monte-Carlo-Ereignisse bestimmt. Dies ist in Anhang A beschrieben. Im Folgenden werden zur Gewichtung Parameterwerte verwendet, die sich aus der Anpassung an die Koinzidenzverteilung für Monte-Carlo-Ereignisse mit je einem Zerfall $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ ergeben:

$$g_{J/\psi}(s,p) = \exp\left(-\left[\left(\frac{s-33{,}48}{0{,}21}\right)^2 + \left(\frac{p-(-0{,}03)}{0{,}28}\right)^2\right]^{\frac{0{,}44}{2}}\right) . \tag{5.3}$$

In Tabelle 5.3 ist für Run 15 424 der Anteil der Datenkanäle angegeben, die nicht mit Pretrigger-Elektronik bestückt waren bzw. wegen Defekten der Hardware keine Triggernachrichten zum FLT senden konnten. Darüber hinaus ist der Anteil der maskierten Kanäle für die beiden Superlagen MU3 und MU4 aufgeführt. Da die Maskierung während der Datennahme aktualisiert wurde, wird bei den Angaben zu den maskierten Kanälen berücksichtigt, für welchen Anteil $\mathcal{A}(B)$ der Ereignisse die Kanäle jeweils ausmaskiert waren:

$$\mathcal{A}(B) = \frac{1}{N_E \cdot N_{Pads}(B)} \cdot \sum_{(s,p)\in B,\,\text{maskiert}} n_E(s,p) . \tag{5.4}$$

Hierbei bezeichnet $\mathcal{A}(B)$ den Anteil der maskierten Pads im Bereich B, wobei es sich dabei entweder um das gesamte Pad-System oder um die $+y$- oder $-y$-Hälfte handelt. N_E ist die Gesamtzahl der Ereignisse, $N_{Pads}(B)$ die Zahl der Pads im Bereich B und $n_E(s,p)$ die Zahl

Tabelle 5.3: *Anteil nicht bestückter, von Hardware-Defekten betroffener sowie maskierter Datenkanäle für Run 15 424. Die Angaben sind jeweils für den gesamten Bereich des Pad-Systems als auch für die $+y$- und $-y$-Hälften getrennt aufgeführt. Bei den Angaben zu den maskierten Kanälen in MU3 und MU4 ist gemäß Gleichung (5.4) berücksichtigt, für welchen Anteil an Ereignissen einzelne Kanäle maskiert waren. Die Gewichte sind mittels der Parametrisierung der Koinzidenzverteilung nach Gleichung (5.3) berechnet. Die Kategorien sind teilweise nicht disjunkt.*

Kategorie	Anteil von Datenkanälen in %					
	ungewichtet			gewichtet		
	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
nicht installiert	10,6	7,4	13,8	0,6	0,4	0,8
defekter LVDS-MUX	11,8	23,6	0	14,2	28,4	0
PLB-Konfiguration	7,4	14,8	0	1,5	3,0	0
maskiert MU3	9,6	9,2	10,0	14,5	5,9	23,1
maskiert MU4	11,7	14,2	9,2	10,9	8,0	13,8

der Ereignisse, für die ein Pad mit Spaltennummer s und Padnummer p aus dem Bereich B ausmaskiert war.

Die ungewichteten Anteile in Tabelle 5.3 ergeben sich als Verhältnis der Zahl der jeweiligen Datenkanäle zu der Gesamtzahl der Pads im betrachteten Bereich gemäß Tabelle 5.2. Zur Berechnung der gewichteten Anteile wird der Beitrag der einzelnen Datenkanäle mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skaliert.

Der Anteil nicht mit Pretrigger-Elektronik bestückter Kanäle beträgt ungewichtet 10,6 %. Da diese Kanäle den am weitesten außen liegenden Detektorspalten des Pad-Systems entsprechen, ist ihr Beitrag zur Koinzidenzverteilung gering, so dass der gewichtete Anteil nicht installierter Kanäle bei 0,6 % liegt. Die Kanäle, von denen wegen des defekten LVDS-MUX keine Triggernachrichten zum FLT übertragen werden konnten, liegen allesamt in der $+y$-Hälfte. Da ein Teil der betroffenen Spalten unmittelbar an den Ausschnitt für das Protonstrahlrohr angrenzt, wird durch die Gewichtung der Anteil dieser Kanäle von 11,8 % auf 14,2 % vergrößert. Die von der Fehlkonfiguration eines für die Übertragung von MU4-Daten verwendeten PLBs betroffenen Datenkanäle liegen ebenfalls in der $+y$-Hälfte und entsprechen einem Anteil von 7,4 % des Pad-Systems. Da sich diese Spalten im äußeren Bereich des Detektors befinden, beträgt der gewichtete Anteil der von diesem Defekt betroffenen Spalten nur 1,5 % des gesamten Systems. Durch die Gewichtung erhöht sich der Anteil der maskierten MU3-Kanäle, vor allem für die $-y$-Hälfte, da einige Kanäle im zentralen Bereich des Pad-Systems liegen. Für MU4 nimmt der gesamte Anteil maskierter Kanäle durch die Gewichtung leicht ab, wobei der Beitrag der Kanäle in der $+y$-Hälfte ab- und der in der $-y$-Hälfte zunimmt. Einige Kanäle tragen in verschiedenen Kategorien bei. So waren Kanäle in Detektorbereichen, die von der Fehlkonfiguration des PLBs für die MU4-Daten oder vom nicht funktionierenden LVDS-MUX betroffen waren, auch auf der PCU maskiert.

Die zweite Datennahme fand nach der vollständigen Installation des Myon-Pretriggers im Pad-System statt. In Tabelle 5.4 ist der Anteil der maskierten Kanäle für die beiden Superlagen MU3 und MU4 für Run 17 04x angegeben. Die Anteile werden in der gleichen Weise wie für

Tabelle 5.4: *Anteil der von Defekten betroffenen und maskierten Datenkanäle für Run 17 04x. Die Angaben sind jeweils für den gesamten Bereich einer Superlage als auch für die $+y$- und $-y$-Hälften getrennt aufgeführt. Bei den Angaben zu den maskierten Kanälen in MU3 und MU4 ist gemäß Gleichung (5.4) berücksichtigt, für welchen Anteil von Ereignissen einzelne Kanäle maskiert waren. Die Gewichte sind mittels der Parametrisierung der Koinzidenzverteilung gemäß Gleichung (5.3) berechnet.*

Kategorie	Anteil von Datenkanälen in %					
	ungewichtet			gewichtet		
	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
PLB-Konfiguration	7,4	14,8	0	1,5	3,0	0
maskiert MU3	0,8	1,4	0,3	0,3	0,5	0,1
maskiert MU4	6,6	10,0	3,2	3,2	5,8	0,7

Run 15 424 berechnet.

In MU3 sind im gesamten Pad-System weniger als 1 % der Kanäle maskiert. In MU4 liegt der Anteil maskierter Pads bei 6,6 % bzw. 3,2 % nach der Wichtung. Sowohl in MU3 als auch in MU4 ist der Anteil der maskierten Pads in der $+y$-Hälfte größer als in der $-y$-Hälfte. Der Anteil der defekten Kanäle, für die wegen des fehlerhaft konfigurierten PLBs keine Koinzidenzen gefunden werden konnten, beläuft sich wie für Run 15 424 auf 7,4 % bzw. nach Wichtung auf 1,5 % des gesamten Systems.

Zwischen den beiden Datennahmen wurden bekannte Hardware-Defekte behoben. Dadurch konnte der Anteil der Kanäle, die von Defekten betroffen oder maskiert waren, deutlich reduziert werden. Die Anstrengungen richteten sich dabei vornehmlich auf Kanäle in MU3. Die Fehlkonfiguration des PLBs ist zwischenzeitlich behoben. Daher ist mit einem weiter reduzierten Anteil defekter Kanäle für die kommende Datennahmeperiode zu rechnen.

Bestimmung des Fehlers der Effizienzwerte

Der Effizienzwert für jeden Datenkanal des Myon-Pretrigger-Systems wird nach Gleichung (5.1) berechnet. Jedem Datenkanal entspricht ein MU3-Pad, dessen Position durch die Spaltennummer s und die Padnummer p gekennzeichnet ist. Findet das Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger eine Koinzidenz, wird eine Triggernachricht erzeugt, und die Zahl $\mathrm{N_{sim}}(s,p)$ wird um eins erhöht. Die vom Myon-Pretrigger-System während der Datennahme erzeugten Triggernachrichten werden aus dem FLT-Datenblock ausgelesen. Stimmt eine dieser Nachrichten mit der vom Simulationsprogramm generierten überein, so wird die Zahl $\mathrm{N_{match}}(s,p)$ um eins erhöht. Nach der Prozessierung aller Ereignisse eines Datensatzes wird der Effizienzwert für das Pad mit Spaltennummer s und Padnummer p aus dem Verhältnis der beiden Zahlen bestimmt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass für einen Kanal des Myon-Pretriggers mit einer bekannten Effizienz $\tilde{\varepsilon}$ von N Trefferkoinzidenzen $\mathrm{N_{sel}}$ nachgewiesen werden, ist durch eine Binomialverteilung gegeben als

$$P(\mathrm{N_{sel}}) = \binom{\mathrm{N}}{\mathrm{N_{sel}}} \cdot \tilde{\varepsilon}^{\mathrm{N_{sel}}} \cdot (1-\tilde{\varepsilon})^{\mathrm{N}-\mathrm{N_{sel}}} \ . \tag{5.5}$$

Ist die Effizienz eines Datenkanals unbekannt, so ergibt sich aus einer Messung von $\mathrm{N_{sel}}$ und N ein Schätzwert ε für die Effizienz:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{N_{sel}}}{\mathrm{N}} \ . \tag{5.6}$$

Dies entspricht Gleichung (5.1), wobei $\varepsilon = \varepsilon(s,p)$, $\mathrm{N} = \mathrm{N_{sim}}(s,p)$ und $\mathrm{N_{sel}} = \mathrm{N_{match}}(s,p)$ gilt. Wie in Anhang B dargelegt, wird der Fehler $\sigma_\varepsilon(s,p)$ des Effizienzwertes $\varepsilon(s,p)$ wie folgt bestimmt:

$$\sigma_\varepsilon(s,p) = \sqrt{\frac{\varepsilon(s,p)\cdot(1-\varepsilon(s,p))}{\mathrm{N_{sim}}(s,p)}} \ , \quad \text{für } \varepsilon(s,p) \neq 0,1 \quad \text{und} \tag{5.7}$$

$$\sigma_\varepsilon(s,p) = 1 - 0{,}32^{1/(\mathrm{N_{sim}}(s,p)+1)} \ , \quad \text{für } \varepsilon(s,p) = 0,1 \ . \tag{5.8}$$

Ein Effizienzwert wird nur für Datenkanäle berechnet, für die die Zahl der vom Simulationsprogramm im gesamten Datensatz erzeugten Triggernachrichten eine vorher festgelegte Mindestzahl übersteigt. Der Wertebereich für $\varepsilon(s,p)$ umfasst $\mathrm{N_{sim}}(s,p)+1$ mögliche Effizienzwerte. Für abnehmendes $\mathrm{N_{sim}}(s,p)$ wächst die Differenz zwischen den möglichen Effizienzwerten an. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit, aufgrund statistischer Fluktuationen zu kleine oder zu große Effizienzwerte abzuschätzen. Für einen Kanal mit der wahren Effzienz von 0,99 beträgt z. B. nach Gleichung (5.5) die Wahrscheinlichkeit, bei $\mathrm{N_{sim}}(s,p) = 5$ vier übereinstimmende Nachrichten im FLT-Datenblock zu finden und somit als Schätzwert für die Effizienz des Kanals $0{,}80 \pm 0{,}18$ zu bestimmen, $P(4) \approx 5\,\%$. Liegen $\mathrm{N_{sim}}(s,p) = 10$ von der Simulation erzeugte Triggernachrichten vor, so beträgt die Wahrscheinlichkeit, eine Effizienz von $0{,}80 \pm 0{,}13$ zu bestimmen, $P(8) \approx 0{,}4\,\%$.

Bei der hier vorgestellten Analyse werden deshalb nur für Kanäle Effizienzwerte berechnet, für die das Simulationsprogramm in einem Datensatz mindestens zehn Triggernachrichten erzeugt hat, d. h. für Kanäle, für die gilt:

$$\mathrm{N_{sim}}(s,p) \geq 10 \ . \tag{5.9}$$

5.1.4 Die Ergebnisse für Run 15 424

Zunächst werden die Ergebnisse der Effizienzuntersuchung für Run 15 424 vorgestellt.

Bei der Berechnung der Effizienzwerte bleiben die Datenkanäle außer Betracht, für die

- nicht alle Komponenten der Pretrigger-Elektronik installiert waren,
- wegen des Ausfalls eines LVDS-MUX keine Triggernachrichten an den FLT gesendet werden konnten,

- wegen eines fehlerhaft konfigurierten PLBs die MU4-Daten verzögert wurden, so dass keine mit Teilchendurchgängen korrelierten Koinzidenzen gefunden werden konnten oder
- die optische Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten nicht initialisiert werden konnte oder das MU3-Pad ausmaskiert war, so dass keine Koinzidenzen gefunden werden konnten.

In Abbildung 5.4 ist die Lage dieser Datenkanäle im Pad-System gezeigt. Dabei sind die

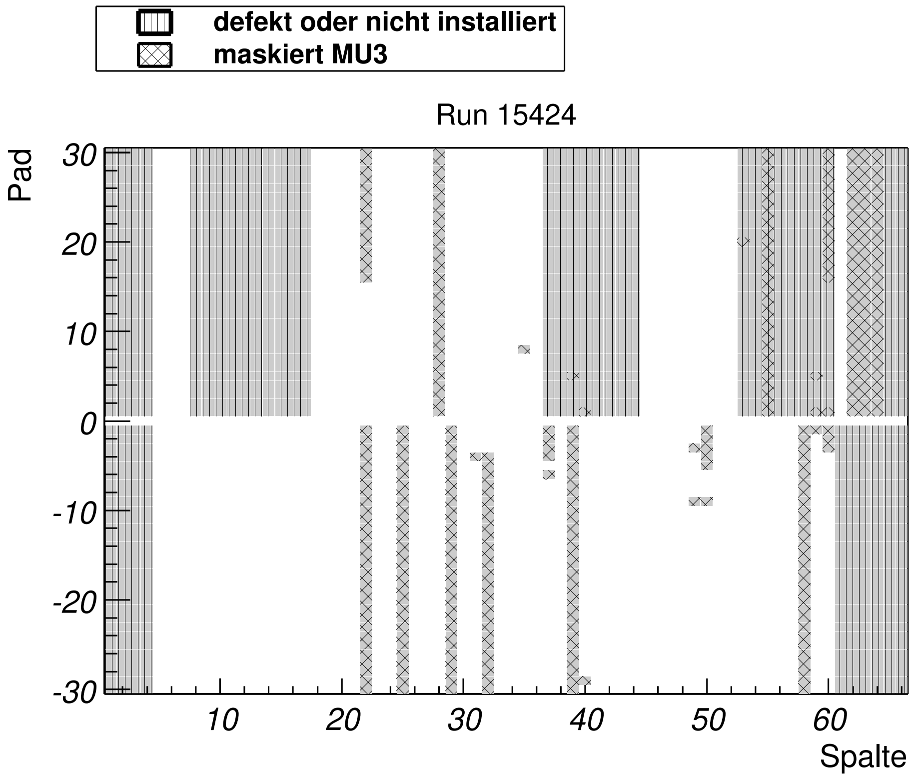


Abbildung 5.4: *Nicht bestückte oder von Defekten betroffene Datenkanäle für Run 15424, für die kein Effizienzwert bestimmt werden kann. Gezeigt sind die Datenkanäle, für die die Pretrigger-Elektronik nicht vollständig installiert war bzw. die von Defekten betroffen waren, so dass keine Triggernachrichten aufgezeichnet werden konnten. Die Bereiche in MU3, die aufgrund heißer Kanäle oder nicht initialisierbarer optischer Verbindungen ausmaskiert waren, sind kreuzweise schraffiert dargestellt.*

Datenkanäle, für die die Pretrigger-Elektronik nicht vollständig installiert war oder die von Hardware-Defekten betroffen waren, als ausgefüllte Bereiche mit einer Längschraffur dargestellt. Die aufgrund von heißen Kanälen oder nicht initialisierbarer optischer Verbindungen ausmaskierten Bereiche in MU3 sind zusätzlich durch eine Kreuzschraffur gekennzeichnet.

Für die übrigen Datenkanäle wird jeweils ein Effizienzwert berechnet, sofern das Simulationsprogramm für den gesamten Datensatz mindestens zehn Koinzidenzen in dem jeweiligen

Kanal findet. Für Datenkanäle, die bekanntermaßen von Fehlfunktionen der Hardware betroffen waren, jedoch nicht gänzlich ausfielen, wird ebenfalls die Effizienz bestimmt. Dies schließt beispielsweise Datenkanäle ein, für die die Überwachungsfunktionen der Online-Software eine fehlerhafte optische Verbindung erkannten. Dadurch, dass diese Kanäle hier mit berücksichtigt werden, ist es möglich zu untersuchen, welchen Einfluss derartige Fehlfunktionen auf die Effizienz der betroffenen Datenkanäle haben.

In Abbildung 5.5 sind die nach Gleichung (5.1) ermittelten Effizienzwerte für einzelne Datenkanäle gezeigt. Der Wertebereich ist in Intervalle unterschiedlicher Länge unterteilt, denen

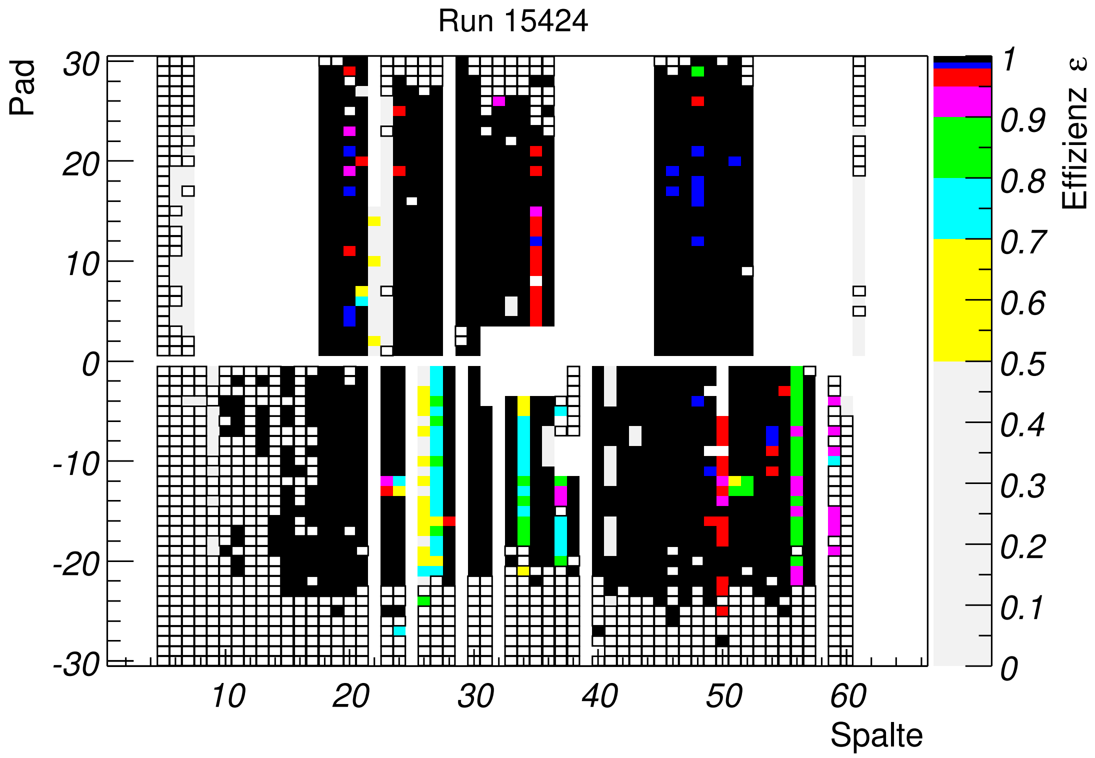


Abbildung 5.5: *Verteilung der Effizienzwerte für Run 15 424. Für die in schwarz dargestellten Pads ist die Effizienz des zugehörigen Datenkanals größer als* 0,99. *Pads, für die das Simulationsprogramm im gesamten Datensatz weniger als zehn Koinzidenzen nachgewiesen hat, sind als offene Rechtecke eingezeichnet.*

verschiedene Farben zugeordnet sind. In der Abbildung sind die Kanäle, für die weniger als zehn Koinzidenzen gefunden worden sind, als offene Rechtecke dargestellt. In Tabelle 5.5 ist zusammengefasst, für wie viele Kanäle ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Die vom defekten LVDS-MUX und dem fehlerhaft konfigurierten PLB betroffenen Kanäle liegen alle in der $+y$-Hälfte. Dadurch ist Zahl der Kanäle, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann, dort geringer als in der $-y$-Hälfte. In Abbildung 5.6 sind die Häufigkeitsverteilungen der Effizienzwerte für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die $+y$-und $-y$-Hälften gezeigt.

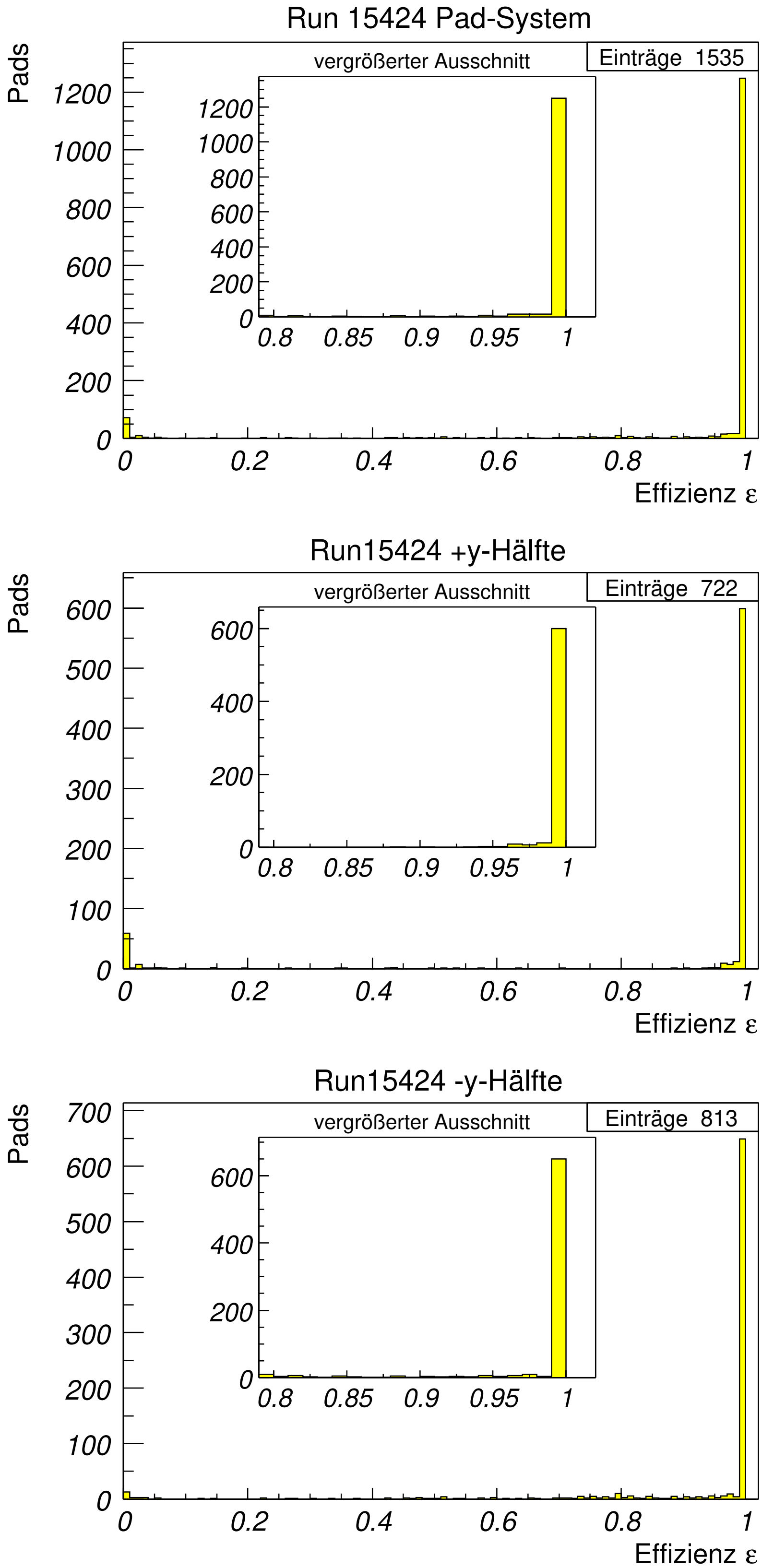


Abbildung 5.6: *Häufigkeitsverteilungen der Effizienzwerte für Run 15 424 für das gesamte Pad-System (oben) sowie für die +y-Hälfte (Mitte) und die −y-Hälfte (unten). In jedem Histogramm ist der Ausschnitt der Effizienzwerte von* 0,8 *bis* 1,0 *vergrößert dargestellt.*

Tabelle 5.5: *Zahl der Datenkanäle für Run 15 424, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Ausgehend von der Gesamtzahl der Datenkanäle ist angegeben, wie viele Kanäle bei der Bestimmung der Effizienz ausgeschlossen werden. Dabei handelt es sich um Kanäle, für die zur Zeit der Datennahme die Pretrigger-Elektronik nicht vollständig installiert war oder die von Hardware-Defekten betroffen waren. Außerdem werden Kanäle, für die weniger als zehn Koinzidenzen durch das Simulationsprogramm gefunden worden sind, ausgeschlossen. Die Zahl der Kanäle, für die ein Effizienzwert ermittelt wird, ist in der letzten Zeile aufgeführt. Die Zahlen sind jeweils für das gesamte Pad-System sowie für die $+y$- und $-y$-Hälften getrennt angegeben.*

Kategorie	gesamt	$+y$	$-y$
Gesamtzahl	3916	1962	1954
nicht installiert oder defekt	1591	1096	495
$\mathrm{N_{sim}} < 10$	790	144	646
Effizienzberechnung	1535 (39,2 %)	722 (36,8 %)	813 (41,6 %)

Aus den Effizienzwerten der einzelnen Datenkanäle werden jeweils für das gesamte Pad-System und zusätzlich getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften Mittelwerte berechnet. Im Folgenden bezeichnet $\varepsilon(s,p)$ den Effizienzwert eines Datenkanals, dem das MU3-Pad mit der Spaltennummer s und der Padnummer p entspricht, und $\sigma_\varepsilon(s,p)$ den Fehler des Effizienzwertes. Dieser wird nach den Gleichungen (5.7) und (5.8) berechnet. Mit B wird ein Bereich des Pad-Systems bezeichnet – das Gesamtsystem oder die $+y$- oder $-y$-Hälfte–, für den ein Mittelwert der Effizienzwerte der Datenkanäle bestimmt wird. Folgende Mittelwerte werden berechnet:

1. Der arithmetische Mittelwert $\bar{\varepsilon}$.
2. Der gewichtete Mittelwert $\bar{\bar{\varepsilon}}$, wobei die nach den Gleichungen (5.7) und (5.8) berechneten Fehler $\sigma_\varepsilon(s,p)$ zur Wichtung verwendet werden:

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \frac{\sum\limits_{(s,p)\in B} \frac{\varepsilon(s,p)}{\sigma_\varepsilon^2(s,p)}}{\sum\limits_{(s,p)\in B} \frac{1}{\sigma_\varepsilon^2(s,p)}} \,. \tag{5.10}$$

3. Der Mittelwert der mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichtsfaktoren $g_{\mathrm{J}/\psi}(s,p)$ skalierten Effizienzwerte:

$$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{J}/\psi} = \frac{\sum\limits_{(s,p)\in B} \varepsilon(s,p)\cdot g_{\mathrm{J}/\psi}(s,p)}{\sum\limits_{(s,p)\in B} g_{\mathrm{J}/\psi}(s,p)} \,. \tag{5.11}$$

In Tabelle 5.6 sind die verschiedenen Mittelwerte für Run 15 424 angegeben. Der arithmetische Mittelwert für das gesamte Pad-System liegt bei $0{,}908 \pm 0{,}007$, wobei der Mittelwert für die

Tabelle 5.6: *Mittelwerte der Effizienz für Run 15 424. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert $\bar{\varepsilon}$ und der gewichtete Mittelwert $\bar{\bar{\varepsilon}}$ der Effizienzwerte der einzelnen Datenkanäle. $\bar{\varepsilon}_{\mathrm{J}/\psi}$ ist der Mittelwert der Effizienz, der sich aus den mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skalierten Effizienzwerte ergibt. Die Mittelwerte sind jeweils für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften aufgeführt.*

	Mittelwert der Effizienz		
Mittelwert	gesamt	$+y$	$-y$
$\bar{\varepsilon}$	$0{,}908 \pm 0{,}007$	$0{,}886 \pm 0{,}011$	$0{,}929 \pm 0{,}007$
$\bar{\bar{\varepsilon}}$	$0{,}996 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}002$	$0{,}995 \pm 0{,}002$
$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{J}/\psi}$	$0{,}930 \pm 0{,}001$	$0{,}953 \pm 0{,}001$	$0{,}908 \pm 0{,}001$

$+y$-Hälfte niedriger ist als für die $-y$-Hälfte. Der gewichtete Mittelwert $\bar{\bar{\varepsilon}}$ für das gesamte Pad-System beträgt $0{,}996 \pm 0{,}001$. Die Mittelung der Effizienzwerte, die mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skaliert wurden, ergibt für das gesamte Pad-System den Wert $\bar{\varepsilon}_{\mathrm{J}/\psi} = 0{,}930 \pm 0{,}001$.

Um die Verteilung der Effizienzwerte über den gesamten Wertebereich zu verdeutlichen, ist in Tabelle 5.7 der Anteil der Datenkanäle angegeben, deren Effizienzwerte oberhalb festgelegter Schwellenwerte liegen. In der $+y$-Hälfte besitzen 11,5 % der Kanäle einen Effizienzwert kleiner

Tabelle 5.7: *Anteil von Datenkanälen mit Effizienzen oberhalb bestimmter Werte für Run 15 424. Angegeben ist jeweils der Anteil der Datenkanäle, deren Effizienzwert oberhalb der angegebenen Schwellenwerte liegt, bezogen auf die Zahl von Kanälen, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Angaben für das gesamte Pad-System und getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften sind aufgeführt.*

Effizienz	Anteil von Datenkanälen in %		
größer als	gesamt	$+y$	$-y$
0,5	91,8	88,5	94,7
0,9	86,2	87,7	84,9
0,95	84,7	87,1	82,5
0,99	81,3	83,0	79,8
0,999	79,3	79,8	78,8

als 0,5, während dies in der $-y$-Hälfte für 5,3 % aller Kanäle zutrifft, für die ein Effizienzwert berechnet worden ist. Für alle weiteren hier aufgeführten Schwellenwerte ist der Anteil der Datenkanäle in der $+y$-Hälfte, die oberhalb des jeweiligen Wertes liegen, größer als in der $-y$-Hälfte.

Der Einfluss fehlerhafter optischer Verbindungen auf die Effizienz von Datenkanälen

Im Folgenden wird dargelegt, inwieweit Datenkanäle mit niedrigen Effizienzwerten durch Hardware-Defekte der optischen Datenübertragung erklärt werden können. Dazu werden Informationen verwendet, die von der Online-Software während der Datennahme gespeichert wurden. Diese Informationen über maskierte Datenkanäle sowie über die Qualität der optischen Datenübertragung werden in Dateien festgehalten. Dabei werden die optischen Verbindungen in verschiedene Kategorien eingeteilt, die wie in Tabelle 5.8 beschrieben definiert sind [Sch 01]. Bei der Simulation des Myon-Pretriggers im Rahmen dieser Analyse zur Effizi-

Tabelle 5.8: *Kategorien zur Einteilung der optischen Verbindungen nach der Fehlerrate R_{Fehler} (nach [Sch 01]). Zusätzlich ist die mittlere Zeit $\bar{t}$ angegeben, in der kein Übertragungsfehler auftritt, wenn die optischen Verbindungen nach jeweils 5 s überprüft werden. Die Verbindungen in der Kategorie INIT_DEFECT können nicht initialisiert werden. Für diese Verbindungen umfasst der größte zusammenhängende Bereich von Werten des DACs (Digital to Analog Converter), der zur Einstellung der Offset-Spannung der optischen Empfängermodule verwendet wird, weniger als 15 Werte.*

Kategorie	Definition	mittlere Zeit ohne Fehler
GOOD	$R_{\mathrm{Fehler}} < 0{,}1\,\%$	$\bar{t} > 83{,}3$ Min.
UNSTABLE	$R_{\mathrm{Fehler}} > 0{,}1\,\%$	$8{,}3$ Min. $< \bar{t} < 83{,}3$ Min.
VERY_UNSTABLE	$R_{\mathrm{Fehler}} > 1\,\%$	$50\,\mathrm{s} < \bar{t} < 8{,}3$ Min.
DEFECT	$R_{\mathrm{Fehler}} > 10\,\%$	$\bar{t} < 50\,\mathrm{s}$
INIT_DEFECT	Offset − Bereich < 15	

enzbestimmung werden zusätzlich zu den heißen diejenigen Datenkanäle ausmaskiert, für die die optischen Verbindungen in die Kategorie INIT_DEFECT eingeordnet waren, also nicht initialisiert werden konnten. Für diese Kanäle konnten keine Trefferdaten übertragen und somit auch keine Koinzidenzen gefunden werden. Fehlerhafte optische Verbindungen, die in die anderen Kategorien eingestuft waren, werden bei der Simulation nicht ausmaskiert. Dies ermöglicht es, den Effekt der unterschiedlichen Fehlerraten bei der optischen Datenübertragung auf die Effizienz der betroffenen Datenkanäle zu untersuchen.

Zur Diskussion der Datenkanäle mit niedriger Effizienz werden zunächst die in Abbildung 5.5 gezeigte Verteilung der Effizienzwerte und die in Abbildung 5.4 dargestellte Verteilung der aufgrund von Defekten außer Betracht gebliebenen Datenkanäle kombiniert. Dies ist in Abbildung 5.7 gezeigt. In der $+y$-Hälfte sind in der Spalte 35 oberhalb des Ausschnitts für das Protonstrahlrohr mehrere Pads zu erkennen, deren Effizienz im Bereich zwischen 0,95 und 0,99 liegt und somit sichtbar niedriger ist als die Effizienz der Pads in den Nachbarspalten. In den Online-Dateien ist die optische Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten für diese Spalte als VERY_UNSTABLE klassifiziert, wobei sie zeitweise in der Kategorie DEFECT eingestuft war. Die optische Verbindung für die MU3-Daten der Spalte 48 war während der Datennahme abwechselnd in die Kategorien VERY_UNSTABLE und UNSTABLE eingeord-

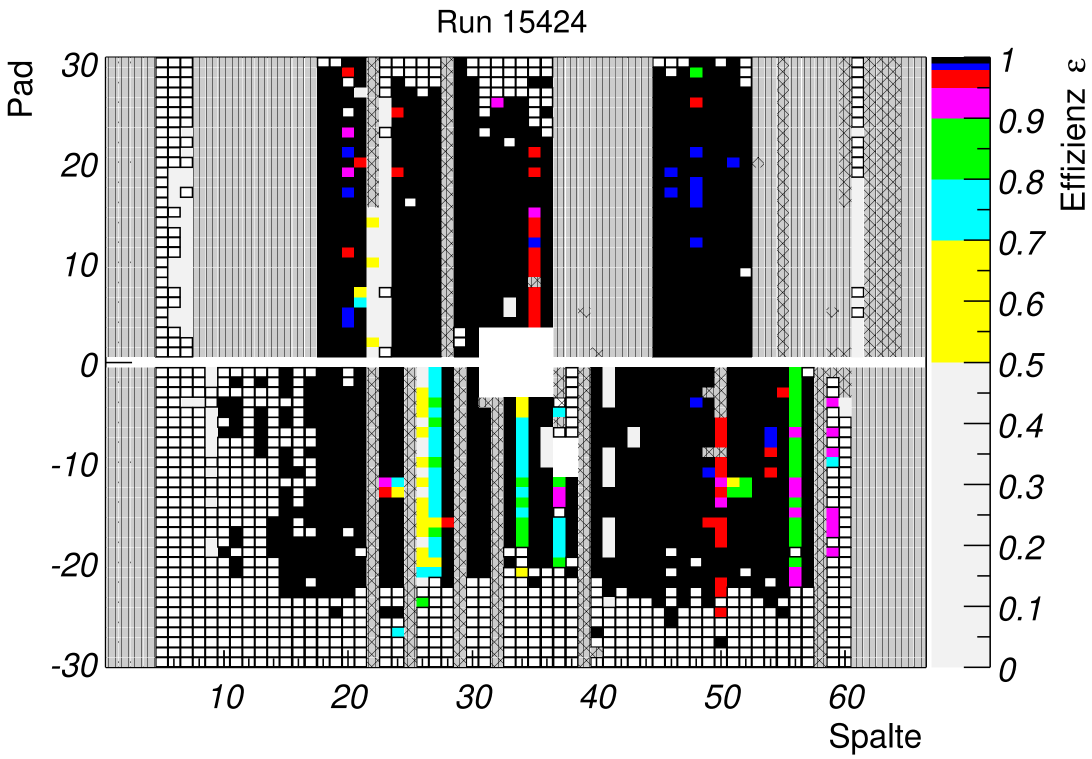


Abbildung 5.7: *Verteilung der Effizienzwerte sowie defekter Datenkanäle für Run 15 424. In dieser Darstellung sind die in Abbildung 5.5 gezeigte Verteilung der Effizienzwerte und die Verteilung der bei Berechnung der Effizienzwerte außer Betracht gebliebenen Datenkanäle überlagert. Die Schraffuren sind in der Legende zu Abbildung 5.4 erklärt.*

net. Einige Pads in dieser Spalte weisen eine Effizienz im Bereich von 0,95 bis 0,99 auf, für den Kanal mit der Padnummer 29 beträgt die Effizienz zwischen 0,8 bis 0,9. Die Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten für die Spalte 46 war zeitweise als UNSTABLE klassifiziert. In dieser Spalte liegt der ermittelte Effizienzwert für zwei Pads zwischen 0,98 und 0,99. Für die Pads in Spalte 61, die nicht wegen einer zu niedrigen Zahl von der Simulation gefundener Koinzidenzen außer Betracht bleiben, wird ein Effizienzwert kleiner als 0,5 bestimmt. In den Online-Dateien ist die optische Verbindung für die MU3-Daten zu Beginn der Datennahme in die Kategorie DEFECT eingeordnet, während der zweiten Hälfte der Datennahme in die Kategorie VERY_UNSTABLE. Zusätzlich waren während der Dauer der gesamten Datennahme die optischen Verbindungen zur Übertragung der MU4-Daten der Spalten 61 und 62 als DEFECT klassifiziert. Dies sind zwei von drei Spalten, aus denen Pads gemäß dem Koinzidenzschema mit MU3-Pads aus Spalte 61 zur Koinzidenzsuche kombiniert werden. Im Randbereich des Pad-Systems trägt aufgrund der Projektivität vor allem die am weitesten außen liegende MU4-Spalte zum Koinzidenzmuster der MU4-Treffer bei. Für die MU3-Spalte 61 ist dies die MU4-Spalte 62.

Für die Kanäle mit Effizienzwerten kleiner als 0,5 in den Spalten 6 und 7 der oberen Hälfte findet sich in den Online-Dateien kein Hinweis auf instabile optische Datenverbindungen. Ebenso sind die niedrigen Effizienzwerte der Kanäle in den Spalten 22 und 23 nicht durch die in den Online-Dateien verzeichneten fehlerhaften optischen Verbindungen zu erklären.

In der $-y$-Hälfte beträgt die Effizienz der betrachteten Pads in Spalte 9 weniger als 0,5. Die optische Verbindung zur Übertragung der Daten der MU4-Spalte 8, die den wichtigsten Beitrag zum MU4-Muster für die Spalte 9 liefert, war als DEFECT klassifiziert. Die Verbindung für die Daten der MU4-Spalte 26 war ebenso während der gesamten Datennahme als DEFECT eingestuft. Die Kanäle der Spalten 26 und 27, die beide Daten der MU4-Spalte 26 verarbeiten, weisen Effizienzwerte kleiner als 0,7 bzw. im Bereich von 0,5 bis 0,9 auf. Die Effizienzwerte der Kanäle in Spalte 50 liegen im Bereich von 0,95 bis 0,98. Die optische Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten war in die Kategorie VERY_UNSTABLE eingestuft. Im Fall der Spalte 56 war die optische Verbindung für die MU3-Daten als DEFECT klassifiziert. Die Effizienzwerte der Kanäle in dieser Spalte liegen zwischen 0,8 und 0,95. Die optische Verbindung für die MU3-Daten der Spalte 59 befand sich in der Kategorie DEFECT. Die Kanäle dieser Spalte weisen eine Effizienz kleiner als 0,95 auf. Auch die optische Übertragungsstrecke für die Daten der MU3-Spalte 60 war als DEFECT klassifiziert. Für die beiden Kanäle in dieser Spalte mit wenigstens zehn vom Simulationsprogramm gefundenen Koinzidenzen ist der Effizienzwert kleiner als 0,5.

In Tabelle 5.9 sind die mittleren Effizienzwerte aufgeführt, die sich ergeben, wenn die Datenkanäle, die von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen waren, nicht betrachtet werden. Das arithmetische Mittel der Effizienzwerte für das gesamte Pad-System steigt dabei

Tabelle 5.9: *Der Effekt fehlerhafter optischer Verbindungen auf die mittleren Effizienzwerte für Run 15 424. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert $\bar{\varepsilon}$ und der gewichtete Mittelwert $\bar{\bar{\varepsilon}}$ der Effizienzwerte der einzelnen Datenkanäle. $\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$ ist der Mittelwert der Effizienz, der sich aus den mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skalierten Effizienzwerten ergibt. In den farbig unterlegten Spalten sind die mittleren Effizienzwerte unter Ausschluss der Kanäle angegeben, die von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen waren. Zum Vergleich sind die Mittelwerte aus Tabelle 5.6 ebenfalls aufgeführt, bei deren Berechnung diese Kanäle mit berücksichtigt wurden. Die Mittelwerte sind jeweils für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften berechnet.*

Mittel-	mit defekten optischen Verbindungen			ohne defekte optische Verbindungen		
wert	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
$\bar{\varepsilon}$	$0{,}908 \pm 0{,}007$	$0{,}886 \pm 0{,}011$	$0{,}929 \pm 0{,}007$	$0{,}946 \pm 0{,}006$	$0{,}899 \pm 0{,}012$	$0{,}989 \pm 0{,}003$
$\bar{\bar{\varepsilon}}$	$0{,}996 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$	$0{,}995 \pm 0{,}002$	$0{,}999 \pm 0{,}001$	$0{,}998 \pm 0{,}002$	$0{,}999 \pm 0{,}001$
$\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$	$0{,}930 \pm 0{,}001$	$0{,}953 \pm 0{,}001$	$0{,}908 \pm 0{,}001$	$0{,}978 \pm 0{,}001$	$0{,}975 \pm 0{,}001$	$0{,}980 \pm 0{,}001$

von $0{,}908 \pm 0{,}007$ auf $0{,}946 \pm 0{,}006$. Für den gewichteten Mittelwert $\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$ ergibt sich ebenfalls ein merklich höherer Wert von $0{,}978 \pm 0{,}001$ im Vergleich zu $0{,}930 \pm 0{,}001$. Dabei steigen jeweils die Mittelwerte für die $-y$-Hälfte durch den Ausschluss der Kanäle deutlich stärker an als für die $+y$-Hälfte. Dies liegt daran, dass in den Spalten sechs und sieben sowie 22 und 23 in der $+y$-Hälfte insgesamt über 40 Datenkanäle mit einer Effizienz kleiner als 0,01 vorliegen. Für diese Kanäle geben die Informationen aus den Online-Dateien keine Hinweise darauf, dass die niedrigen Effizienzwerte durch fehlerhafte optische Verbindungen verursacht wurden.

Die niedrigen Effizienzwerte der Kanäle in den Spalten 34 und 37 unterhalb des Ausschnitts für das Protonstrahlrohr resultieren daraus, dass während der Datennahme die Aufsteckkarten der optischen Empfänger für die Übertragung der MU4-Daten für die Spalten 34 und 36 vertauscht waren. Dies hat keinen Einfluss auf die Effizienz der Datenkanäle in der dazwischenliegenden Spalte 35. Durch das Vertauschen der POL-Empfänger wurden für diese Spalte die MU4L- und MU4R-Beiträge zum MU4-Treffermuster miteinander vertauscht. Da die Nachrichtenparameter $d\xi$ und $dd\xi$, deren Werte vom MU4-Muster abhängen, im transparenten FLT-Modus verändert werden, kann das MU4-Muster bei der Effizienzbestimmung nicht berücksichtigt werden, so dass ein fehlerhaftes MU4-Muster keinen Einfluss auf die hier ermittelten Effizenzwerte hat. Im realen Betrieb mit dem FLT führt ein solcher Fehler jedoch dazu, dass für Koinzidenzen mit einem MU4L- oder MU4R-Beitrag zum Koinzidenzmuster die RoI in MU4 nicht korrekt bestimmt werden kann. Als Folge dessen steigt die Ineffizienz bei der Suche nach dem zur Spur gehörigen Anodendrahttreffer durch die TDU in MU4.

Identifizierung von Hardware-Defekten

Durch eine detaillierte Untersuchung von Datenkanälen mit niedriger Effizienz können Defekte der Hardware des Myon-Pretrigger-Systems identifiziert werden. Dabei handelt es sich um Defekte, die nicht durch die Überwachung der optischen Verbindungen durch die Online-Software erfasst werden. In Abbildung 5.7 fällt in der $-y$-Hälfte in den Spalten 23 und 24 ein Quadrat von vier Datenkanälen auf, deren Effizienz deutlich niedriger als die der Nachbarkanäle ist. Dadurch, dass in beiden Spalten die Pads mit den Nummern 12 und 13 betroffen sind, liegt es nahe anzunehmen, dass die geringen Effizienzwerte durch einen Defekt bei der Verarbeitung der Daten einer MU4-Spalte verursacht werden. Da sowohl für die Pads der Spalte 22 als auch der Spalte 25 keine Effizienzwerte berechnet werden können, ist aus der gezeigten Verteilung der Effizienzwerte kein Hinweis zu entnehmen, welche MU4-Spalte eine defekte Datenübertragung aufweist. Eine genauere Untersuchung der beiden Spalten 23 und 24 führt zu den in Abbildung 5.8 gezeigten Ergebnissen.

Dort ist für beide Spalten jeweils die Ineffizienz

$$1 - \varepsilon(s,p) = \frac{\mathrm{N_{sim}}(s,p) - \mathrm{N_{match}}(s,p)}{\mathrm{N_{sim}}(s,p)} \tag{5.12}$$

für alle Pads der Spalte im links dargestellten Histogramm aufgetragen. Für beide Spalten erweisen sich die Pads -12 und -13 sowie für Spalte 24 auch Pad -27 als ineffizient. In den Histogrammen auf der rechten Seite ist für alle vom Simulationsprogramm gefundenen Nachrichten, für die keine übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock vorliegt, die Verteilung des MU4-Musters und der Padnummer dargestellt. Für Spalte 23 liegen sämtliche dieser Nachrichten in den Pads -12 und -13 und besitzen das MU4-Muster 4. Das hier dezimal dargestellte MU4-Muster entspricht dem Binärwert „100“, was nach der in Abbildung 3.2 gezeigten Definition des MU4-Musters dem MU4R-Beitrag entspricht. Gemäß der Zuordnung der Detektorspalten zu den Koinzidenz-Kanälen des Myon-Pretriggers stellt die MU4-Spalte

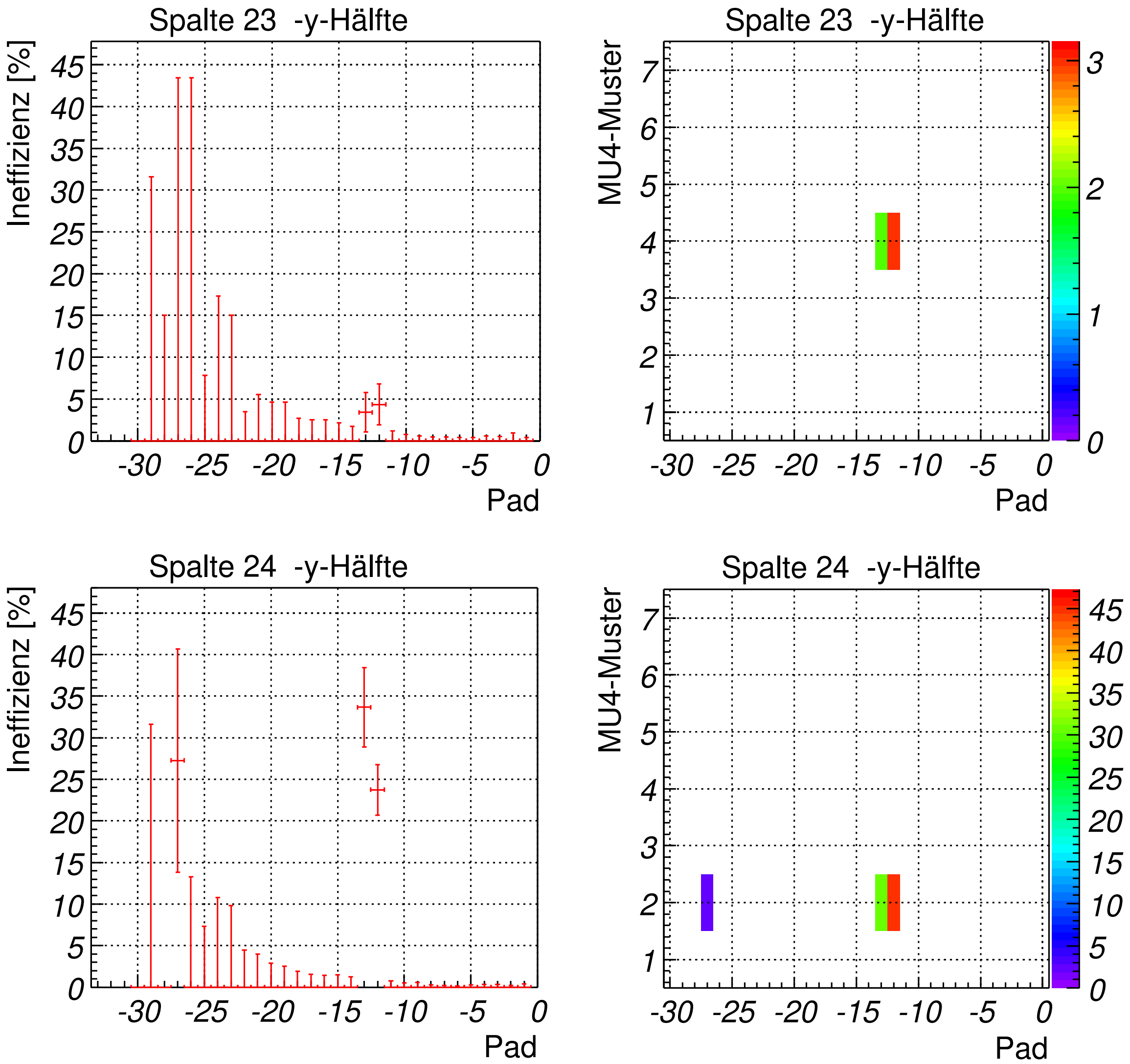


Abbildung 5.8: *Verteilung der Ineffizienzwerte (links) sowie des MU4-Musters (rechts) für die Spalten 23 und 24 der $-y$-Hälfte. Die Ineffizienzwerte sind nach Formel (5.12) berechnet. Die drei Bits des MU4-Musters, MU4R, MU4M und MU4L, werden zu einer Binärzahl zusammengefasst, wobei MU4L das niedrigstwertige Bit darstellt. In der hier verwendeten dezimalen Darstellung des MU4-Musters ergibt sich ein Wertebereich von 1 (binär 001) bis 7 (binär 111).*

24 den MU4R-Beitrag für die MU3-Spalte 23 dar. Die vom Simulationsprogramm berechneten Nachrichten ohne übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock liegen für Spalte 24 in den Pads -12, -13 und -27 und besitzen alle das MU4-Muster 2. Dies entspricht dem MU4M-Beitrag, also der MU4-Spalte 24. Somit zeigt sich durch die Untersuchung der MU4-Muster, dass die Ineffizienz auf einen Defekt in der Verarbeitung der Daten der MU4-Spalte 24 zurückgeht. Dieser Defekt betrifft in beiden Datenzyklen das Datenbit D12 (vgl. Abbildung 3.4), das im ersten Zyklus die Trefferdaten des Pads -12 und im zweiten Zyklus die des Pads -27 überträgt. Aufgrund des Koinzidenzschemas wirkt sich dieser Defekt jeweils auf zwei benachbarte Datenkanäle in einer MU3-Spalte aus, und zwar auf die Pads -12 und -13 im ersten Zyklus sowie -27 und -28 im zweiten. Der Hardware-Defekt kann sich auf dem PLB befinden, ab der Stelle der Datenverarbeitung, an der die FED-Daten in zwei Zyklen aufgespalten werden. Dies schließt mehrere Treiberstufen und den zur Serialisierung der Daten verwendeten Baustein [Mot 97] ein. Der Defekt kann jedoch auch auf dem Teil der PCU lokalisiert sein, der für den Empfang und die Verteilung der Daten zuständig ist. Auch in diesem Fall kommen mehrere Treiberstufen sowie der zur Parallelisierung verwendete Baustein als Fehlerquellen in Betracht.

In den Spalten 51 und 52 der $-y$-Hälfte ist wie in den Spalten 23 und 24 ein Quadrat ineffizienter Pads zu erkennen. Es handelt sich um die Pads -12 und -13. Wie für die Spalten 23 und 24 beschrieben, zeigt eine detaillierte Untersuchung, dass in Spalte 52 sämtliche vom Simulationsprogramm berechneten Nachrichten, für die keine übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock vorhanden ist, das MU4-Muster 2 aufweisen und in Spalte 51 das MU4-Muster 1. Die beobachtete Ineffizienz wird wie für die Spalten 23 und 24 durch eine fehlerhafte Übertragung des Datenbits D12 für die MU4-Spalte 52.

Die für die Kanäle in Spalte 41 in der $-y$-Hälfte ermittelten Effizienzwerte sind deutlich unterschiedlich und zeigen ein regelmäßiges Muster. In Abbildung 5.9 ist die Ineffizienz für alle Pads dieser Spalte aufgetragen. Für die ersten vier Pads – Padnummern -1 bis -4 – beträgt die Ineffizienz 85 % bis über 90 %, die nächsten vier Pads sind vollständig effizient. Es folgen wieder vier Pads mit hoher Ineffizienz und schließlich drei vollständig effiziente am Ende des ersten Zyklus, also bis einschließlich Padnummer -15. Diese Abfolge sich abwechselnder Gruppen von vier ineffizienten und vier vollständig effizienten Pads wiederholt sich im zweiten Zyklus. Es wird nun gezeigt, wie anhand des beobachteten Musters der verursachende Hardware-Defekt lokalisiert werden kann. Die Daten werden auf dem PLB in zwei Zyklen aufgespalten, dadurch betreffen Hardware-Defekte nach dieser Aufspaltung häufig beide Zyklen in gleicher Weise. Die Daten innerhalb eines Zyklus werden – abgesehen von der seriellen optischen Übertragungsstrecke – parallel in verschiedenen elektronischen Bauteilen verarbeitet, d. h. die verschiedenen Datenbits durchlaufen unterschiedliche Kanäle der jeweiligen Bauteile. Um das beobachtete Muster der Effizienzwerte innerhalb der Zyklen erklären zu können, müssten an den elektronischen Bauteilen defekte Kanäle nach dem gleichen Muster vorliegen, d. h. die Kanäle, über die die Daten der ineffizienten Pads übertragen werden, müssten defekt sein und die Kanäle, die den effizienten Pads entsprechen, müssten fehlerfrei arbeiten. Ein Hardware-Defekt dieser Art eines Bauteils auf dem PLB oder auf der PCU vor dem Koinzidenz-CPLD ist sehr unwahrscheinlich. Der Defekt muss auf einem Koinzidenz-Kanal der PCU lokalisiert sein, da ab der Datenschnittstelle zum PMG die Daten von acht Koinzidenz-Kanälen über dieselben Datenleitungen und elektronischen Bauteile geleitet werden. Bei einem Hardware-Defekt nach der Datenschnittstelle zwischen PCU und PMG wären folglich alle Koinzidenz-Kanäle gleichermaßen betroffen. Nach dem Koinzidenz-CPLD durchlaufen die Koinzidenzdaten die

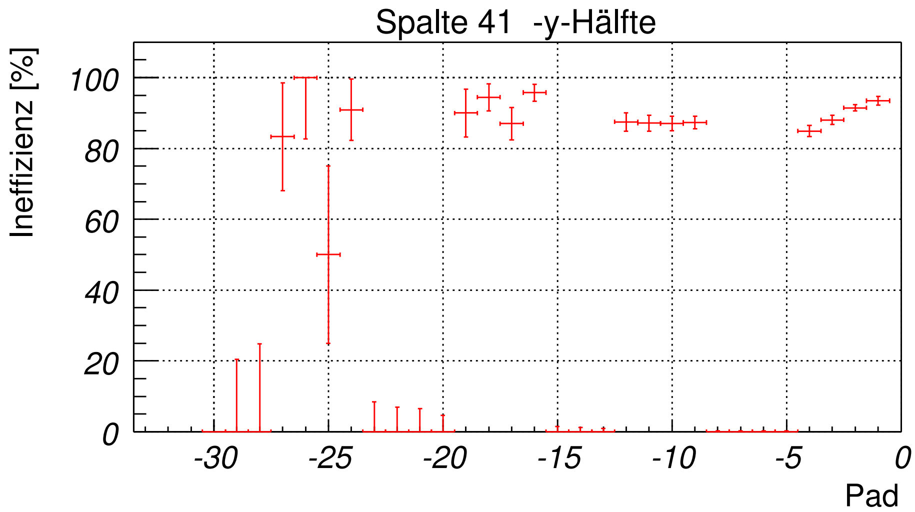


Abbildung 5.9: *Ineffizienzwerte für die Kanäle der Spalte 41 in der $-y$-Hälfte. Die Ineffizienzwerte sind nach Formel (5.12) berechnet.*

Auffang- und Serialisierungs-FIFOs, bevor sie zum PMG übertragen werden. Die Koinzidenzdaten, deren Format in Tabelle 3.1 aufgeführt ist, beschreiben die Position des MU3-Pads einer Koinzidenz durch vier Adressbits und ein Zyklusbit, das die beiden Zyklen voneinander unterscheidet. Das beobachtete Muster ineffizienter und vollständig effizienter Pads kann durch ein fehlerhaftes Adressbit in der Koinzidenzadresse erklärt werden. Um den Effekt dieses Fehlers zu verdeutlichen, ist in Tabelle 5.10 für alle 15 Pads eines Zyklus der jeweilige Wert aller vier Bits der Koinzidenzadresse dargestellt. Jede Zeile entspricht einem der vier Adressbits, wobei in der ersten Zeile das niedrigstwertige Adr[0] angegeben ist. Die Zeile für Adr[2] der Koinzidenzadresse ist farbig unterlegt. Dieses Bit war für alle Koinzidenzadressen, d. h. für alle Pads der Spalte, stets auf den logischen Wert „1“ gesetzt. Für die dunkel dargestellten Pads, für die Adr[2] der Koinzidenzadresse den Wert „0“ besitzen muss, führte dies zu einer fehlerhaften Koinzidenzadresse. Für die Pads, für die Adr[2] der Koinzidenzadresse den korrekten Wert „1“ besitzt, macht sich der Hardware-Fehler nicht bemerkbar. Für eine fehlerhafte Koinzidenzadresse wird auch der Wert des Nachrichtenparameters η, der die y-Position des MU3-Pads einer Koinzidenz beschreibt, falsch bestimmt und gibt nicht die Position der Koinzidenz wieder. Bei der hier verwendeten Methode zur Effizienzbestimmung wird wie zuvor beschrieben eine Übereinstimmung der Parameter ξ und η für die Triggernachrichten verlangt, die von der Simulation erzeugt bzw. aus dem FLT-Datenblock ausgelesen werden. Ein fehlerhaft bestimmter η-Wert der aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Nachrichten des Myon-Pretrigger-Systems führt zur beobachteten Ineffizienz der betroffenen Datenkanäle. Das fehlerhaft gesetzte Bit Adr[2] der Koinzidenzadresse kann entweder durch einen Defekt des Serialisierungs- oder wenigstens eines der Auffang-FIFOs verursacht werden. Da sämtliche Koinzidenzdaten vor der Übertragung zum PMG das Serialisierungs-FIFO durchlaufen, wäre eine vollständige Ineffizienz der vom Fehler betroffenen Datenkanäle zu erwarten. Die beobachtete große, jedoch nicht vollständige Ineffizienz der Datenkanäle könnte auf eine nicht permanent vorhandene Fehlfunktion des Serialisierungs-FIFOs zurückzuführen sein. Unter-

Tabelle 5.10: *Binärwerte der Koinzidenzadressen für die Pads des ersten Zyklus. In der ersten Zeile ist die Padnummer angegeben. Für jedes Pad sind die Werte der vier Bits der Koinzidenzadresse angegeben. Adr[0] bezeichnet das niedrigstwertige Bit der Koinzidenzadresse. Die Koinzidenzadressen für den zweiten Zyklus ergeben sich, indem man zu den angegebenen Padnummern 15 hinzuaddiert. Die Zeile für Adressbit Adr[2] ist hervorgehoben. Im Text ist erläutert, wie durch ein fehlerhaft gesetztes Bit Adr[2] die Ineffizienz von Datenkanälen in Spalte 41 der* $-y$*-Hälfte erklärt werden kann.*

Pad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Adr[0]	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Adr[1]	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
Adr[2]	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Adr[3]	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1

suchungen der Hardware nach Ende der Datennahme ergaben, dass das erste Auffang-FIFO defekt war und das fehlerhaft gesetzte Bit der Koinzidenzadresse verursachte [Kol 01]. Dies erklärt auch, warum die vom Bitfehler betroffenen Datenkanäle nicht vollständig ineffizient waren. In einem Zyklus kann der Koinzidenz-CPLD bis zu fünf Koinzidenzdatensätze ausgeben und geordnet nach ihrem Abstand zum Protonstrahlrohr in die fünf Auffang-FIFOs schreiben. Dabei wird die dem Protonstrahlrohr am nächsten liegende Koinzidenz in das erste Auffang-FIFO geschrieben, das die fehlerhaften Koinzidenzadressen verursachte. Wurden die Koinzidenzdaten für ein von dem Fehler betroffenes Pad nicht in das erste Auffang-FIFO ausgegeben, weil im selben Zyklus mindestens eine weitere, näher am Protonstrahlrohr liegende Koinzidenz vorlag, so wurde die Koinzidenzadresse nicht verfälscht. Der aus der Koinzidenzadresse bestimmte Wert des Nachrichtenparameters η beschreibt in diesem Fall die tatsächliche y-Position der Koinzidenz.

5.1.5 Die Ergebnisse für Run 17 04x

Für Run 17 04x werden für solche Datenkanäle keine Effizienzwerte berechnet, für die bekannt ist, dass dort keine Koinzidenzen gefunden und somit keine Triggernachrichten erzeugt werden können. Es handelt sich dabei um Kanäle, für die

- wegen eines fehlerhaft konfigurierten PLBs die MU4-Daten gegenüber den MU3-Daten verzögert wurden, so dass keine mit Teilchendurchgängen korrelierten Koinzidenzen gefunden werden konnten oder
- die optische Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten nicht initialisiert werden konnte oder das MU3-Pad ausmaskiert war, so dass keine Koinzidenzen gefunden werden konnten.

In Abbildung 5.10 ist die Position dieser Datenkanäle im Pad-System gezeigt. Die Datenkanäle mit den beschriebenen Hardware-Defekten sind als ausgefüllte Bereiche dargestellt.

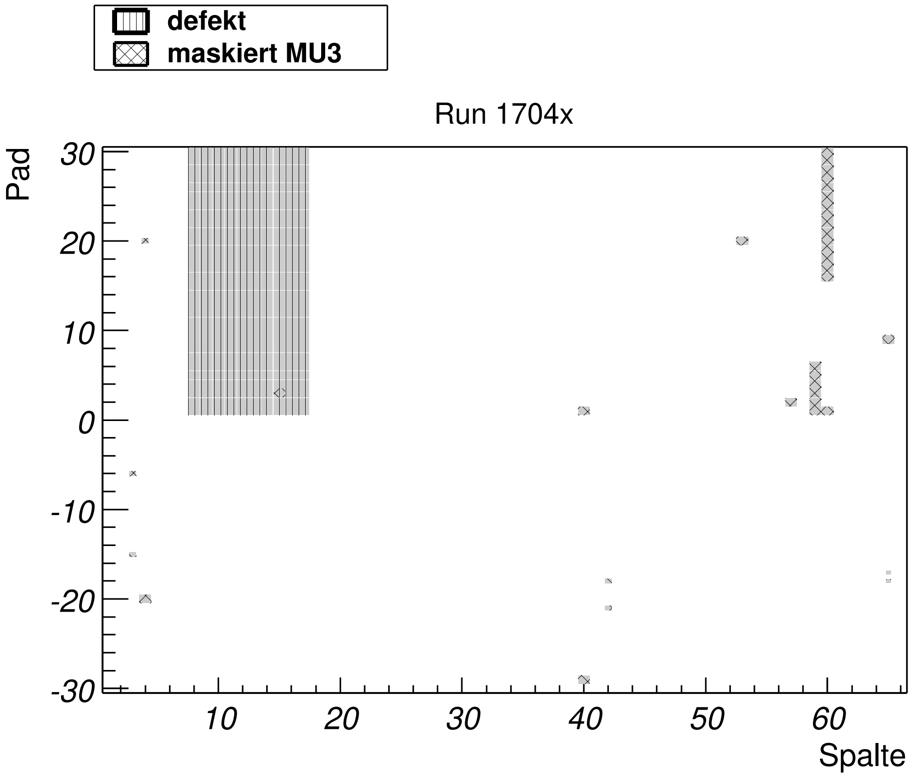


Abbildung 5.10: *Von Defekten betroffene Datenkanäle für Run 1704x, für die keine Effizienzwerte bestimmt werden können. Gezeigt sind die Datenkanäle, die von Defekten betroffen waren, so dass keine Triggernachrichten aufgezeichnet werden konnten. Die Bereiche in MU3, die aufgrund heißer Kanäle ausmaskiert waren, sind kreuzweise schraffiert dargestellt.*

Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Spalten 8 bis 17 in der $+y$-Hälfte, die von der fehlerhaften Konfiguration des PLBs betroffen waren. Die aufgrund heißer Kanäle ausmaskierten Bereiche in MU3 sind zusätzlich durch eine Schraffur gekennzeichnet. Im Gegensatz zu Run 15 424 konnten sämtliche optischen Verbindungen für alle MU3-Spalten initialisiert werden. In Tabelle 5.11 ist aufgeführt, für wie viele Kanäle ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Im Vergleich zu Run 15 424 ist die Zahl defekter bzw. nicht installierter Kanäle deutlich geringer. Der Anteil dieser Kanäle beträgt 8,5 %, während er für Run 15 424 bei 40,6 % liegt. In der $+y$-Hälfte gehen von den 325 defekten Kanälen 300 auf die fehlerhafte PLB-Konfiguration zurück. Die acht defekten Kanäle in der $-y$-Hälfte entsprechen ungewichtet einem Anteil von 0,4 %, bzw. gewichtet mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten einem Anteil von 0,1 % aller Datenkanäle in der unteren Hälfte. Die Zahl der Kanäle, für die das Simulationsprogramm weniger als zehn Koinzidenzen findet und daher kein Effizienzwert berechnet wird, ist gegenüber dem zum früheren Zeitpunkt aufgezeichneten Datensatz gestiegen. Dies liegt daran, dass in der Zeit zwischen den beiden Datennahmen die Installation aller Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems abgeschlossen worden war. Dadurch sind die am weitesten außen liegenden Spalten des Pad-Systems sowohl in der $+y$- als auch $-y$-Hälfte

Tabelle 5.11: *Zahl der Datenkanäle für Run 17 04x, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Ausgehend von der Gesamtzahl der Datenkanäle ist zunächst angegeben, wie viele Kanäle bei der Bestimmung der Effizienz ausgeschlossen werden. Dies sind zum einen Kanäle, die aufgrund von Hardware-Defekten während der Datennahme vollständig ausfielen, und zum anderen Kanäle, für die weniger als zehn Koinzidenzen durch das Simulationsprogramm gefunden worden sind. Die Zahl der Kanäle, für die ein Effizienzwert ermittelt wird, ist in der letzten Zeile aufgeführt. Die Zahlen sind jeweils für das gesamte Pad-System sowie getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften angegeben.*

Kategorie	gesamt	$+y$	$-y$
Gesamtzahl	3916	1962	1954
defekt	333	325	8
$N_{sim} < 10$	986	293	693
Effizienzberechnung	2597 (66,3 %)	1344 (68,5 %)	1253 (64,1 %)

hinzugekommen. Für die Mehrzahl der Kanäle in diesen Spalten werden vom Simulationsprogramm weniger als zehn Koinzidenzen im gesamten Datensatz gefunden.

In Abbildung 5.11 sind die Effizienzwerte für einzelne Datenkanäle gezeigt. Der Wertebereich ist in der gleichen Weise wie für Run 15 424 in unterschiedlich lange Intervalle unterteilt, die durch verschiedene Farben gekennzeichnet sind. Kanäle mit weniger als zehn Koinzidenzen sind als offene Rechtecke dargestellt. In Abbildung 5.12 sind die Häufigkeitsverteilungen der Effizienzwerte für das gesamte Pad-System sowie getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften gezeigt. Beide Abbildungen lassen erkennen, dass sich die ermittelten Effizienzwerte für die Datenkanäle der $+y$-Hälfte deutlich von den Werten der Kanäle in der $-y$-Hälfte unterscheiden. In der oberen Hälfte besitzen deutlich weniger Kanäle als in der unteren eine Effizienz größer als 0,99. Viele Kanäle in der oberen Hälfte weisen einen Effizienzwert zwischen 0,95 und 0,99 auf. Ergebnisse einer Untersuchung zu den Ursachen der unterschiedlichen Effizienzwerte werden in Abschnitt 5.1.6 präsentiert. Zunächst werden die gemittelten Effizienzwerte für Run 17 04x angegeben. Diese sind in Tabelle 5.12 zusammengefasst. Das arithmetische Mittel der Effizienzwerte für das gesamte Pad-System beträgt $0{,}953 \pm 0{,}003$. Der arithmetische Mittelwert für die $+y$-Hälfte liegt mit $0{,}959 \pm 0{,}003$ höher als der entsprechende Wert für die $-y$-Hälfte, der $0{,}946 \pm 0{,}005$ beträgt. In der oberen Hälfte besitzen, wie bereits beschrieben, viele Kanäle eine Effizienz zwischen 0,95 und 0,99. In der unteren Hälfte liegen die Effizienzwerte der Datenkanäle in den Spalten 17 und 18 sowie in Spalte 26 unterhalb von 0,7.

In Tabelle 5.13 ist angegeben, für welchen Anteil der Datenkanäle die Effizienz oberhalb von verschiedenen Schwellenwerten liegt. Der Anteil der Datenkanäle mit einer Effizienz oberhalb von 0,5 bzw. oberhalb von 0,9 ist in der $+y$-Hälfte höher als in der $-y$-Hälfte. Bei den höheren Effizienzwerten überwiegt der Anteil der Kanäle in der $+y$-Hälfte. Während in der $-y$-Hälfte die ermittelte Effizienz für 5,9 % der Kanäle im Bereich zwischen 0,95 und 0,99 liegt, trifft dies in der $+y$-Hälfte für 53,9 % zu. Einen Effizienzwert oberhalb von 0,999 weisen in der $-y$-Hälfte 63,1 % der Kanäle auf, in der $+y$-Hälfte sind dies nur 24,0 %.

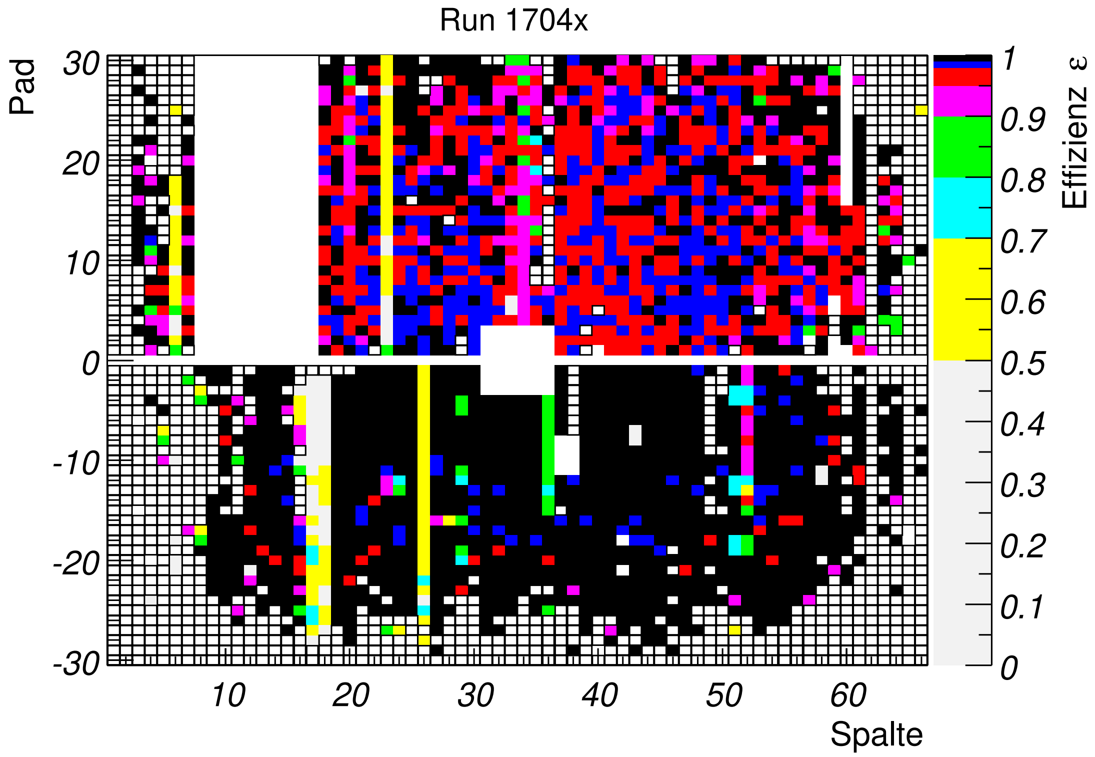


Abbildung 5.11: *Verteilung der Effizienzwerte für Run 1704x. Der Wertebereich für die Effizienzwerte ist in Intervalle unterschiedlicher Länge eingeteilt, denen verschiedene Farben zugeordnet sind. Für die in schwarz dargestellten Pads, ist die Effizienz des zugehörigen Datenkanals größer als* 0,99. *Pads, für die das Simulationsprogramm im gesamten Datensatz weniger als zehn Koinzidenzen nachgewiesen hat, sind als offene Rechtecke eingezeichnet.*

Der Einfluss fehlerhafter optischer Verbindungen auf die Effizienz von Datenkanälen

Nachfolgend wird gezeigt, dass sich wie im Fall des ersten Datensatzes auch für Run 17 04x die niedrigen Effizienzwerte einiger Datenkanäle mit Fehlfunktionen der optischen Datenübertragung in Verbindung bringen lassen. Dazu werden die Informationen über die Qualität der optischen Verbindungen aus den von der Online-Software während der Datennahme erzeugten Dateien verwendet. In Abbildung 5.13 ist die Verteilung der Effizienzwerte mit der Verteilung der von Defekten betroffenen Datenkanäle kombiniert dargestellt.

In der $+y$-Hälfte waren die folgenden Spalten von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen:

- Die optische Verbindung zur Übertragung der MU3-Daten für Spalte 23 war während der gesamten Datennahme als DEFECT klassifiziert. Die Effizienzwerte der Datenkanäle in dieser Spalte liegen zwischen 0,5 und 0,7, für einige der Kanäle auch unter 0,5.

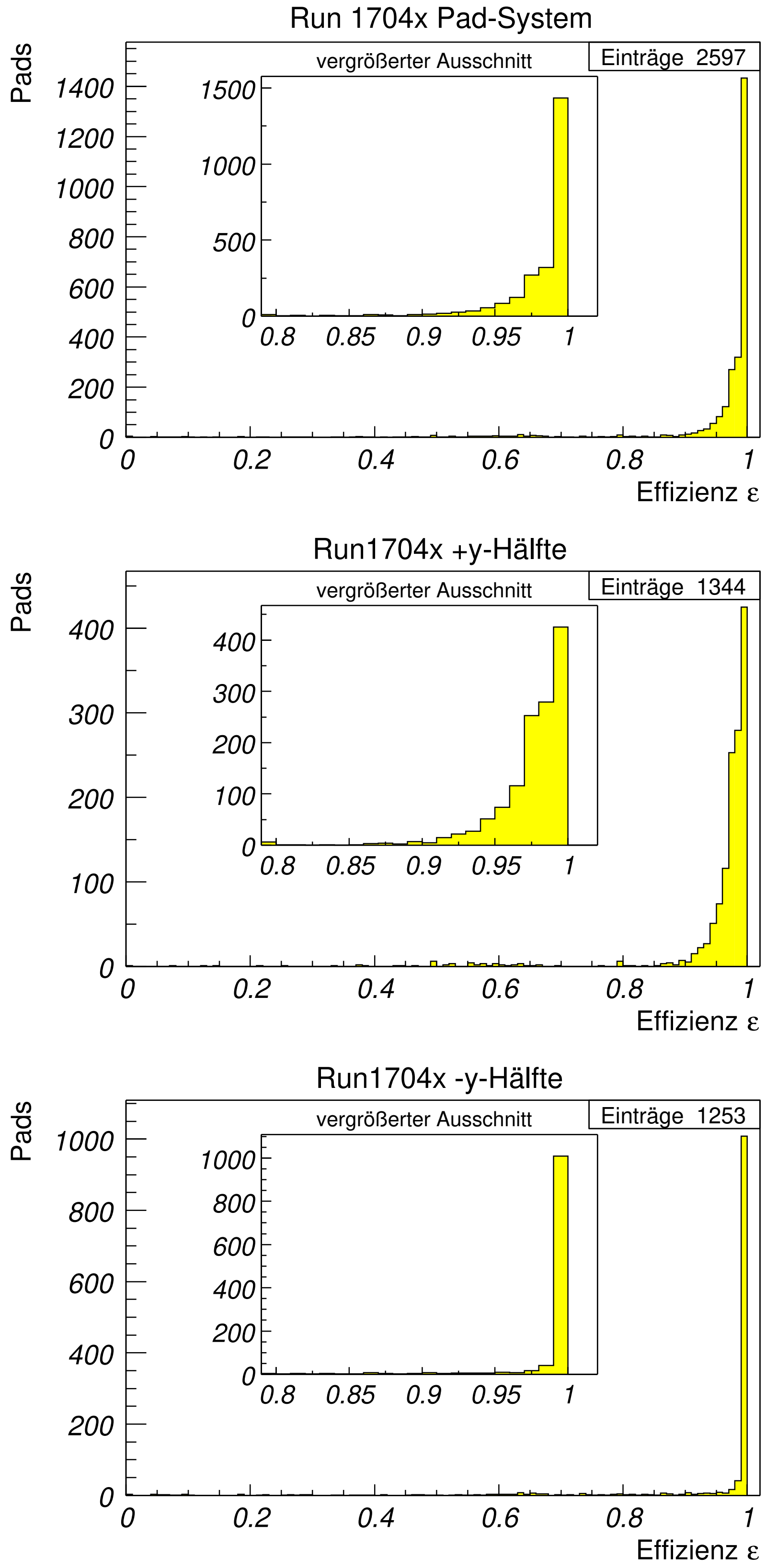


Abbildung 5.12: *Häufigkeitsverteilungen der Effizienzwerte für Run 1704x für das gesamte Pad-System (oben) sowie für die +y-Hälfte (Mitte) und die −y-Hälfte (unten). In jedem Histogramm ist der Ausschnitt der Effizienzwerte von* 0,8 *bis* 1,0 *vergrößert dargestellt.*

Tabelle 5.12: *Mittelwerte der Effizienz für Run 17 04x. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert* $\bar{\varepsilon}$ *und der gewichtete Mittelwert* $\bar{\bar{\varepsilon}}$ *der Effizienzwerte der einzelnen Datenkanäle.* $\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$ *ist der Mittelwert, der sich aus den Effizienzwerten ergibt, die mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skaliert wurden. Die Mittelwerte sind jeweils für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die +y- und −y-Hälften angegeben.*

	Mittelwert der Effizienz		
Mittelwert	gesamt	$+y$	$-y$
$\bar{\varepsilon}$	$0{,}953 \pm 0{,}003$	$0{,}959 \pm 0{,}003$	$0{,}946 \pm 0{,}005$
$\bar{\bar{\varepsilon}}$	$0{,}995 \pm 0{,}001$	$0{,}981 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$
$\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$	$0{,}959 \pm 0{,}001$	$0{,}952 \pm 0{,}001$	$0{,}966 \pm 0{,}001$

Tabelle 5.13: *Anteil von Datenkanälen oberhalb bestimmter Effizienzwerte für Run 17 04x. Angegeben ist jeweils der Anteil der Datenkanäle, deren Effizienz oberhalb der angegebenen Werte liegt, bezogen auf die Gesamtzahl von Kanälen, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Es finden sich Angaben für das gesamte Pad-System und getrennt für die +y- und −y-Hälften.*

Effizienz	Anteil von Datenkanälen in %		
größer als	gesamt	$+y$	$-y$
0,5	97,7	98,8	96,5
0,9	91,8	94,6	88,7
0,95	86,0	85,6	86,4
0,99	55,3	31,7	80,5
0,999	42,9	24,0	63,1

- Die optische Verbindung für die MU4-Daten der Spalte 34 war während der Datennahme in die Kategorie DEFECT eingeordnet. Die Verbindung zur Übertragung der Daten der benachbarten MU4-Spalte 33 war in der Mitte des Runs als UNSTABLE und gegen Ende des Runs als DEFECT klassifiziert. Von diesen Fehlfunktionen waren die Datenkanäle in den Spalten 33 bis 35 oberhalb des Ausschnitts für das Protonstrahlrohr betroffen. Die meisten der Kanäle in Spalte 34 weisen eine Effizienz kleiner als 0,95 auf, für einige ist die ermittelte Effizienz kleiner als 0,9.

- Weitere optische Verbindungen in der $+y$-Hälfte sind als fehlerhaft in den Online-Dateien verzeichnet. Diese befinden sich teilweise in dem Bereich, der wegen des fehlkonfigurierten PLBs bei der Bestimmung der Effizienzwerte nicht berücksichtigt wird. Für andere fehlerhafte Verbindungen ist kein Effekt auf die Effizienzwerte der Datenkanäle zu erkennen. So ist beispielsweise die optische Übertragungstrecke für die MU3-Daten der Spalte 46 für etwa die Hälfte des Runs als VERY_UNSTABLE bzw. UNSTABLE

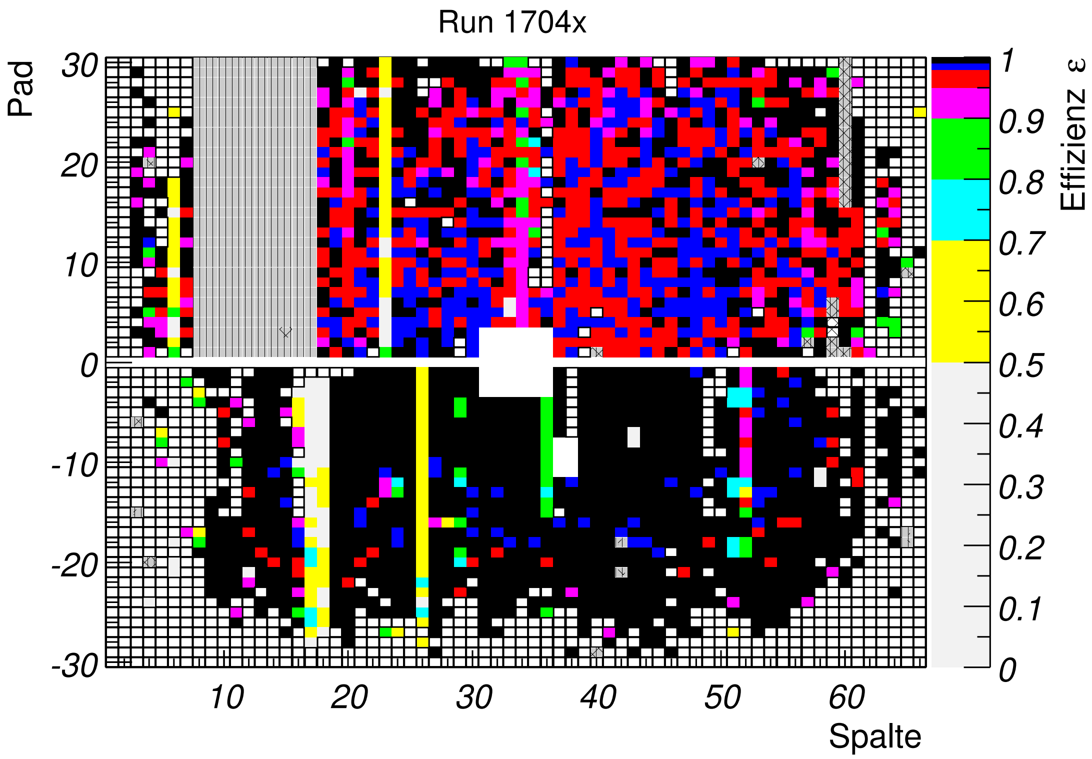


Abbildung 5.13: *Verteilung der Effizienzwerte sowie defekter Datenkanäle für Run 1704x. In dieser Darstellung sind die in Abbildung 5.11 gezeigte Verteilung der Effizienzwerte und die Verteilung der bei Berechnung der Effizienzwerte außer Betracht gebliebenen Datenkanäle überlagert. Die Schraffuren sind in der Legende zu Abbildung 5.10 erklärt.*

eingestuft. Die Effizienzwerte der Kanäle in dieser Spalte unterscheiden sich nicht von den Werten der Kanäle in benachbarten Spalten.

Anhand der Informationen aus den Online-Dateien gibt es keine Hinweise dafür, dass die niedrigen Effizienzwerte der Kanäle in Spalte 6 durch eine fehlerhafte optische Datenübertragung verursacht wurden.

In der $-y$-Hälfte wirkten sich fehlerhafte optische Verbindungen auf die folgenden Spalten aus:

- Die POL-Verbindung für die MU4-Daten der Spalte 17 war während der gesamten Datennahme in die Kategorie DEFECT eingeordnet. Zeitweise war auch die Verbindung zur Übertragung der MU4-Daten der Nachbarspalte 16 als VERY_UNSTABLE bzw. UNSTABLE klassifiziert. Durch die Verteilung der Daten der MU4-Spalten auf mehrere Koinzidenz-Kanäle sind die Datenkanäle der Spalten 15 bis 18 von diesen Defekten betroffen. Aufgrund der Projektivität trägt in diesem Bereich des Detektors vor allem die relativ zur MU3-Spalte weiter außen liegende MU4-Spalte zum Koinzidenzmuster bei. Daher wirken sich die Defekte der optischen Verbindungen vorwiegend auf die Datenkanäle der Spalten 17 und 18 aus, die Effizienzwerte kleiner als 0,8 und teilweise kleiner als 0,5 aufweisen.

- Die übrigen in den Online-Dateien als fehlerhaft verzeichneten optischen Verbindungen betrafen u. a. Spalten im Randbereich des Pad-Systems, für die keine Effizienzwerte bestimmt werden, da weniger als zehn Koinzidenzen pro Datenkanal vom Simulationsprogramm gefunden werden. Andere Kanäle, für die die optischen Verbindungen zeitweise als VERY_UNSTABLE bzw. UNSTABLE gekennzeichnet waren, weisen Effizienzwerte auf, die sich nicht von denen der Kanäle in Nachbarspalten unterscheiden.

In den Online-Dateien finden sich keine Hinweise dafür, dass niedrige Effizienzwerte in weiteren Datenkanälen in der $-y$-Hälfte, z. B. in den Spalten 26 und 36 und 52, auf Fehler in der optischen Datenübertragung zurückzuführen sind.

Werden die Datenkanäle, die von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen waren, bei der Berechnung der mittleren Effizienzwerte nicht berücksichtigt, so ergeben sich die in Tabelle 5.14 aufgeführten Werte. Das arithmetische Mittel der Effizienzwerte für das gesamte Pad-

Tabelle 5.14: *Der Effekt fehlerhafter optischer Verbindungen auf die mittleren Effizienzwerte für Run 17 04x. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert $\bar{\varepsilon}$ und der gewichtete Mittelwert $\bar{\bar{\varepsilon}}$ der Effizienzwerte der einzelnen Datenkanäle. $\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$ ist der Mittelwert der Effizienz, der sich aus den mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skalierten Effizienzwerten ergibt. In den farbig unterlegten Spalten sind die mittleren Effizienzwerte unter Ausschluss der Kanäle angegeben, die von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen waren. Zum Vergleich sind die Mittelwerte aus Tabelle 5.12 ebenfalls aufgeführt, bei deren Berechnung diese Kanäle mit berücksichtigt wurden. Die Mittelwerte sind jeweils für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften berechnet.*

Mittel-	mit defekten optischen Verbindungen			ohne defekte optische Verbindungen		
wert	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
$\bar{\varepsilon}$	$0{,}953 \pm 0{,}003$	$0{,}959 \pm 0{,}003$	$0{,}946 \pm 0{,}005$	$0{,}973 \pm 0{,}002$	$0{,}972 \pm 0{,}002$	$0{,}975 \pm 0{,}003$
$\bar{\bar{\varepsilon}}$	$0{,}995 \pm 0{,}001$	$0{,}981 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}002$	$0{,}996 \pm 0{,}001$	$0{,}984 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$
$\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$	$0{,}959 \pm 0{,}001$	$0{,}952 \pm 0{,}001$	$0{,}966 \pm 0{,}001$	$0{,}977 \pm 0{,}001$	$0{,}981 \pm 0{,}001$	$0{,}974 \pm 0{,}001$

System steigt von $0{,}953 \pm 0{,}003$ auf $0{,}973 \pm 0{,}002$ an.

Identifizierung von Hardware-Defekten

Auch für den Datensatz 17 04x ergeben sich durch eine detaillierte Untersuchung von Kanälen mit niedrigen Effizienzwerten Hinweise auf Hardware-Defekte innerhalb des Myon-Pretrigger-Systems.

- In den Spalten 23 und 24 der $-y$-Hälfte besitzen die Datenkanälen mit den Padnummern -12 und -13 niedrige Effizienzwerte, die für die Kanäle in Spalte 23 im Bereich von 0,90 bis 0,95 und für die Kanäle in Spalte 24 zwischen 0,70 und 0,90 liegen. Ferner zeigen die Kanäle mit der Padnummer -27 für beide Spalten ebenfalls niedrige Effizienzwerte. Eine detaillierte Untersuchung ergibt, dass es sich dabei um die gleiche Fehlfunktion handelt, die bereits während der ersten Datennahme zur Effizienzbestimmung vorlag. Wie dort erläutert, werden die niedrigen Effizienzwerte durch eine fehlerhafte Übertragung des Datenbits D12 der MU4-Spalte 24 verursacht.

- In den Spalten 51 und 52 der $-y$-Hälfte sind mehrere Quadrate ineffizienter Pads zu erkennen. Es handelt sich um die Datenkanäle mit den Padnummern -3 und -4 sowie -12 und -13 für den ersten Zyklus. Im zweiten Zyklus sind die Kanäle mit den Padnummern -18 und -19 betroffen. Bei der detaillierten Analyse zeigt sich, dass auch für die Kanäle mit den Padnummern -27 und -28 – in Abbildung 5.13 ist nur für Pad -27 in Spalte 51 ein Effizienzwert im Bereich von 0,5 bis 0,7 eingetragen – die Effizienz kleiner als 0,7 ist. Im ersten Datensatz weisen die Kanäle mit den Padnummern -12 und -13 sowie -27 und -28 eine niedrige Effizienz auf. Dies ist auf die fehlerhafte Übertragung des Datenbits D12 der MU4-Spalte 52 in beiden Zyklen zurückzuführen. In Run 17 04x tritt zusätzlich ein Fehler in der Übertragung des Datenbits D3 auf, der sich auf die Kanäle mit den Padnummern -3 und -4 im ersten sowie -18 und -19 im zweiten Zyklus auswirkt.

  Die Kanäle des ersten Zyklus in Spalte 52, die nicht von der fehlerhaften Übertragung der Datenbits D3 und D12 betroffen sind, besitzen im Mittel eine Effizienz von 0,95. Die genaue Untersuchung zeigt, dass für sämtliche von der Simulation erzeugten Nachrichten, für die keine übereinstimmende Nachricht im FLT-Datenblock gefunden wird, nur die MU4L-Spalte zum MU4-Muster beiträgt. Dies deutet auf einen Fehler bei der Datenübertragung der MU4-Spalte 53 hin, die den MU4L-Beitrag für die Spalte 52 darstellt.

- Die Datenkanäle der Spalte 26 der $-y$-Hälfte weisen Effizienzwerte kleiner als 0,8 auf, wobei der Wert für die Mehrzahl der Kanäle zwischen 0,5 und 0,7 liegt. Es zeigt sich, dass die Effizienz der Kanäle während der Datennahme stark unterschiedlich war. Dies wird in Abbildung 5.14 verdeutlicht. Dort ist dargestellt, wie sich die Summe der Triggernachrichten aller Kanäle der Spalte abhängig von der Zahl der Ereignisse entwickelt. Die vom Simulationprogramm erzeugten, die aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen sowie die übereinstimmenden Nachrichten sind überlagert dargestellt. Während der gesamten Datennahme steigt die Zahl der von der Simulation erzeugten Triggernachrichten gleichförmig an. Etwa 10 000 Ereignisse nach Beginn der Datennahme verläuft der Anstieg der Zahl der aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten deutlich flacher. Nach dem Übergang zwischen den beiden Runs des Datensatzes steigen die Zahlen der Triggernachrichten wieder gleich an. Während die Kanäle der Spalte 26 in Run 17 044 praktisch vollständig effizient waren, lag die Effizienz am Ende von Run 17 042 bei ca. 0,1. Da die optische Verbindung für die MU3-Spalte 26 nicht als fehlerhaft klassifiziert war, kommen als mögliche Ursachen Fehler auf dem PLB etwa bei der Serialisierung der Trefferdaten oder Fehler in der Verbindung des PCU-Kanals mit dem PMG in Betracht. Dieser Fehler wurde vermutlich durch eine erneute Initialisierung von Hardware-Komponenten zwischen den beiden Runs beseitigt.

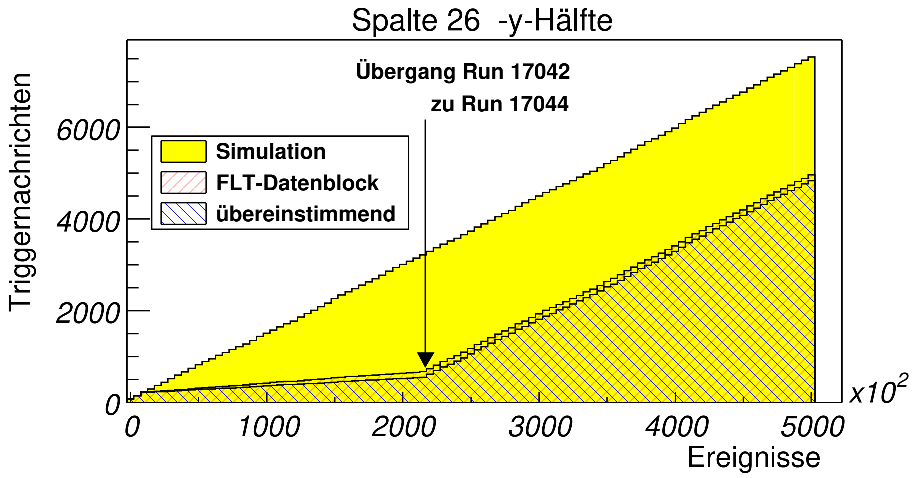


Abbildung 5.14: *Entwicklung der Zahl der Triggernachrichten für die Spalte 26 in Run 17 04x. Gezeigt ist die Entwicklung der Summe der Triggernachrichten aller Kanäle in Spalte 26 abhängig von der Zahl der Ereignisse. Dabei sind die vom Simulationsprogramm erzeugten, die aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen sowie die übereinstimmenden Triggernachrichten überlagert dargestellt.*

Ein vergleichbares Verhalten zeigen auch die Kanäle der Spalte 36 in der $-y$-Hälfte unterhalb der Ausschnitts für das Protonstrahlrohr. In Abbildung 5.13 ist zu erkennen, dass die Kanäle des ersten Zyklus eine Effizienz kleiner als 0,9 besitzen. Eine Untersuchung analog zu der für Spalte 26 durchgeführten ergibt, dass hier zu Beginn des Runs 17 044 die Effizienz aller Kanäle praktisch bei null lag, während die Kanäle in Run 17 042 vollständig effizient waren. Etwa 60 000 Ereignisse nach Beginn des Runs 17 044 steigen die Zahlen der vom Simulationsprogramm erzeugten und der aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten wieder gleichförmig an, d. h. die Effizienz beträgt von diesem Zeitpunkt an praktisch wieder 1.

5.1.6 Untersuchung zu den niedrigen Effizienzwerten in der $+y$-Hälfte für Run 17 04x

In den Abbildungen 5.12 und 5.13 ist zu erkennen, dass die Zahl der Datenkanäle mit einer Effizienz größer als 0,99 in der $+y$-Hälfte wesentlich geringer ist als in der $-y$-Hälfte. Stattdessen betragen die Effizienzwerte für viele Kanäle in der oberen Hälfte zwischen 0,95 und 0,99. Um die Ursache dieses Unterschieds lokalisieren zu können, wird für alle aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten überprüft, ob die Parameter konsistente Werte besitzen. Dies wird dadurch ermöglicht, dass der Abstand des MU3-Pads einer Koinzidenz vom Protonstrahlrohr zum einen aus den Nachrichtenparametern ξ und η und zum anderen aus dem Parameter P unabhängig voneinander bestimmt werden kann.

1. Der Parameter ξ gibt die x-Position des Randes $x^{\max}_{\mathrm{MU3}}$ des MU3-Pads einer Koinzidenz mit dem größeren x-Wert an. Daraus ergibt sich die x-Position des Padmittelpunkts zu

$x_{\mathrm{MU3}} = \xi - \Delta x_{\mathrm{MU3}}/2$, wobei Δx_{MU3} die Breite eines MU3-Pads in x-Richtung bezeichnet. Der Parameter η wird aus der y-Position des Mittelpunkts des MU3-Pads und der mittleren z-Position der MU3-Superlage bestimmt: $\eta = y_{\mathrm{MU3}}/z_{\mathrm{MU3}}$. Daraus wird der Abstand $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ des Padmittelpunktes vom Protonstrahl als

$$\begin{aligned} r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta) \equiv r_{\mathrm{MU3}}(x_{\mathrm{MU3}}(\xi), y_{\mathrm{MU3}}(\eta)) &= \sqrt{(x_{\mathrm{MU3}}(\xi))^2 + (y_{\mathrm{MU3}}(\eta))^2} \\ &= \sqrt{\left(\xi - \frac{\Delta x_{\mathrm{MU3}}}{2}\right)^2 + (\eta \cdot z_{\mathrm{MU3}})^2} \end{aligned} \tag{5.13}$$

berechnet.

2. Die Nachrichten des Myon-Pretriggers enthalten den Parameter P, der eine Abschätzung des Impulses eines Spurkandidaten darstellt. In Abschnitt 4.1.5 wird erläutert, wie der Wert des Parameters P für die Nachrichten des Myon-Pretriggers bestimmt wird. Der nach Gleichung (4.9) berechnete Wert von P stellt eine Abschätzung des minimalen Impulses eines Spurkandidaten dar. Für die Datennahme im Jahr 2000 wurde eine modifizierte Parametrisierung verwendet. Dabei wurde P als Abschätzung des mittleren Impulses von Myonen aus Zerfällen $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ gemäß der Formel

$$P = \frac{1{,}8\,\mathrm{GeV}/c}{\frac{r_{\mathrm{MU3}}}{z_{\mathrm{MU3}}} - 0{,}0017} - 0{,}4\,\mathrm{GeV}/c \tag{5.14}$$

berechnet. Diese Formel beschreibt die Verteilung von Teilchenimpulsen als Funktion des Abstandes r_{MU3} des Treffers in der MU3-Superlage vom Protonstrahl. Die Werte der Parameter wurden aus der Impulsverteilung von Myonen aus dem Zerfall $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ mit Hilfe von Monte-Carlo-Ereignissen durch eine Anpassungsrechnung bestimmt.

Bei der Berechnung der P-Werte für die LUT-Konfigurationsdateien wird r_{MU3} aus der x- und y-Position des Mittelpunktes des MU3-Pads einer Koinzidenz bestimmt. Daher kann aus dem Nachrichtenparameter P der Abstand $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ des Padmittelpunktes vom Protonstrahl zu

$$r_{\mathrm{MU3}}(P) = \left(\frac{1{,}8\ \mathrm{GeV}/c}{P + 0{,}4\,\mathrm{GeV}/c} + 0{,}0017\right) \cdot z_{\mathrm{MU3}} \tag{5.15}$$

bestimmt werden.

In Abbildung 5.15 ist $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ gegen $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ für alle vom Myon-Pretrigger-System während der Datennahme des Runs 17 04x erzeugten Triggernachrichten aufgetragen. Dabei wird anhand der aus dem Parameter η berechneten y-Position des MU3-Pads der Koinzidenz zwischen Nachrichten der $+y$- und $-y$-Hälften unterschieden. Es ist zu erkennen, dass die Auflösung für $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ und $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ verschieden ist. Durch die unterschiedliche Binärkodierung der Nachrichtenparameter ergibt sich für $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ bei großen Abstandswerten eine große Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Werten. Die relative Abweichung

$$\frac{r_{\mathrm{MU3}}(P) - r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)}{r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)} \tag{5.16}$$

beträgt bis zu etwa $\pm 5\,\%$. Unter Berücksichtigung dieses Effektes stimmen für die Triggernachrichten in der $-y$-Hälfte die Werte $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ und $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ nahezu vollständig überein.

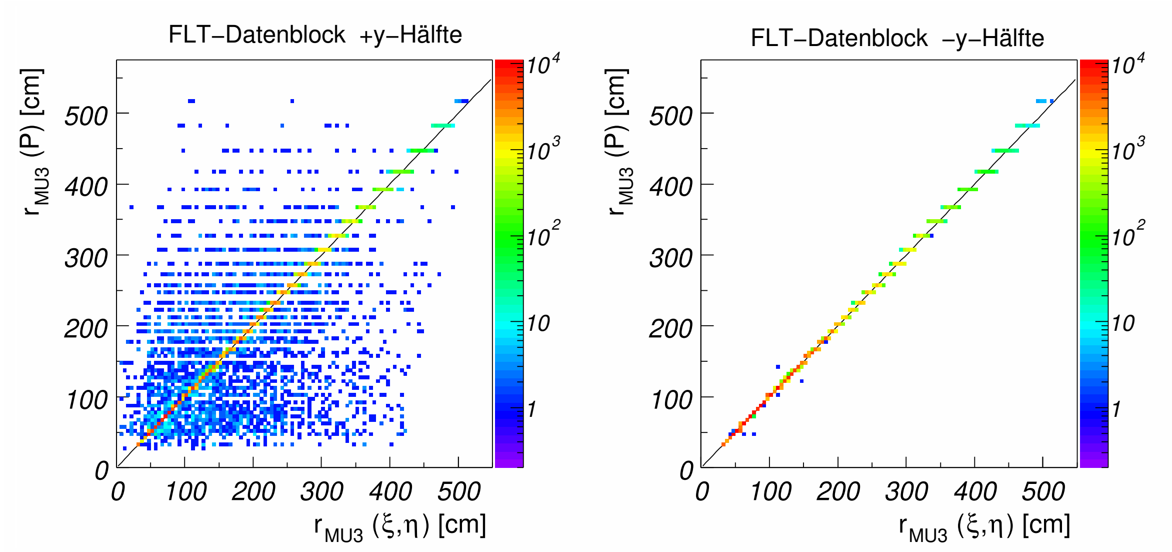


Abbildung 5.15: *Darstellung der aus den Parametern ξ und η sowie P der Triggernachrichten berechneten Abstandswerte für Run 17 04x. Für jede aus dem FLT-Datenblock ausgelesene Triggernachricht des Myon-Pretrigger-Systems wird der Abstand $r_{MU3}(P)$ aus dem Wert des Parameters P nach Gleichung (5.15) bestimmt und gegen den Abstand $r_{MU3}(\xi,\eta)$ aufgetragen, der aus den Werten der Parameter ξ und η nach Gleichung (5.13) berechnet wird. Die Nachrichten der $+y$- und der $-y$-Hälfte sind getrennt dargestellt. Die eingezeichnete Gerade entspricht der Relation $r_{MU3}(P) = r_{MU3}(\xi,\eta)$.*

Hingegen weichen die Abstandswerte $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ und $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ für einen bedeutenden Anteil der Triggernachrichten in der $+y$-Hälfte erkennbar voneinander ab.

Im Folgenden werden Triggernachrichten, für die die nach Gleichung (5.16) berechnete relative Differenz der Abstandswerte größer als 5 % ist, als inkonsistent bezeichnet. In der $+y$-Hälfte beträgt somit der über den gesamten Datensatz gemittelte Anteil der inkonsistenten Triggernachrichten 1,5 %, während er in der $-y$-Hälfte bei $5{,}1 \cdot 10^{-3}$ % liegt.

In Abbildung 5.16 ist der Anteil inkonsistenter Triggernachrichten abhängig von der Zahl der aufgezeichneten Ereignisse dargestellt. Für jeweils 5000 Ereignisse – dies entspricht einer Datennahmezeit von etwa einer Minute – wird das Verhältnis der inkonsistenten zu allen aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten berechnet. Es ist zu erkennen, dass der Anteil der inkonsistenten Nachrichten während der Datennahme deutlich schwankt. Für einige Intervalle liegt der berechnete Anteil unterhalb von 0,1 %, während der Maximalwert fast 3,0 % beträgt.

In Abbildung 5.15 ist zu sehen, dass für einige Einträge der Abstand $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ – im Gegensatz zu $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ – Werte kleiner als ungefähr 30 cm annimmt. Dies entspricht Koinzidenzpositionen im Bereich des Ausschnitts für das Protonstrahlrohr bzw. des Pixel-Systems. In der in Abbildung 5.3 dargestellten Verteilung der aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten des Myon-Pretriggers sind solche Einträge im Bereich der Protonstrahlrohrausschnitts in der $+y$-Hälfte zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Werte der Parameter

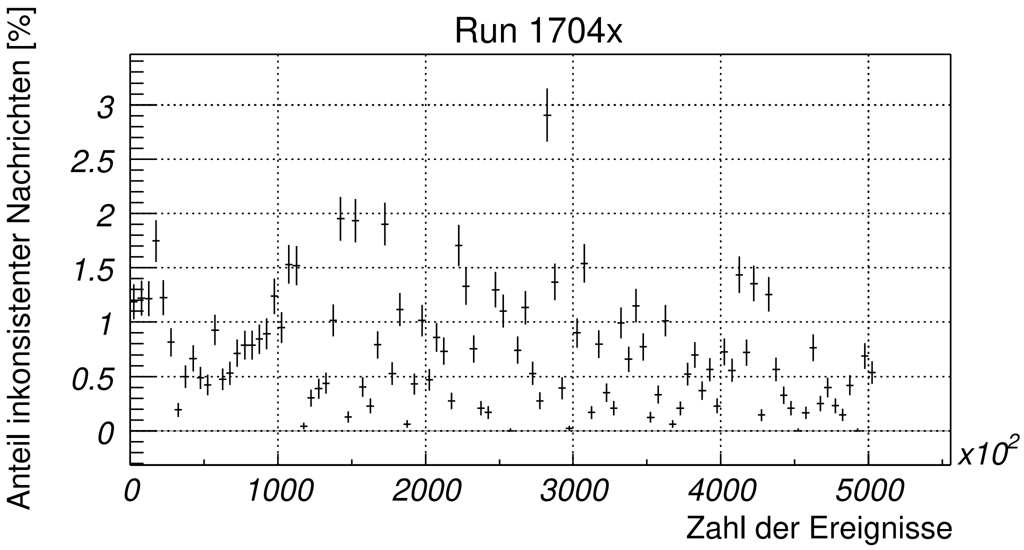


Abbildung 5.16: *Anteil inkonsistenter Triggernachrichten als Funktion der Zahl der aufgezeichneten Ereignisse. Für jeweils* 5000 *Ereignisse wird das Verhältnis der inkonsistenten zu allen aus dem FLT-Datenblock ausgelesenen Triggernachrichten berechnet.*

ξ oder η verändert wurden.

Um zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen den beobachteten inkonsistenten Nachrichten und den niedrigeren Effizienzwerten der Kanäle in der $+y$-Hälfte besteht, wird eine Effizienzbestimmung durchgeführt, bei der Ereignisse ausgeschlossen werden, in denen wenigstens eine inkonsistente Triggernachricht im FLT-Datenblock vorliegt. Von den insgesamt 506 109 Ereignissen enthalten 3179 wenigstens eine inkonsistente Triggernachricht, dies entspricht einem Anteil von 0,6 %. In Tabelle 5.15 sind die mittleren Effizienzwerte zusammengefasst, die sich für alle Ereignisse des Datensatzes bzw. ohne Ereignisse mit inkonsistenten Nachrichten ergeben. Das Herausnehmen der Ereignisse mit wenigstens einer inkonsistenten Triggernachricht lässt die verschiedenen Mittelwerte für die $-y$-Hälfte nahezu unverändert. Hingegen steigen sämtliche Mittelwerte für die $+y$-Hälfte deutlich an, wenn diese Ereignisse nicht berücksichtigt werden. Dies deutet darauf hin, dass die niedrigen Effizienzwerte der Kanäle in der $+y$-Hälfte durch inkonsistente Nachrichten verursacht werden.

In Tabelle 5.16 ist der Anteil von Kanälen angegeben, deren Effizienz oberhalb bestimmter Werte liegt. Wie im Fall der mittleren Effizienzwerte bleibt durch die Herausnahme der Ereignisse mit wenigstens einer inkonsistenten Nachricht der Anteil der Kanäle in der $-y$-Hälfte praktisch unverändert. In der $+y$-Hälfte steigt dagegen der Anteil der Kanäle, deren Effizienz oberhalb der betrachteten Werte liegt, durch die Herausnahme dieser Ereignisse an. Besonders deutlich wird dies für die Schwellenwerte 0,99 und 0,999. Bleiben Ereignisse mit inkonsistenten Nachrichten außer Betracht, so vergrößert sich der Anteil der Kanäle in der $+y$-Hälfte mit einer Effizienz oberhalb dieser Werte um jeweils mehr als einen Faktor zwei.

In den Ereignissen mit wenigstens einer inkonsistenten Triggernachricht gibt es insgesamt 3629 vom Simulationsprogramm erzeugte Triggernachrichten in der $+y$-Hälfte. Für 3283 dieser

Tabelle 5.15: *Mittlere Effizienzwerte für Run 1704x mit und ohne Ereignisse mit inkonsistenten Nachrichten. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert* $\bar{\varepsilon}$ *und der gewichtete Mittelwert* $\bar{\bar{\varepsilon}}$ *der Effizienzwerte der einzelnen Datenkanäle.* $\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$ *ist der Mittelwert der Effizienz, der sich aus den mit nach Gleichung (5.3) berechneten Gewichten skalierten Effizienzwerten ergibt. In den farbig unterlegten Spalten sind die mittleren Effizienzwerte nur für Ereignisse ohne inkonsistente Nachrichten angegeben. Die für alle Ereignisse des Runs 1704x berechneten Mittelwerte aus Tabelle 5.12 sind ebenfalls aufgeführt. Die Mittelwerte sind jeweils für das gesamte Pad-System und auch getrennt für die* $+y$*- und* $-y$*-Hälften berechnet.*

Mittel-	alle Ereignisse			ohne inkonsistente Nachrichten		
wert	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
$\bar{\varepsilon}$	$0{,}953 \pm 0{,}003$	$0{,}959 \pm 0{,}003$	$0{,}946 \pm 0{,}005$	$0{,}960 \pm 0{,}003$	$0{,}973 \pm 0{,}003$	$0{,}947 \pm 0{,}005$
$\bar{\bar{\varepsilon}}$	$0{,}995 \pm 0{,}001$	$0{,}981 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$	$0{,}996 \pm 0{,}001$	$0{,}997 \pm 0{,}001$
$\bar{\varepsilon}_{J/\psi}$	$0{,}959 \pm 0{,}001$	$0{,}952 \pm 0{,}001$	$0{,}966 \pm 0{,}001$	$0{,}966 \pm 0{,}001$	$0{,}965 \pm 0{,}001$	$0{,}966 \pm 0{,}001$

Nachrichten existiert eine inkonsistente Triggernachricht aus dem FLT-Datenblock mit einem übereinstimmenden Wert des Parameters P. Für 162 Triggernachrichten stimmen sowohl ξ als auch η überein, 494 Triggernachrichten haben identische ξ-Werte, 2881 identische η-Werte.

Im Folgenden wird erläutert, welche Fehlfunktionen zu den beobachteten inkonsistenten Triggernachrichten geführt haben können.

- Die Mehrzahl der Parameter der Triggernachrichten wird durch einen Zugriff auf die LUT des PMGs bestimmt. Enthalten die Dateien zur Konfiguration der LUTs, die mit Hilfe des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Programms erzeugt werden, fehlerhaft berechnete Parameterwerte, so kann dies zu inkonsistenten Nachrichten führen.

- Sind die Parameterwerte in den LUT-Konfigurationsdateien korrekt berechnet, so kann ein Fehler beim Schreiben in den RAM-Baustein auf dem jeweiligen PMG gegebenenfalls veränderte Parameterwerte und inkonsistente Nachrichten verursachen.

- Enthält die LUT korrekte Parameterwerte, so kann ein Hardwarefehler vor der LUT nicht zu inkonsistenten Nachrichten führen. Durch einen derartigen Fehler kann jedoch die LUT-Adresse verändert werden, so dass sie nicht mehr den Koinzidenzdaten entspricht. Stellt die verfälschte LUT-Adresse eine ungültige Kombination von Koinzidenzparametern dar, bei der beispielsweise kein Bit des MU4-Treffermusters gesetzt ist, so wird eine Nachricht erzeugt, deren Parameter alle auf null gesetzt sind. Diese wird von der TFU nicht weitergeleitet. Handelt es sich bei der verfälschten LUT-Adresse um eine gültige Kombination von Koinzidenzparametern, so wird eine Nachricht erzeugt, deren Parameter konsistente Werte besitzen. Die Triggernachricht ist allerdings im allgemeinen nicht kompatibel zu der Koinzidenz, d. h. die Nachrichtenparameter beschreiben nicht die tatsächliche Trefferkoinzidenz.

Tabelle 5.16: *Anteil von Datenkanälen oberhalb bestimmter Effizienzwerte für Run 17 04x mit und ohne Ereignisse mit inkonsistenten Triggernachrichten. Angegeben ist jeweils der Anteil der Datenkanäle, deren Effizienz oberhalb der verschiedenen Werte liegt, bezogen auf die Gesamtzahl von Kanälen, für die ein Effizienzwert bestimmt werden kann. Die Werte für alle Ereignisse entsprechen den in Tabelle 5.13 gezeigten. Die Angaben werden für das gesamte Pad-System und getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälften aufgeführt.*

Effizienz	Anteil von Datenkanälen in %					
größer	alle Ereignisse			ohne inkonsistente Nachrichten		
als	gesamt	$+y$	$-y$	gesamt	$+y$	$-y$
0,5	97,7	98,8	96,5	97,8	99,0	96,6
0,9	91,8	94,6	88,7	92,1	95,2	88,8
0,95	86,0	85,6	86,4	89,3	92,0	86,4
0,99	55,3	31,7	80,5	76,7	73,1	80,6
0,999	42,9	24,0	63,1	59,0	55,1	63,1

- Falls die in der LUT enthaltenen Parameterwerte korrekt sind, können inkonsistente Triggernachrichten nach den vorangegangenen Ausführungen nur durch Fehlfunktionen nach der Ausgabe der LUT-Daten zustande kommen. Dabei kann es sich um Fehler auf dem PMG, z. B. in der Schnittstelle zur Nachrichtenübertragung, auf dem LVDS-MUX, der TFU oder der TDU handeln.

Zunächst werden die LUT-Konfigurationsdateien für die PMGs der $+y$-Hälfte überprüft, die während der Datennahme für Run 17 04x eingesetzt wurden. Dazu werden für alle Einträge die binärkodierten Werte der Parameter ξ, η und P aus den Datenworten gelesen, und aus den dekodierten Werten werden nach den Gleichung (5.13) und (5.15) die Abstände $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ und $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ berechnet. In Abbildung 5.17 ist für die LUT-Konfigurationsdateien der verschiedenen PMGs der $+y$-Hälfte jeweils $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ gegen $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich aus den in den LUT-Konfigurationsdateien enthaltenen Werten der Parameter ξ, η und P konsistente Abstandswerte $r_{\mathrm{MU3}}(\xi,\eta)$ und $r_{\mathrm{MU3}}(P)$ ergeben. Somit gehen die inkonsistenten Werte nicht auf fehlerhafte Parameterwerte in den LUT-Konfigurationsdateien zurück.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei der Initialisierung des Myon-Pretrigger-Systems vor der Datennahme ein Fehler bei der Übertragung der LUT-Daten aus den Konfigurationsdateien in die RAM-Bausteine auf den PMGs aufgetreten ist, da die LUT-Daten nicht zurückgelesen und mit den Einträgen in den Dateien verglichen wurden. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass ein solcher Fehler zu den inkonsistenten Triggernachrichten geführt hat, da diese praktisch nur in der $+y$-Hälfte auftraten. Da Kanäle aus dem gesamten Bereich der oberen Hälfte niedrige Effizienwerte aufweisen, müssten alle neun PMGs in der oberen Hälfte von Fehlern beim Laden der LUTs betroffen gewesen sein, während in der unteren Hälfte praktisch keine Fehler auftraten.

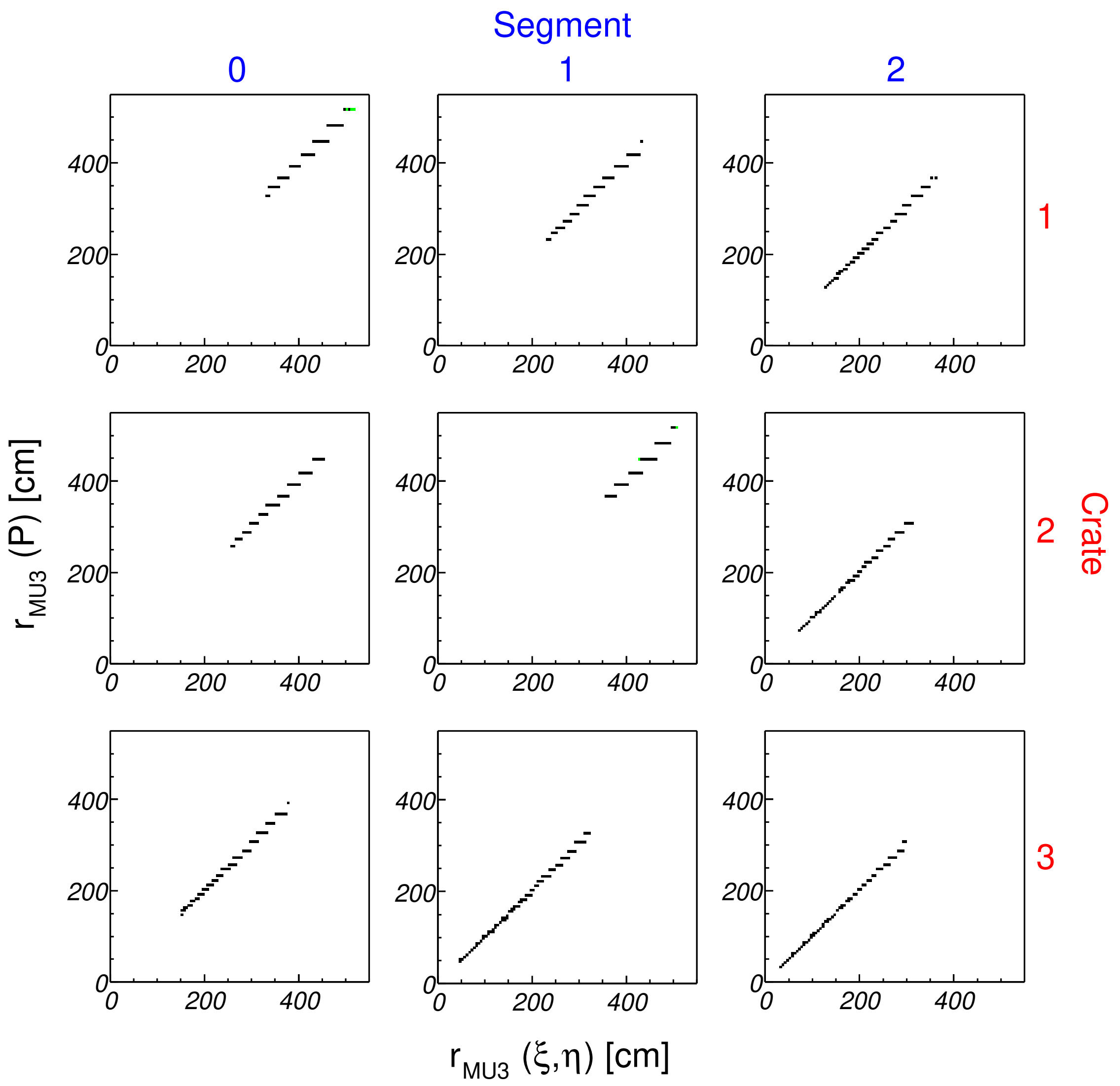


Abbildung 5.17: *Aus den Parametern P sowie ξ und η berechnete Abstandswerte für die LUT-Konfigurationsdateien der $+y$-Hälfte. Aufgetragen sind jeweils die nach den Gleichungen (5.13) und (5.15) berechneten Abstandswerte $r_{MU3}(P)$ gegen $r_{MU3}(\xi,\eta)$. Jedes Histogramm enthält alle von 0 verschiedenen Einträge der jeweiligen Konfigurationsdatei, die durch die Crate- und Segmentnummer des PMGs gekennzeichnet ist.*

Nach der Ausgabe korrekter LUT-Daten können inkonsistente Triggernachrichten durch Fehlfunktionen an verschiedenen Stellen des Triggersystems verursacht worden sein. Dazu zählen

- die Nachrichtenübertragungsstufe auf dem PMG, die die Triggernachrichten umformt und zum LVDS-MUX überträgt,
- der LVDS-MUX, der die Triggernachrichten von je zwei PMGs zusammenfasst und, nachdem die Signale ins LVDS-Niveau konvertiert wurden, zu einer TFU sendet,
- die TFU, die im transparenten Modus als Multiplexer fungiert und die Triggernachrichten zur TDU weiterleitet,
- die TDU, die die empfangenen Nachrichten nach ihrer BX-Nummer sortiert und für selektierte Ereignisse im FLT-Datenblock an die DAQ übergibt.

Mehrere Parameter der Triggernachrichten besitzen feste Werte, entsprechend 21 der insgesamt 80 Bits einer Triggernachricht. Für alle inkonsistenten Triggernachrichten weisen diese Parameter die korrekten Werte auf. Somit ist ein zufälliger Bitfehler in der Übertragung der Triggernachrichten als Ursache der inkonsistenten Nachrichten sehr unwahrscheinlich.

Da die inkonsistenten Nachrichten praktisch nur in der oberen Hälfte auftraten, ist es unwahrscheinlich, dass eine Fehlfunktion der TDU vorlag, da die Triggernachrichten aus beiden Detektorhälften durch die TDU in gleicher Weise verarbeitet wurden. In der $+y$- und $-y$-Detektorhälfte wurden während der Datennahme je neun PMGs und fünf LVDS-MUX eingesetzt. Es ist unwahrscheinlich, dass alle Module in der $+y$-Hälfte fehlerhaft arbeiteten, während in der $-y$-Hälfte so viel weniger Fehler auftraten. Für jede Detektorhälfte wurde genau eine TFU verwendet, um die Triggernachrichten zur TDU weiterzuleiten. Das Auftreten von inkonsistenten Nachrichten praktisch nur in der $+y$-Hälfte kann deshalb wahrscheinlich auf eine Fehlfunktion der entsprechenden TFU zurückgeführt werden.

5.2 Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für Zerfälle $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$

Während der Datennahme im Jahr 2000 diente der Myon-Pretriggers vorwiegend dazu, Ereignisse mit Zerfällen des Typs $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$ nachzuweisen. Dieser Zerfallsprozess wird auch für das Physikprogramm der Datennahmeperiode im Jahr 2002 von großer Bedeutung sein.

Zur Selektion von Ereignissen mit solchen Zerfallsprozessen werden in der ersten und zweiten Triggerstufe mindestens zwei Kandidaten für Myonspuren verlangt. Die Triggeralgorithmen sehen den Einsatz von Selektionsschritten vor, bei denen Paare von Myonspurkandidaten kombiniert werden. Dabei wird z. B. die invariante Masse aus den rekonstruierten kinematischen Variablen der Teilchenspuren bestimmt und als Selektionskriterium verwendet. Damit ein Ereignis mit dem Zerfall eines J/ψ-Mesons selektiert werden kann, müssen beide Myonen durch den Myon-Pretrigger nachgewiesen werden, denn nur in diesem Fall findet die Spurrekonstruktion durch die nachfolgenden Triggerstufen statt.

Der Anteil der Zerfälle von J/ψ-Mesonen, bei denen für beide Myonen eine Triggernachricht des Myon-Pretriggers erzeugt wird, wird bestimmt durch

- die geometrische Akzeptanz des Myon-Detektors in den Superlagen MU3 und MU4,
- die Akzeptanz des Myon-Pretriggers, die durch das Koinzidenzschema gegeben ist, und
- die Nachweiseffizienz der Pretrigger-Kanäle für eine vorhandene Trefferkoinzidenz.

Dabei beinhaltet die geometrische Akzeptanz auch den Effekt, dass Myonen mit einem Impuls kleiner als etwa 5 GeV/c die Absorberlagen des Myon-Filters nicht durchdringen und somit nicht durch den Pretrigger nachgewiesen werden können.

Die Ergebnisse einer Analyse zur Bestimmung der Effizienz des Myon-Pretriggers werden in Abschnitt 5.1 präsentiert. Im Folgenden werden Resultate einer Untersuchung zur Akzeptanz des Myon-Pretriggers für den Zerfallprozess $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$ vorgestellt [Ada 01b]. Diese Untersuchung wird mit Hilfe des Simulationsprogramms für den Myon-Pretrigger durchgeführt und beschränkt sich auf das Pad-System. Dabei wird sowohl die Akzeptanz für den Zerfallsprozess als auch für die einzelnen Myonspuren, die aus dem Zerfall hervorgehen, ermittelt.

Eine wichtige Zielsetzung der Untersuchung ist es, die Akzeptanz für Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen in Abhängigkeit von ihrem Abstand vom Protonstrahlrohr zu bestimmen. Das in Abbildung 3.2 dargestellte Koinzidenzschema, das der Myon-Pretrigger zur Suche nach Kandidaten für Myonspuren verwendet, ist uniform für das gesamte Pad-System. Je weiter ein Teilchen, das der Targetregion entstammt, vom Protonstrahlrohr entfernt das Pad-System durchquert, umso größer ist – unter Vernachlässigung der Ablenkung im Spektrometermagneten – der Winkel, den die Teilchentrajektorie mit der z-Achse bildet. Das führt dazu, dass sich der MU4-Treffer solcher Spuren mit zunehmendem Abstand vom Protonstrahlrohr relativ zum MU3-Treffer immer weiter nach außen verschiebt. Weder in der Positionierung und Größe der Kathodenpads noch im Koinzidenzschema des Pretriggers wird diese projektive Verschiebung berücksichtigt. Für eine Trefferposition x_{MU3} in der Superlage MU3 ergibt sich durch Projektion die Position des MU4-Treffers zu $x_{\mathrm{MU4}} = x_{\mathrm{MU3}} \cdot z_{\mathrm{MU4}}/z_{\mathrm{MU3}}$. Für $|x_{\mathrm{MU3}}| \gtrsim 300\,\mathrm{cm}$ ist die Differenz $|x_{\mathrm{MU4}} - x_{\mathrm{MU3}}|$ größer als die Breite eines Pads in x-Richtung. Liegt der Treffer in MU3 nahe am äußeren Rand eines Pads, so ist zu erwarten, dass der Treffer in

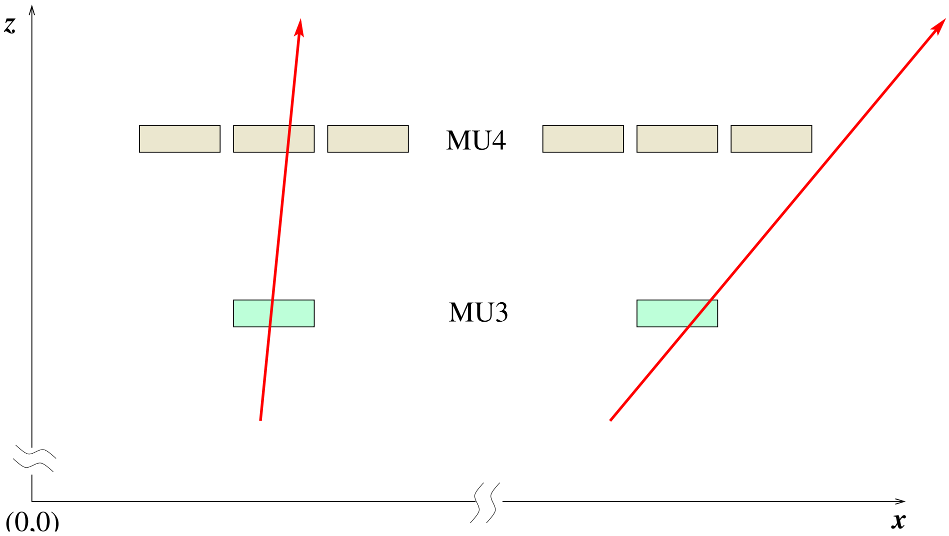


Abbildung 5.18: *Projektive Verschiebung des MU4-Treffers für Teilchendurchgänge bei großem Abstand vom Protonstrahlrohr. Die Pfeile symbolisieren zwei Teilchenspuren, wobei eine die Superlagen MU3 und MU4 des Pad-Systems nahe dem Protonstrahlrohr bei $x_{MU3} = 0$ durchquert (links), während die andere Spur den Randbereich des Pad-Systems ($|x_{MU3}| \gtrsim 300\,\mathrm{cm}$) trifft. Sowohl die x- als auch die z-Achse sind unterbrochen dargestellt. Beide Spuren entstammen der Targetregion. Für die im Randbereich des Pad-Systems eintreffende Spur liegt der MU4-Treffer nicht mehr innerhalb der drei Spalten, die gemäß dem Koinzidenzschema zum MU4-Muster des getroffenen MU3-Pads beitragen.*

MU4 nicht mehr im Bereich der Spalten liegt, die gemäß dem Koinzidenzschema zum MU4-Muster beitragen. Dies ist in Abbildung 5.18 schematisch dargestellt. Während die Spur, die das Pad-System nahe dem Protonstrahlrohr durchquert, zu einer Trefferkoinzidenz führt und demnach durch den Pretrigger nachgewiesen wird, liegt der MU4-Treffer der Spur, die den Randbereich des Pad-Systems trifft, außerhalb der drei Spalten, die zum MU4-Muster beitragen. Eine solche Spur würde durch den Myon-Pretrigger nicht nachgewiesen werden.

5.2.1 Akzeptanz für Einzelspuren und Zerfälle des J/ψ-Mesons

Die Untersuchung zur Akzeptanz wurde mit Monte-Carlo-Ereignissen durchgeführt, die jeweils genau einen Zerfall $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ enthalten. Insgesamt wurden 96 500 Zerfälle untersucht. Die geometrische Akzeptanz des Myon-Pad-Systems wird als der Anteil der Myonspuren aus Zerfällen des J/ψ-Mesons bestimmt, für die sowohl in MU3 als auch in MU4 ein Treffer im Pad-System registriert wird. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers wird aus dem Anteil der Myonspuren berechnet, deren Treffer in MU3 und MU4 zu einer Koinzidenz gehören, die durch das Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger gefunden wird. Die Anteile werden jeweils relativ zur Gesamtzahl der aus J/ψ-Zerfällen stammenden Myonspuren bestimmt. In Tabelle 5.17 sind die geometrische Akzeptanz des Myon-Pad-Systems und die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für die Myonspuren aufgeführt. Etwa zwei von drei Myonspuren aus J/ψ-

Tabelle 5.17: *Akzeptanzwerte für Myonspuren aus Zerfällen* $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ *für das Pad-System. Die geometrische Akzeptanz wird als der Anteil der Myonspuren berechnet, für die in MU3 und MU4 ein Treffer im Pad-System vorliegt. Die Akzeptanz des Pretriggers ergibt sich aus dem Anteil der Myonspuren, deren MU3- und MU4-Treffer den getroffenen Pads einer Koinzidenz entsprechen. Die Fehler werden wie in Anhang B beschrieben berechnet.*

	μ^+	μ^-
geometrische Akzeptanz	$0{,}659 \pm 0{,}002$	$0{,}668 \pm 0{,}002$
Akzeptanz des Myon-Pretriggers	$0{,}650 \pm 0{,}002$	$0{,}660 \pm 0{,}002$

Zerfällen liegen innerhalb der geometrischen Akzeptanz. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für diese Myonspuren liegt etwa ein Prozent unterhalb der geometrischen Akzeptanz.

Die Akzeptanz für den Zerfallsprozess $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ wird als der Anteil der Ereignisse berechnet, für die beide Myonspuren innerhalb der geometrischen Akzeptanz bzw. innerhalb der Akzeptanz des Myon-Pretriggers liegen. Damit ergeben sich die in Tabelle 5.18 angegebenen Akzeptanzwerte. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für den betrachteten Zerfallsprozess ist etwa ein Prozent niedriger als die geometrische Akzeptanz des Pad-Systems.

Tabelle 5.18: *Akzeptanzwerte für den Zerfallsprozess* $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ *für das Pad-System. Diese Werte geben den Anteil der* J/ψ*-Zerfälle an, für die beide Myonspuren innerhalb der geometrischen Akzeptanz bzw. innerhalb der Akzeptanz des Myon-Pretriggers liegen. Die Berechnung der Fehler erfolgt nach Anhang B.*

	μ^+ und μ^- aus J/ψ-Zerfall
geometrische Akzeptanz	$0{,}434 \pm 0{,}002$
Akzeptanz des Myon-Pretriggers	$0{,}423 \pm 0{,}002$

5.2.2 Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz in Abhängigkeit von der Entfernung vom Protonstrahlrohr

Für Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen wird die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems abhängig von der Distanz zum Protonstrahlrohr untersucht. In Abbildung 5.19 ist die Verteilung der relativen Akzeptanzwerte $\eta_{\mathrm{rel}}(s,p)$ für die Pads in MU3 gezeigt. Diese Werte werden für ein Pad mit der Spaltennummer s und der Padnummer p gemäß

$$\eta_{\mathrm{rel}}(s,p) = \frac{\mathrm{N}_{\mathrm{Koinz}}(s,p)}{\mathrm{N}_{\mathrm{geo}}(s,p)} \tag{5.17}$$

berechnet. Dabei ist $\mathrm{N}_{\mathrm{Koinz}}(s,p)$ ist Zahl der Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen, für die die Pretrigger-Simulation eine Koinzidenz im MU3-Pad (s,p) findet. $\mathrm{N}_{\mathrm{geo}}(s,p)$ stellt die Zahl von

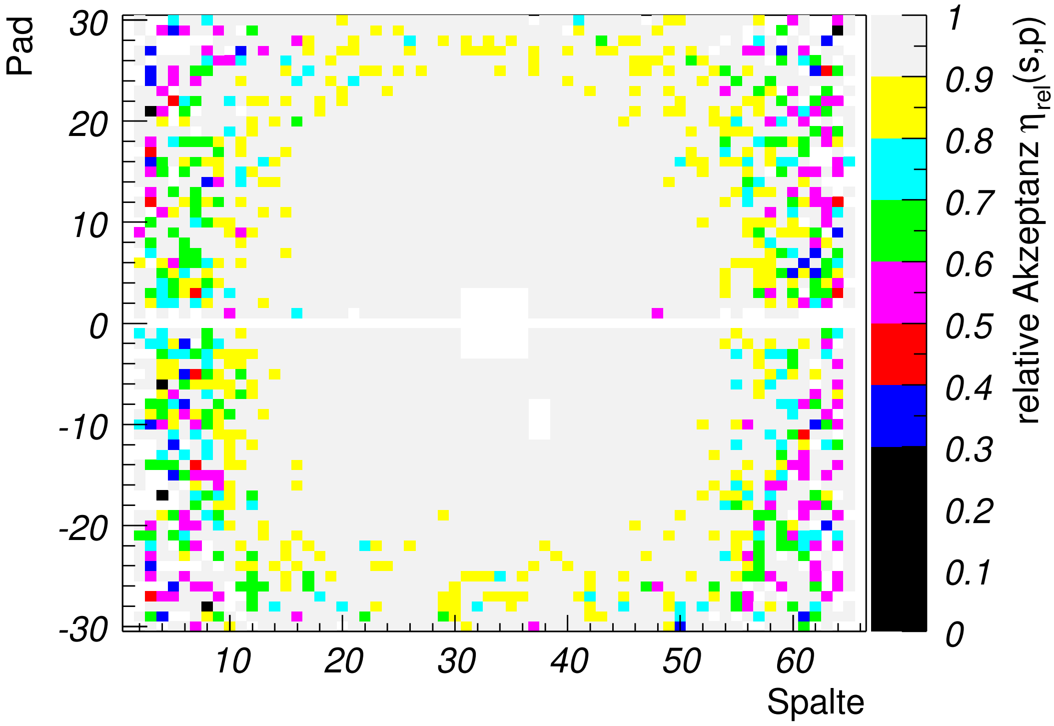


Abbildung 5.19: *Akzeptanzwerte für Myonspuren aus* J/ψ*-Zerfällen. Dargestellt ist die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems, berechnet nach Formel (5.17).*

Spuren dar, die innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems liegen und einen Treffer im MU3-Pad (s, p) besitzen.

In den Randbereichen des Pad-Systems nimmt η_{rel} ab. Dabei verringert sich die Akzeptanz des Myon-Pretriggers vor allem für Pads in Bereich der äußeren zehn Spalten auf beiden Seiten des Pad-Systems. Dies entspricht Positionen in MU3 mit $|x_{MU3}| \gtrsim 300\,\text{cm}$.

In Abbildung 5.20 ist die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz in Abhängigkeit von der MU3-Spaltennummer aufgetragen. Die relative Akzeptanz $\eta_{\text{rel}}(s)$ einer Spalte wird nach Formel (5.17) als das Verhältnis der Zahl der Myonspuren, für die eine Koinzidenz gefunden wird, zur Zahl der Spuren innerhalb der geometrischen Akzeptanz, deren MU3-Treffer in der betrachteten Spalte liegt, berechnet. In dieser Darstellung wird die Abnahme der Akzeptanz des Myon-Pretriggers für die äußeren Spalten deutlich. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers sinkt bis auf etwa 0,6 der geometrischen Akzeptanz ab. Es fällt auf, dass die relative Akzeptanz für die Spalten 2, 65 und 68 einen Wert von jeweils über 0,9 erreicht und somit deutlich höher liegt als in den benachbarten, weiter innen liegenden Spalten. Dies soll am Beispiel der MU3-Spalte 65 erklärt werden. Für diese Spalte tragen gemäß dem Koinzidenzschema die MU4-Spalten 64, 65 und 66 zum MU4-Muster bei. Die Spalte 66 stellt

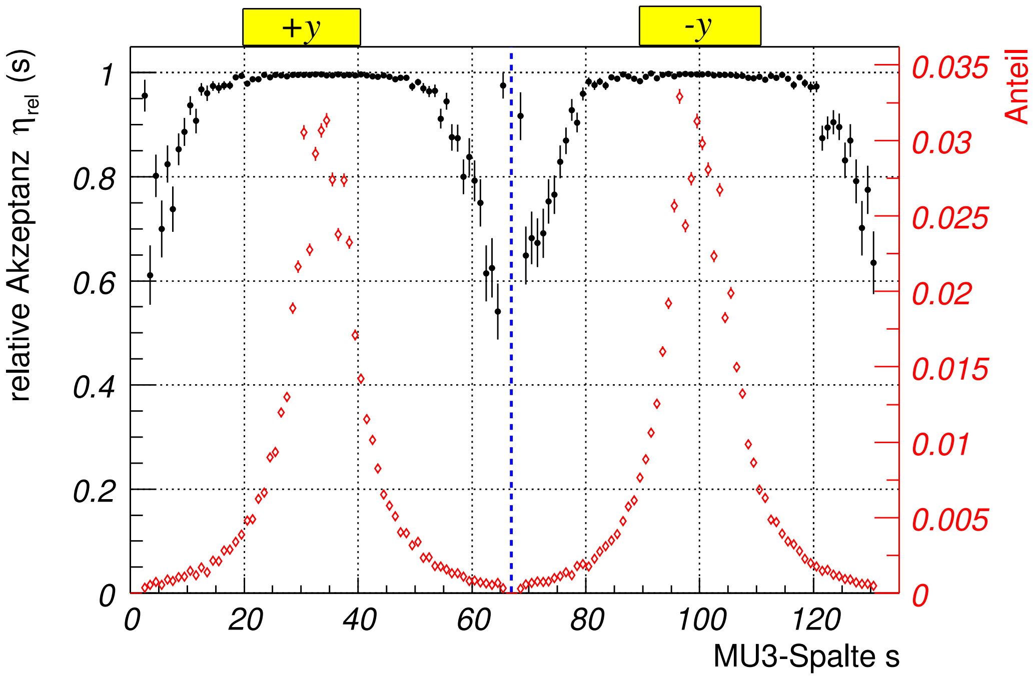


Abbildung 5.20: *Akzeptanzwerte für Myonspuren aus* J/ψ*-Zerfällen in Abhängigkeit von der MU3-Spalte. Dargestellt ist die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems (gefüllte Kreise, Skala links). Zusätzlich ist die Verteilung der Durchstoßpunkte der Myonspuren durch die MU3-Lage abhängig von der Spalte gezeigt (offene Rauten, Skala rechts). Diese Verteilung wird zur Berechnung eines gewichteten Mittelwertes eingesetzt. Die Summe aller Einträge ist für diese Verteilung auf 1 normiert. In der Abbildung sind die Spalten der oberen und unteren Hälfte zusammengefasst und durchgehend von 1 bis 132 nummeriert. Dabei gehören die Spalten 1 bis 66 zur* $+y$*-Hälfte und die Spalten 67 bis 132 zur* $-y$*-Hälfte. Die Fehler werden nach der in Anhang B beschriebenen Methode berechnet.*

eine Randspalte des Pad-Systems dar, d. h. sie begrenzt die geometrische Akzeptanz in der Superlage MU4. Bei der Berechnung der relativen Akzeptanz des Myon-Pretriggers werden nur Spuren betrachtet, deren MU3- und MU4-Treffer innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems liegen. Für eine Myonspur mit einem Treffer in der MU3-Spalte 65 kann die projektive Verschiebung daher nicht dazu führen, dass der MU4-Treffer außerhalb der Spalten, die zum MU4-Muster beitragen, liegt, aber noch innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems. Infolgedessen wirkt sich die Verschiebung des MU4-Treffers in x-Richtung nach außen für die oben genannten Spalten bei der Berechnung der relativen Akzeptanzwerte nicht aus. Für die MU3-Spalten 1, 66, 67 und 132 können keine relativen Akzeptanzwerte angegeben werden, da es keine Myonspuren mit einem MU3-Treffer in diesen Spalten gibt, für die der MU4-Treffer innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems liegt. Dies trifft auch auf die Spalte 131 in der $-y$-Hälfte zu.

In Abbildung 5.21 ist die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz als Funktion des Abstandes r_{MU3} von der z-Achse dargestellt. Die relative Akzeptanz

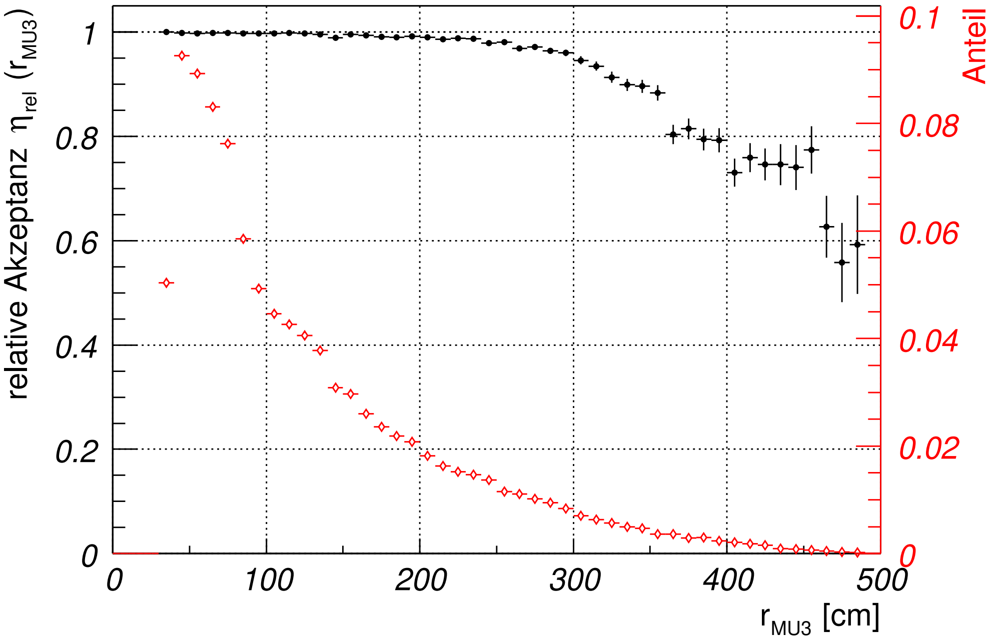


Abbildung 5.21: *Akzeptanzwerte für Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen als Funktion des Abstandes von der z-Achse. Dargestellt ist die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems (gefüllte Kreise, Skala links). Zusätzlich ist der Anteil der Myonspuren in Abhängigkeit ihres Durchstoßpunktes in MU3 gezeigt (offene Rauten, Skala rechts). Diese Verteilung dient zur Berechnung eines gewichteten Mittelwertes. Die Fehler sind nach der in Anhang B beschriebenen Methode berechnet.*

$\eta_{rel}(r_{MU3})$ wird berechnet als das Verhältnis der Zahl der Myonspuren, für die eine Koinzidenz gefunden wird, zur Zahl der Spuren innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems. Der Abstand r_{MU3} wird aus der Position des Durchstoßpunktes der Myonspur in der Superlage MU3 berechnet. Für $r_{MU3} \gtrsim 250\,\mathrm{cm}$ zeigt sich eine Abnahme der Akzeptanz des Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz. Bei einem Abstand $r_{MU3} \approx 300\,\mathrm{cm}$ beträgt die relative Akzeptanz etwa 0,95 und sinkt auf einen Wert von etwa 0,6 bei den am weitesten vom Protonstrahlrohr entfernten Teilchendurchgängen.

Aus den in den Abbildungen 5.20 und 5.21 gezeigten Verteilungen werden Mittelwerte der relativen Akzeptanz bestimmt. Der gewichtete Mittelwert $\overline{\overline{\eta}}_{rel}$ wird gemäß

$$\overline{\overline{\eta}}_{rel} = \frac{\sum\limits_i \eta^i_{rel} \cdot (\sigma(\eta^i_{rel}))^{-2}}{\sum\limits_i (\sigma(\eta^i_{rel}))^{-2}} \tag{5.18}$$

berechnet. Dabei wird der relative Akzeptanzwert η^i_{rel} nach Gleichung (5.17) berechnet. Der Index i kennzeichnet ein Bin der in den Abbildungen 5.20 und 5.21 gezeigten Histogramme, also entweder eine bestimmte MU3-Spalte oder ein bestimmtes Intervall des Abstandes r_{MU3}. Die Fehler $\sigma(\eta^i_{rel})$ werden nach der in Anhang B beschriebenen Methode berechnet.

Zusätzlich werden die relativen Akzeptanzwerte mit Gewichten skaliert, um die Bedeutung einer MU3-Spalte oder eines Detektorbereichs mit einem Abstand r_{MU3} vom Protonstrahlrohr beim Nachweis der Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen zu berücksichtigen. Aus den skalierten Akzeptanzwerten wird der Mittelwert

$$\bar{\eta}^{rel}_{J/\psi} = \frac{\sum_i \eta^i_{rel} \cdot w^i_{J/\psi}}{\sum_i w^i_{J/\psi}} \tag{5.19}$$

berechnet. Der Index i bezeichnet ein Bin der in den Abbildungen 5.20 und 5.21 gezeigten Histogramme. Die Gewichte $w^i_{J/\psi}$ entsprechen dem Anteil der Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen, deren Durchstoßpunkte in MU3 in der Spalte bzw. in dem Abstandsintervall i liegen.

In Tabelle 5.19 sind die Mittelwerte der relativen Akzeptanz aufgeführt. Die mittlere relative Akzeptanz von etwa 0,99 für Myonspuren aus dem Zerfall eines J/ψ-Mesons steht in Einklang mit dem Verhältnis der in Tabelle 5.18 angegebenen absoluten Akzeptanzwerte für den Zerfallsprozess. Unter Vernachlässigung von Korrelationen ergibt sich aus der relativen Akzeptanz für einzelne Myonspuren als Abschätzung der relativen Akzeptanz für den Zerfallsprozess, d. h. für zwei Myonspuren, ein Wert von $0{,}99^2 \approx 0{,}98$. Aus den in Tabelle 5.18 angegebenen Werten erhält man eine relative Akzeptanz von $0{,}975 \pm 0{,}006$.

Tabelle 5.19: *Mittlere relative Akzeptanzwerte für Myonspuren aus dem Zerfallsprozess* J/$\psi \to \mu^+\mu^-$. *Die Mittelwerte sind jeweils für die in den Abbildung 5.20 und 5.21 gezeigten Verteilungen berechnet. Die angegebenen Werte stellen die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems dar.*

Mittelwert	MU3-Spalte	Abstand
$\bar{\bar{\eta}}_{rel}$	$0{,}9954 \pm 0{,}0006$	$0{,}9978 \pm 0{,}0007$
$\bar{\eta}^{rel}_{J/\psi}$	$0{,}9871 \pm 0.0003$	$0{,}9871 \pm 0{,}0003$

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis dieser Untersuchung festhalten, dass die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems in den Randbereichen des Detektors abnimmt. Dies wird durch die projektive Verschiebung des MU4-Treffers einer Spur aus der Targetregion gegenüber dem MU3-Treffer erklärt. Für Myonspuren aus Zerfällen J/$\psi \to \mu^+\mu^-$ wird die geometrische Akzeptanz des Myon-Pad-Systems zu etwa 0,66 bestimmt. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für diese Spuren beträgt etwa 0,99 bezogen auf die geometrische Akzeptanz des Pad-Systems. Die Akzeptanz des Pad-Systems für den gesamten Zerfallsprozess beläuft sich auf $0{,}434 \pm 0{,}002$. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für diesen Prozess beträgt $0{,}975 \pm 0{,}006$ relativ zur geometrischen Akzeptanz.

5.3 Untersuchungen zur Latenzzeit des Myon-Pretriggers

Während der Prozessierung durch die Pretriggersysteme und den FLT werden sämtliche Detektordaten in Datenpuffern zwischengespeichert. Die Puffer fassen die Daten von 128 aufeinander folgenden Ereignissen und werden als Ringspeicher fortwährend beschrieben. Wird ein Ereignis vom FLT akzeptiert, sendet das FCS ein Signal zu allen Datenpuffern, um den Transfer der Ereignisdaten zum Second Level Buffer (SLB) zu veranlassen. Die Daten müssen nach spätestens 12,3 μs übertragen werden, da dann die entsprechende Stelle im Puffer mit neuen Detektordaten überschrieben wird. Triggersignale des FLT, die eine bestimmte Latenzzeit überschreiten, werden daher vom FCS verworfen. Dies führt zu einer Ineffizienz des Triggersystems. Daher ist es notwendig, die Latenzzeiten aller Komponenten des Triggersystems möglichst präzise zu ermitteln, um die Gesamtlatenzzeit bis zur Triggerentscheidung des FLT zu bestimmen.

Die Latenzzeit bis zur Auslese der Datenpuffer setzt sich für Myon-Kandidaten aus folgenden Einzelbeiträgen zusammen:

$$\Delta t_{\mathrm{Myon}} = \Delta t_{\mathrm{FEE/FED}} + \Delta t_{\mathrm{Myon-Pre}} + \Delta t_{\mathrm{TFU}}^{\mathrm{Myon}} + \Delta t_{\mathrm{TFU}}^{\mathrm{OTR}} + \Delta t_{\mathrm{TPU/TDU}} + \Delta t_{\mathrm{FCS}} \,. \qquad (5.20)$$

Der Beitrag $\Delta t_{\mathrm{FEE/FED}}$ ist die Differenz zwischen der Zeit der Wechselwirkung am Target und dem Zeitpunkt, an dem die Trefferdaten am Ausgang der FED-Tochterkarten bereit stehen und von den PLBs übernommen werden können. Dieser Beitrag enthält die Flugzeit der Teilchen bis zum Myon-Detektor, die Drift- und Signalanstiegszeiten der Kammern sowie die Zeit für die Verarbeitung der Signale durch das Front-End-Electronic- (FEE-) und das FED-System. Die Latenzzeit des Myon-Pretrigger-Systems $\Delta t_{\mathrm{Myon-Pre}}$ ergibt sich aus dem Zeitbedarf für die Verarbeitung der Daten durch PLB, PCU, PMG und LVDS-MUX sowie für die optische Datenübertragung zwischen PLB und PCU. Für das Pixel-System muss zusätzlich der Zeitbedarf des Pixel Mapping Boards (PMB) berücksichtigt werden. Während Elektron- und High-p_{T}-Kandidaten nur die vier TFU-Lagen des Outer Trackers (OTR) durchlaufen, was dem Beitrag $\Delta t_{\mathrm{TFU}}^{\mathrm{OTR}}$ zur Latenzzeit entspricht, werden Myon-Kandidaten zusätzlich durch drei TFU-Lagen im Myon-System verarbeitet (vgl. Abbildung 2.8). Dadurch vergrößert sich die Latenzzeit des FLT für Myon-Kandidaten um den Beitrag $\Delta t_{\mathrm{TFU}}^{\mathrm{Myon}}$. Schließlich addieren sich noch die Beiträge $\Delta t_{\mathrm{TPU/TDU}}$ für die Prozessierung der Track Parameter Unit (TPU) und der TDU sowie der Zeitbedarf Δt_{FCS} des FCS zur Gesamtlatenzzeit.

Teile des Myon-Pretriggers sowie die Komponenten des FLT verarbeiten die Daten ereignisgetrieben. Der Zeitbedarf für diese Prozessierungsschritte ist daher variabel und kann nicht genau vorhergesagt werden. Die Gesamtlatenzzeit der Pretrigger-Systeme und des FLT wurde daher abgeschätzt [Ger 00a]. Demnach beträgt die minimale Latenzzeit des FCS 1,6 μs, so dass die Latenzzeit der Pretrigger und des FLT zusammen auf maximal 10,7 μs begrenzt ist. Während der Datennahme im Jahr 2000 standen jedoch nur 10,2 μs zur Verfügung, da einige Datenpuffer nur 123 aufeinander folgende Ereignisse speichern konnten. Für Myon-Kandidaten ergab die Abschätzung eine minimale Latenzzeit von 9,8 μs und eine mittlere Latenzzeit von 10,5 μs. Somit liegt die Gesamtlatenzzeit im Bereich der maximal zur Verfügung stehenden Zeit. Aus Daten, die im Jahr 2000 mit dem Myon-Pretrigger und allen Komponenten des FLT selektiert wurden, wurde die Latenzzeit für Myon-Kandidaten bestimmt. Daraus ergab sich, dass etwa 12 % der Myon-Kandidaten bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz wegen einer zu großen Latenzzeit durch das FCS verworfen wurden [HER 00a].

Innerhalb des Myon-Pretrigger-Systems werden die Daten bis zur Ausgabe der Koinzidenzdatensätze aus den Koinzidenz-CPLDs in einem festen zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal verarbeitet. Der Zeitbedarf für diese Verarbeitungsschritte wird durch eine Messung bestimmt. Die weitere Prozessierung ist ereignisgetrieben. Dabei hängt der Zeitbedarf von der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Koinzidenzen ab. Die Latenzzeit des Myon-Pretrigger-Systems vom Einlesen der Trefferdaten durch das PLB bis zur Ausgabe der Triggernachrichten durch den LVDS-MUX wurde zu etwa 1,8 μs abgeschätzt [HER 00a]. Dabei wurde angenommen, dass zu einer Koinzidenz genau eine Triggernachricht erzeugt wird. Eine Übersicht der Latenzzeiten für die einzelnen Komponenten, die der Abschätzung zugrunde liegen, wird in Tabelle 5.20 gegeben.

Tabelle 5.20: *Latenzzeiten für die Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems (nach [HER 00a]). Für die Komponenten, die in einem festen zeitlichen Bezug zum HERA-Taktsignal arbeiten, wurde die Latenzzeit gemessen. Auf der PCU findet mit der Ausgabe der Koinzidenzdaten der Übergang zur ereignisgetriebenen Verarbeitung statt. Der Zeitbedarf für diese Prozessierungsschritte auf der PCU und auf dem PMG aus den Taktraten der Schaltungen berechnet. Es wird dabei angenommen, dass eine Koinzidenz verarbeitet und genau eine Triggernachricht erzeugt wird.*

Komponente	Δt	Bemerkung
PLB	300 ns	gemessen
54 m optische Faser	260 ns	gemessen
PCU	700 ns	gemessen / berechnet
PMG	300 ns	berechnet
LVDS-MUX	230 ns	gemessen
Gesamt	1,79 μs	

Wie in Abschnitt 4.1.6 dargelegt, ermöglicht es das Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger, die Funktion der ereignisgetriebenen Prozessierungsschritte detailliert nachzubilden und somit den Zeitbedarf für diese Schritte zu bestimmen. Im Folgenden werden Resultate von Untersuchungen zur Latenzzeit des Myon-Pretrigger-Systems präsentiert, die unter Verwendung des Simulationsprogrammes erzielt wurden.

Die durch die Simulation ermittelten Verteilungen der Latenzzeiten der Triggernachrichten werden mit gemessenen Latenzzeitverteilung verglichen. Dabei werden unterschiedliche LUT-Parametrisierungen des Myon-Pretriggers betrachtet. Desweiteren wird die Abhängigkeit der Latenzzeit der Triggernachrichten des Myon-Pretriggers von der Wechselwirkungsrate am Target untersucht.

5.3.1 Bestimmung der Latenzzeit der Triggernachrichten

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Latenzzeiten der Triggernachrichten des Myon-Pretrigger-Systems aus den aufgezeichneten Daten ermittelt werden können. Zudem wird beschrieben, wie der Vergleich mit den Latenzzeiten durchgeführt wird, die durch das Simulationsprogramm bestimmt werden.

Während der Datennahme bestimmt die TDU für jeden Spurkandidaten die Differenz zwischen der BX-Nummer, die aktuell vom FCS verteilt wird, und der BX-Nummer, die Teil der empfangenen Triggernachricht ist. Diese Zeitdifferenz in Einheiten von Bunch Crossings (BX) wird im FLT-Datenblock mit abgespeichert und als Parameter $BXDIFF$ bezeichnet. Der Parameter $BXDIFF$ dient dazu, für vom FLT akzeptierte Ereignisse die Position der zwischengespeicherten Ereignisdaten im Datenpuffer zu bestimmen. Die in einer Nachricht des Myon-Pretriggers enthaltene BX-Nummer ist diejenige, die das PLB vom FCS zum Zeitpunkt empfängt, an dem die Trefferdaten vom FED-System übernommen werden. Der Wert von $BXDIFF$ entspricht daher der Summe der Latenzzeiten des Myon-Pretrigger-Systems und der nachfolgenden FLT-Komponenten, einschließlich der TDU.

Das Simulationsprogramm ermittelt den Zeitbedarf für die ereignisgetriebenen Prozessierungsschritte. Um einen Vergleich mit den aus den Daten gewonnenen Latenzzeitverteilungen durchführen zu können, werden die in Tabelle 5.21 aufgeführten Beiträge für die übrige Prozessierung auf dem Pretrigger sowie die Übertragung der Nachrichten zur TDU hinzuaddiert. Der Zeitbedarf für die Prozessierungsschritte vor der Serialisierung der Koinzidenzdaten auf

Tabelle 5.21: *Beiträge zur Latenzzeit für die Simulation des Myon-Pretrigger-Systems. Durch das Simulationsprogramm wird der Zeitbedarf für die ereignisgetriebenen Prozessierungsschritte ermittelt, d. h. von der Serialisierung der Koinzidenzdaten auf der PCU bis zur Ausgabe der LUT-Daten auf dem PMG. Hinzuaddiert wird der gemessene Zeitbedarf für die Prozessierung des PLBs und für die optische Übertragung der Daten bis zur Zwischenspeicherung in den Dual Ported RAMs (DPR) auf der PCU. Die Zeit bis zur Auslese der Daten aus den DPRs und für die Prozessierung im Koinzidenz-CPLD wird aus der Zahl der Pipelinestufen und der mittleren Taktrate berechnet. Schließlich wird noch der Beitrag addiert, der den Zeitbedarf aller Verarbeitungsschritte nach der Ausgabe der LUT-Daten zusammenfasst, beginnend mit der Schnittstelle zur Übertragung der Triggernachrichten auf dem PMG bis einschließlich der TDU.*

Beitrag	Δt	Bemerkung
PLB - PCU (DPR)	560 ns	Messung [Cru 01b]
PCU (DPR) - PCU (Ausgang CPLD)	435 ns	Synchronisierung und sechs Pipelinestufen
PCU (Serialisierung) - PMG (LUT)	variabel	Simulation
PMG (Transmitter) - TDU	variabel	von Triggerkonfiguration abhängig

der PCU wurde gemessen bzw. kann aus der Zahl der Pipelinestufen und der mittleren Taktrate berechnet werden. Das Simulationsprogramm bestimmt die Zeit, die benötigt wird, um die Koinzidenzdaten zu serialisieren, zum PMG zu übertragen und die Triggernachrichten auf dem PMG zu erzeugen. Der Zeitbedarf für die Übertragung der Triggernachrichten vom PMG bis zur TDU hängt von der Konfiguration des Triggersystems ab und kann für eine gegebene Konfiguration durch die Angaben in [Ger 00a] abgeschätzt werden.

5.3.2 Latenzzeit des Myon-Pretriggers für unterschiedliche LUT-Parametrisierungen

Beim Betrieb des Myon-Pretriggers in unterschiedlichen Konfigurationen des HERA – B Triggersystems werden angepasste Parametrisierungen der LUTs zur Erzeugung der Triggernachrichten eingesetzt. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, wird eine als „PHYS_MM“ bezeichnete Parametrisierung verwendet, wenn die Triggernachrichten des Myon-Pretriggers vom FLT verarbeitet werden. Diese Parametrisierung sieht vor, dass mehrere Nachrichten zu einer Koinzidenz erzeugt werden können. Werden die Nachrichten des Myon-Pretriggers direkt zum SLT gesendet, so wird die „PHYS_SM“-Parametrisierung der LUTs eingesetzt. In diesem Fall wird zu einer Koinzidenz stets genau eine Triggernachricht generiert. Es ist zu erwarten, dass die „PHYS_MM“- im Vergleich zur „PHYS_SM“-Parametrisierung im Mittel größere Latenzzeiten der Triggernachrichten zur Folge hat, da zum einen zur Erzeugung der Mehrfachnachrichten jeweils 40 ns benötigt werden und zum anderen auf dem PMG ein Koinzidenzdatensatz solange im Datenpuffer vor der LUT gehalten wird, bis alle zugehörigen Triggernachrichten erzeugt und ins FIFO nach der LUT übertragen sind. Während dieser Zeit können keine Daten innerhalb der Pipeline des PMGs weitertransportiert werden und – falls sich Koinzidenzdaten im Eingangsregister des PMGs befinden – auch keine Daten von den Koinzidenz-Kanälen der angeschlossenen PCUs empfangen werden.

Für beide Parametrisierungen wird aus aufgezeichneten Daten die Verteilung der Latenzzeiten der Triggernachrichten bestimmt. Diese wird mit einer Verteilung verglichen, die sich aus einer Simulation des Myon-Pretriggers ergibt. Die für diese Untersuchung verwendeten Datensätze enthalten Ereignisse, die durch einen Triggeralgorithmus selektiert wurden, der auf dem SLT ausgeführt wurde und die Funktion des Myon-Pretriggers emulierte. Die Triggernachrichten des Myon-Pretrigger-Systems wurden während der Datennahme durch Komponenten des FLT, der im transparenten Modus betrieben wurde, bis zur TDU übertragen und im FLT-Datenblock den Ereignisdaten hinzugefügt. Diese Konfiguration des Triggersystems ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt. In Tabelle 5.22 sind einige Angaben zu den verwendeten Datensätzen zusammengefasst. Für die „PHYS_SM“-Parametrisierung werden die

Tabelle 5.22: *Zur Untersuchung der Latenzzeit verwendete Datensätze.*

Run	Datum	Target-Rate [MHz]	LUT-Typ	Zahl der Ereignisse	Zahl der Triggernachrichten
15 424	29.5.2000	5	PHYS_SM	500 739	197 403
17 04x	14.8.2000	5	PHYS_SM	506 109	477 561
17 200	21.8.2000	5	PHYS_MM	309 897	895 219

Datensätze der Runs 15 424 und 17 04x verwendet, die bereits zur Bestimmung der Effizienz des Pretriggers untersucht wurden. Für Run 17 200 wurden LUTs mit der „PHYS_MM“-Parametrisierung eingesetzt, während die Konfiguration des Triggersystems und die Wechselwirkungsrate am Target mit denen der anderen Datensätze identisch waren.

Da der SLT-Triggeralgorithmus zur Ereignisselektion verwendet wurde, enthalten diese Datensätze zu einem großen Teil Ereignisse, in denen wenigstens eine Koinzidenz im Pad-System vorliegt. Werden diese Datensätze durch das Simulationsprogramm verarbeitet, so ist die Koinzidenzrate um mehr als einen Faktor zehn höher als diejenige, die das reale System zu verarbeiten hatte. Ein Vergleich der Latenzzeiten unter diesen Bedingungen wäre nicht sinnvoll. Daher werden für die Simulation des Myon-Pretriggers nach der Monte-Carlo-Methode erzeugte Minimum Bias Ereignisse (engl.: minimale Verzerrung) als Eingangsdaten verwendet. Für den Vergleich mit aufgezeichneten Daten ist es wichtig, bei der Verarbeitung der Monte-Carlo-Ereignisse die Wechselwirkungsrate nachbilden zu können, bei der die Datennahme erfolgte. Dies wird durch die Überlagerung mehrerer Monte-Carlo-Ereignisse erreicht. Diese Methode beruht auf der Annahme, dass die Zahl der Wechselwirkungen am Target pro Ereignis durch eine Poisson-Verteilung beschrieben wird. Die Wahrscheinlichkeit für N Wechselwirkungen ist demnach durch

$$P(N;\lambda) = \frac{\lambda^N}{N!} \cdot \mathrm{e}^{-\lambda} \tag{5.21}$$

gegeben. Dabei ist λ die mittlere Zahl von Wechselwirkungen pro Ereignis. Sei R_{WW} die beobachtete mittlere Wechselwirkungsrate am Target, dann gilt folgender Zusammenhang

$$R_{\mathrm{WW}} = \lambda \cdot R_{\mathrm{p}} = \lambda \cdot \frac{180}{220} \cdot R_{\mathrm{HERA}} \; . \tag{5.22}$$

R_{p} ist die mittlere Rate, mit der gefüllte Protonbunche das Target des HERA – B Experimentes kreuzen. Diese ergibt sich aus der HERA-Taktrate $R_{\mathrm{HERA}} = 10{,}4\,\mathrm{MHz}$ und dem Anteil der mit Protonen gefüllten Bunche, der 180 von 220 beträgt. Um eine beliebige Wechselwirkungsrate bei der Verarbeitung von Monte-Carlo-Ereignissen nachzubilden, wird zunächst aus Gleichung (5.22) die entsprechende mittlere Zahl von Wechselwirkungen λ bestimmt. Beim Ablauf des ARTE-Programms zur Prozessierung der Daten werden dann einzelne Monte-Carlo-Ereignisse mit jeweils genau einer inelastischen Wechselwirkung gemäß einer Poisson-Verteilung mit dem Mittelwert λ überlagert. Dabei werden im normalen Programmablauf Ereignisse ohne eine Wechselwirkung, d. h. der Fall $N = 0$, unterdrückt, indem die Ereignisroutinen nicht aufgerufen werden. Vor allem für niedrige Wechselwirkungsraten muss jedoch für eine realistische Simulation zur Bestimmung der Latenzzeit der Anteil der Ereignisse ohne inelastische Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Für eine mittlere Wechselwirkungsrate von 5 MHz – entsprechend $\lambda = 0{,}59$ – beträgt z. B. der Anteil der Ereignisse ohne eine inelastische Wechselwirkung $P(0; 0{,}59) \approx 0{,}55$. Bei der Simulation zur Bestimmung der Latenzzeit werden daher unter Verwendung eines Zufallszahlengenerators zusätzliche Aufrufe der Simulationsroutinen entsprechend dem Anteil der Ereignisse ohne inelastische Wechselwirkungen durchgeführt.

In Abbildung 5.22 sind die Verteilungen der Latenzzeiten für die beiden unterschiedlichen LUT-Parametrisierungen gezeigt. Dazu werden aus den aufgezeichneten Daten alle Nachrichten des Myon-Pretriggers ausgelesen und der Wert des Parameters $BXDIFF$ dargestellt. Somit entsprechen die gezeigten Latenzzeiten der Summe der Latenzzeiten des Myon-Pretrigger-Systems und der nachfolgenden Komponenten bis zur TDU.

Für die Monte-Carlo-Ereignisse wird zunächst zu der Latenzzeit für die ereignisgetriebenen Prozessierungsschritte, die mit dem Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger bestimmt werden, der bekannte Zeitbedarf für die Prozessierungsstufen bis zur Ausgabe der Koinzidenzdaten aus dem CPLD auf der PCU hinzuaddiert. Um einen Vergleich mit den aus dem Parameter $BXDIFF$ bestimmten Latenzzeiten zu ermöglichen, muss zu diesem Wert noch der

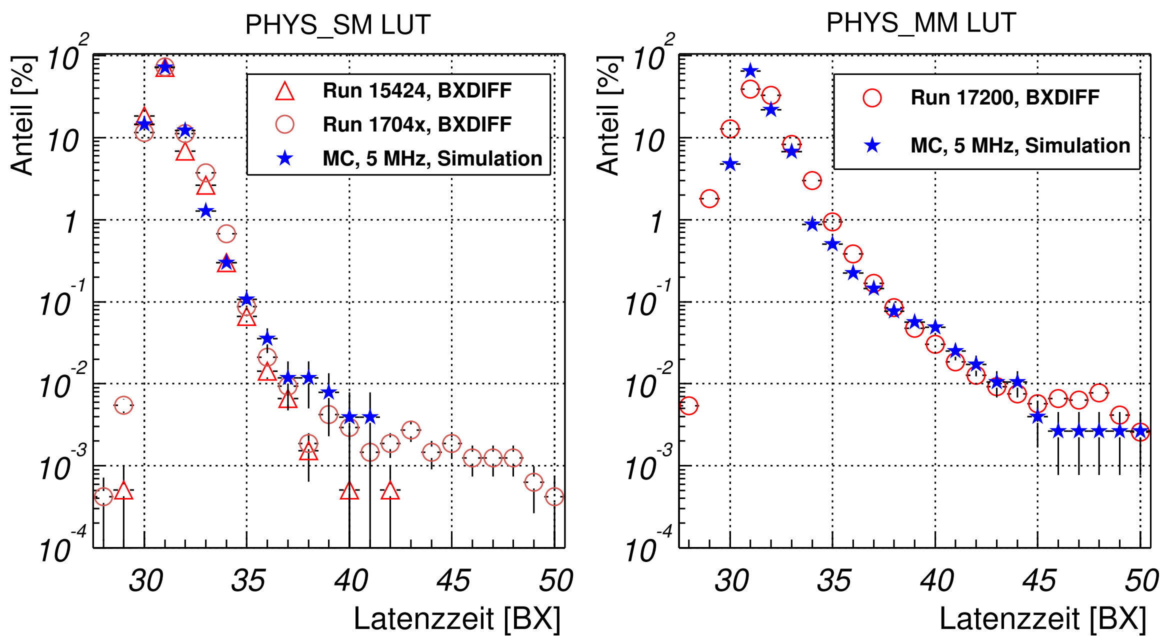


Abbildung 5.22: *Latenzzeitverteilungen für LUT-Parametrisierungen des Typs „PHYS_SM" (links) und „PHYS_MM" (rechts). Dargestellt ist der Anteil der Triggernachrichten mit der jeweiligen Latenzzeit, die in Einheiten von Bunch Crossings (BX) angegeben wird. Aus den aufgezeichneten Daten wird die Latenzzeit aus dem Parameter $BXDIFF$ bestimmt, der in den Triggernachrichten enthalten ist. Für beide Parametrisierungen ist zudem eine Latenzzeitverteilung für Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignisse gezeigt, die durch die Simulation des Myon-Pretriggers bestimmt wird. Für die Runs 17 04x und 17 200 gibt es einen Untergrund von Triggernachrichten mit Latenzzeiten, die flach über den gesamten möglichen Wertebereich verteilt sind. Dies geht vermutlich auf eine Fehlfunktion in der Triggerelektronik zurück. Der Anteil dieser Triggernachrichten liegt im Bereich von etwa* 10^{-3} % *pro Latenzzeitwert.*

Zeitbedarf $\Delta t_{PMG-TDU}$ für die Übertragung der Triggernachrichten vom PMG bis zur TDU hinzugerechnet werden. Dieser Zeitbedarf ist von der Konfiguration des Triggersystems und von der Zahl der Triggernachrichten pro Ereignis abhängig und kann nicht genau vorhergesagt werden. Daher werden die durch die Simulation bestimmten Latenzzeiten um einen konstanten Betrag erhöht, so dass der Modalwert der um diesen Wert verschobenen Verteilung mit dem Modalwert der aus $BXDIFF$ bestimmten Latenzzeitverteilung übereinstimmt. Für die in Abbildung 5.22 gezeigten Latenzzeitverteilungen für Monte-Carlo-Ereignisse, die durch die Simulation des Myon-Pretriggers bestimmt wurden, wird ein Wert von $\Delta t_{PMG-TDU} = 1680\,\text{ns}$ verwendet. Dieser Wert steht in Einklang mit der Summe der mittleren Latenzzeiten, die in [Ger 00a] für die Komponenten angegeben wurden, die zur Übertragung der Triggernachrichten eingesetzt wurden. Dort wurde für den Transfer der Nachrichten ein Zeitbedarf von insgesamt etwa 1720 ns ermittelt.

Die Gesamtzahl der Triggernachrichten für die Monte-Carlo-Ereignisse ist deutlich geringer als für die aufgezeichneten Daten. Daher werden die Verteilungen skaliert, indem durch die

Gesamtzahl der Einträge in dem jeweiligen Histogramm dividiert wird. Somit ist die Summe der Einträge der in Abbildung 5.22 gezeigten Verteilungen auf 100 % normiert, und die Einträge entsprechen dem Anteil der Triggernachrichten mit einer bestimmten Latenzzeit.

Abbildung 5.22 ist zu entnehmen, dass die Simulation des Myon-Pretrigger-Systems unter Verwendung von Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignissen die Verteilungen der gemessenen Latenzzeiten für beide LUT-Konfigurationen gut beschreibt. Daraus lässt sich schließen, dass für die Konfiguration mit einem transparenten FLT die Verteilung der Latenzzeiten im Wesentlichen durch den Pretrigger bestimmt wird, da in der Simulation nur dessen Prozessierungsschritte nachgebildet sind und zu unterschiedlichen Latenzzeiten führen. Für die „PHYS_SM“-Konfiguration sind in Tabelle 5.23 die mittleren Latenzzeiten der Triggernachrichten für die verschiedenen Datensätze aufgeführt. Zudem enthält die Tabelle Angaben, für welchen Anteil der Triggernachrichten die Latenzzeit innerhalb bestimmter Intervalle liegt.

Tabelle 5.23: *Mittlere Latenzzeit und Anteile der Triggernachrichten mit Latenzzeiten in bestimmten Intervallen für die „PHYS_SM“-Konfiguration.*

	Run 15 424	Run 17 04x	Simulation
mittlere Latenzzeit [BX]	$30{,}951 \pm 0{,}001$	$31{,}182 \pm 0{,}005$	$30{,}939 \pm 0{,}004$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 32\,\text{BX}$	$(97{,}00 \pm 0{,}04)\,\%$	$(95{,}43 \pm 0{,}03)\,\%$	$(98{,}25 \pm 0{,}08)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 33\,\text{BX}$	$(99{,}612 \pm 0{,}013)\,\%$	$(99{,}190 \pm 0{,}012)\,\%$	$(99{,}519 \pm 0{,}043)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 38\,\text{BX}$	$(99{,}999 \pm 0{,}001)\,\%$	$(99{,}990 \pm 0{,}001)\,\%$	$(99{,}984 \pm 0{,}008)\,\%$

Für die „PHYS_MM“-Konfiguration sind diese Angaben in der Tabelle 5.24 zusammengefasst. Die ersten beiden Latenzzeitintervalle liegen etwa symmetrisch um den Modalwert der

Tabelle 5.24: *Mittlere Latenzzeit und Anteile der Triggernachrichten mit Latenzzeiten in bestimmten Intervallen für die „PHYS_MM“-Konfiguration.*

	Run 17 200	Simulation
mittlere Latenzzeit [BX]	$31{,}877 \pm 0{,}008$	$31{,}393 \pm 0{,}003$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 32\,\text{BX}$	$(86{,}96 \pm 0{,}04)\,\%$	$(91{,}20 \pm 0{,}10)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 33\,\text{BX}$	$(95{,}24 \pm 0{,}02)\,\%$	$(97{,}98 \pm 0{,}05)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 38\,\text{BX}$	$(99{,}835 \pm 0{,}004)\,\%$	$(99{,}802 \pm 0{,}016)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 45\,\text{BX}$	$(99{,}967 \pm 0{,}002)\,\%$	$(99{,}975 \pm 0{,}006)\,\%$

Latenzzeitverteilungen.

Die mittlere Latenzzeit der Triggernachrichten liegt bei Verwendung der „PHYS_MM“-Konfiguration im Vergleich zur „PHYS_SM“-Konfiguration um etwa eine halbe BX-Einheit höher. Werden „PHYS_MM“-LUTs eingesetzt, so werden zu einer Koinzidenz praktisch immer drei

Nachrichten erzeugt. Um zu demselben Koinzidenzdatensatz eine weitere Nachricht zu generieren, benötigt der PMG jeweils 40 ns, also ungefähr eine halbe BX-Einheit. Somit geht die beobachtete Erhöhung der mittleren Latenzzeit im Wesentlichen darauf zurück, dass zu einer Koinzidenz drei Triggernachrichten statt einer erzeugt werden.

Die Latenzzeitverteilungen für die „PHYS_MM"-Konfiguration fallen oberhalb des Modalwertes weniger schnell ab und besitzen Ausläufer zu größeren Latenzzeitwerten als die Verteilungen für die „PHYS_SM"-Konfiguration.

5.3.3 Untersuchung der Abhängigkeit der Latenzzeit von der Wechselwirkungsrate

Mit Hilfe des Simulationsprogramms für den Myon-Pretrigger wird der Einfluss der Wechselwirkungsrate am Target auf die Latenzzeiten der Triggernachrichten untersucht. Dazu werden Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignisse verwendet. Um unterschiedliche Wechselwirkungsraten nachzubilden, werden mehrere inelastischen Proton-Nukleon-Wechselwirkungen überlagert. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz beträgt die Koinzidenzrate für das Pad-System mehr als 500 kHz [Sch 01] und übersteigt die maximale Eingangsrate des SLT etwa um eine Größenordnung. Daher ist eine Erhöhung der Wechselwirkungsrate nur dann von Nutzen, wenn der FLT eingesetzt wird. Aus diesem Grund wird diese Studie mit der „PHYS_MM"-Parametrisierung der LUTs durchgeführt, die beim Betrieb des Myon-Pretriggers zusammen mit dem FLT verwendet wird.

In Abbildung 5.23 sind die Latenzzeitverteilungen für die Triggernachrichten des Myon-Pretriggers im Pad-System für Wechselwirkungsraten von 5 MHz, 20 MHz und 40 MHz gezeigt. Bei höheren Wechselwirkungsraten nimmt der Anteil der Triggernachrichten mit größeren Latenzzeitwerten zu. Eine Erhöhung der Wechselwirkungsrate führt zu einer ansteigenden Koinzidenzrate des Myon-Pretrigger-Systems [Sch 01]. Infolgedessen ist eine im Mittel größere Latenzzeit der Triggernachrichten zu erwarten, denn mit ansteigender Koinzidenzrate nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass pro Ereignis mehrere Koinzidenzen auf acht benachbarten PCU-Kanälen auftreten, die jeweils mit einem PMG verbunden sind, der die Triggernachrichten sequentiell erzeugt. Ebenso steigt die Wahrscheinlichkeit, dass auf einem Koinzidenzkanal in aufeinander folgenden Ereignissen Koinzidenzen auftreten. Dadurch nimmt insgesamt die Wahrscheinlichkeit zu, dass sich durch Rückkopplungen zwischen den Schaltungen auf der PCU und dem PMG, die die Koinzidenzdaten verarbeiten und die Erzeugung der Triggernachrichten kontrollieren, ein erhöhter Zeitbedarf für die Prozessierung durch den Myon-Pretrigger ergibt.

In Tabelle 5.25 sind die Mittelwerte der in Abbildung 5.23 gezeigten Latenzzeitverteilungen aufgeführt. Außerdem sind die Anteile der Triggernachrichten angegeben, deren Latenzzeiten innerhalb bestimmter Intervalle liegen. Während die mittlere Latenzzeit mit zunehmender Wechselwirkungsrate nur geringfügig anwächst, steigen die Anteile der Triggernachrichten mit Latenzzeiten deutlich oberhalb des Modalwertes.

Wie zu Beginn des Abschnitts dargelegt, liegt die Gesamtlatenzzeit für Myon-Kandidaten im Bereich der Zeit, die bis zur Triggerentscheidung des FLT maximal zur Verfügung steht. Daher wird untersucht, wie sich Triggernachrichten mit großen Latenzzeiten nach der Prozessierung durch den Myon-Pretrigger auf den Anteil der Ereignisse auswirken, die vom FCS wegen einer

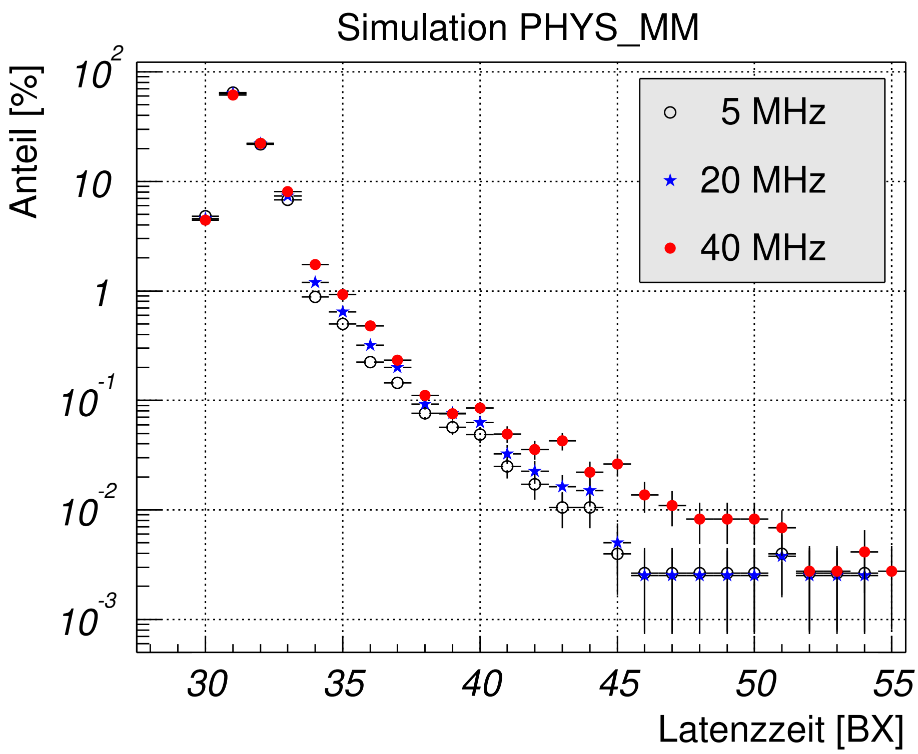


Abbildung 5.23: *Latenzzeitverteilungen für unterschiedliche Wechselwirkungsraten, die durch Überlagerung mehrerer inelastischer Wechselwirkungen simuliert werden. Die Latenzzeit für die ereignisgetriebenen Prozessierungsschritte wird durch die Simulation des Myon-Pretriggers ermittelt. Zu diesen Werten wird ein konstanter Betrag addiert, um den Zeitbedarf für die gesamte Prozessierung des Pretriggers und die Übertragung der Triggernachrichten zur TDU zu berücksichtigen, wie es in Abschnitt 5.3.2 beschrieben wird. Für die hier gezeigten Verteilungen wird der gleiche konstante Zeitwert addiert wie für die durch die Simulation bestimmten Verteilungen in Abbildung 5.22.*

zu großen Gesamtlatenzzeit verworfen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Komponenten des FLT ereignisgetrieben arbeiten. Um für jedes Ereignis einen realistischen Wert für den Zeitbedarf der gesamten Prozessierung durch den FLT bestimmen zu können, wird eine Simulation des FLT benötigt. Diese steht jedoch für die hier vorgestellte Untersuchung nicht zur Verfügung. Daher wird im Folgenden vereinfachend ein konstanter Zeitbedarf für die Prozessierung der Triggernachrichten durch den FLT angenommen.

Der Myon-Pretrigger wird im HERA – B Experiment meist in einer Triggerkonfiguration eingesetzt, in der Ereignisse mit mindestens zwei Myon-Kandidaten selektiert werden. Damit in dieser Konfiguration ein Ereignis durch das FCS akzeptiert wird, muss die TDU zwei Triggernachrichten, die vom Myon-Pretrigger ausgehen, innerhalb der maximal erlaubten Latenzzeit empfangen. Überschreitet die Latenzzeit der ersten oder zweiten an der TDU ankommenden Nachricht die vorgegebene Schwelle, so wird das Ereignis verworfen. Die Latenzzeit weiterer

Tabelle 5.25: *Mittlere Latenzzeit und Anteile der Triggernachrichten mit Latenzzeiten in bestimmten Intervallen für unterschiedliche Wechselwirkungsraten. Die Angaben beziehen sich auf die in Abbildung 5.23 gezeigten Latenzzeitverteilungen.*

	5 MHz	20 MHz	40 MHz
mittlere Latenzzeit [BX]	$31{,}394 \pm 0{,}003$	$31{,}440 \pm 0{,}004$	$31{,}520 \pm 0{,}004$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 32\,\text{BX}$	$(91{,}20 \pm 0{,}10)\,\%$	$(89{,}92 \pm 0{,}11)\,\%$	$(88{,}03 \pm 0{,}12)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 33\,\text{BX}$	$(97{,}98 \pm 0{,}05)\,\%$	$(97{,}30 \pm 0{,}06)\,\%$	$(96{,}09 \pm 0{,}07)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 38\,\text{BX}$	$(99{,}80 \pm 0{,}02)\,\%$	$(99{,}75 \pm 0{,}02)\,\%$	$(99{,}59 \pm 0{,}02)\,\%$
$29\,\text{BX} \leq \Delta t \leq 45\,\text{BX}$	$(99{,}97 \pm 0{,}01)\,\%$	$(99{,}98 \pm 0{,}01)\,\%$	$(99{,}93 \pm 0{,}01)\,\%$

Triggernachrichten innerhalb eines Ereignisses hat keinen Einfluss auf die Entscheidung des FCS. Daher wird in dieser Studie der Anteil der Ereignisse bestimmt, für die die Latenzzeit der ersten oder zweiten Triggernachricht des Myon-Pretriggers einen gewissen Schwellenwert oberhalb des Modalwertes der Latenzzeitverteilung überschreitet. Dieser Schwellenwert wird aus einer gemessenen Latenzzeitverteilung für Myon-Kandidaten bestimmt. Während der Inbetriebnahme des FLT im Jahr 2000 wurde eine Messung durchgeführt, um die Latenzzeit für die gesamte Triggerkette, bestehend aus dem Myon-Pretrigger und sämtlichen Komponenten des FLT, zu ermitteln. Dazu wurden die Triggernachrichten für Myon-Kandidaten aus dem FLT-Datenblock ausgelesen. Die Verteilung der Werte des Parameters $BXDIFF$ für diese Nachrichten dient, wie weiter oben bereits erläutert, als Maß für die gesamte Latenzzeit des Pretriggers und des FLT. Die gemessene Verteilung der $BXDIFF$-Werte für die Triggernachrichten, die von der TDU jeweils als erste eines Ereignisses empfangen wurden, besitzt ihren Modalwert bei einer Latenzzeit von 95 BX. Das FCS akzeptierte in der zur Datennahme verwendeten Konfiguration ein Ereignis nur dann, falls die Latenzzeit der zuerst empfangenen Triggernachricht maximal 102 BX betrug. [HER 00a].

Der Modalwert der durch die Simulation ermittelten Latenzzeitverteilungen liegt bei 31 BX. Daher wird als Schwellenwert eine Latenzzeit von 38 BX festgelegt, so dass die Differenz zum Modalwert der Verteilung den gleichen Wert besitzt wie während der oben beschriebenen Messung. In Tabelle 5.26 ist der Anteil der Ereignisse angegeben, für die die Latenzzeit der ersten oder zweiten Triggernachricht oberhalb dieses Schwellenwertes liegen. Der Anteil der Ereignisse, die unter den hier gemachten Annahmen aufgrund einer zu großen Latenzzeit des Myon-Pretriggers verworfen werden, zeigt einen Anstieg für zunehmende Wechselwirkungsraten. Dabei beträgt der Anteil der verworfenen Ereignisse maximal $(1{,}8 \pm 0{,}8) \cdot 10^{-4}$ bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz. Wie zu Beginn des Abschnitts erwähnt, ergab eine Untersuchung mit aufgezeichneten Daten, dass etwa 12 % der Myon-Kandidaten bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz wegen einer zu großen Latenzzeit durch das FCS verworfen wurden. Durch den Beitrag der ereignisgetriebenen Prozessierung durch den FLT kommt es zu einer Verbreiterung der Verteilung der Gesamtlatenzzeit für Myon-Kandidaten [HER 00a]. Dabei steigt der Anteil der Nachrichten, deren Latenzzeit oberhalb der FCS-Schwelle liegt. Da für etwa 99 % der Triggernachrichten die Latenzzeit nach der Prozessierung durch den Myon-Pretrigger maximal drei BX-Einheiten oberhalb des Modalwertes der Verteilung liegt, kann

Tabelle 5.26: *Anteile der Ereignisse mit Latenzzeiten der ersten oder zweiten Triggernachricht oberhalb eines festgelegten Schwellenwertes. Die Angaben beziehen sich auf die in Abbildung 5.23 gezeigten Latenzzeitverteilungen. Der Schwellenwert der Latenzzeit liegt bei* 38 BX. *Unter Annahme eines konstanten mittleren Zeitbedarfs aller FLT-Komponenten stellt dies eine Abschätzung des Anteils von Ereignissen dar, die aufgrund einer zu großen Latenzzeit des Myon-Pretriggers vom FCS verworfen werden, da die Gesamtlatenzzeit nach der Prozessierung durch den FLT die vorgegebene Schwelle überschreitet.*

	5 MHz	20 MHz	40 MHz
Anteil	$< 1{,}7 \cdot 10^{-5}$ (95 % CL)	$(1{,}6 \pm 1{,}6) \cdot 10^{-5}$	$(1{,}8 \pm 0{,}8) \cdot 10^{-4}$

der Verlust an Nachrichten oberhalb der FCS-Schwelle im Wesentlichen auf die starke Verbreiterung der Latenzzeitverteilung nach der Prozessierung durch den FLT zurückgeführt werden. Um diese Effekte und auch mögliche Korrelationen der Latenzzeiten des Myon-Pretriggers und des FLT zu untersuchen, wird eine Simulation des FLT benötigt, die es erlaubt, den Zeitbedarf der Prozessierung für jede Triggernachricht zu bestimmen.

5.4 Studien zu einem RICH-Multiplizitäts-Veto-System

Ereignisse mit hoher Treffermultiplizität können zu einer Blockierung von Komponenten der Pretrigger-Systeme und des FLT führen, indem Triggernachrichten gehäuft erzeugt und durch das Netzwerk der Triggerprozessoren versendet werden. An verschiedenen Stellen der ereignisgetriebenen Datenprozessierung durch die Pretrigger-Systeme und den FLT findet eine Datenkonzentration durch Serialisierungsstufen sowie eine sequentielle Verarbeitung der Daten in Pipelinestufen statt. Durch eine starke Anhäufung von Triggernachrichten kann es dazu kommen, dass sich Daten an diesen Stellen aufstauen, wodurch sich der Zeitbedarf für die Verarbeitung der Triggernachrichten erhöht. Übersteigt die Gesamtlatenzzeit für die Verarbeitungsstufen der Pretrigger-Systeme und der Komponenten des FLT einen vorgegebenen Wert, so wird ein Triggersignal des FLT vom FCS verworfen, da die in den FED-Systemen zwischengespeicherten Ereignisdaten bereits vor der Auslese mit neuen Daten überschrieben wären. Somit können Ereignisse mit hoher Treffermultiplizität zu einer Ineffizienz der ersten Triggerstufe führen.

Die ECAL Energy Inhibit Card (ECAL EIC) wurde konzipiert, um die Verarbeitung von Ereignissen mit hoher Treffermultiplizität innerhalb der Triggerkette möglichst frühzeitig zu beenden. Dazu generiert die ECAL EIC ein Veto-Signal, falls die Summe der in den Zellen des inneren Bereiches des elektromagnetischen Kalorimeters (ECAL) nachgewiesenen Energiewerte eine einstellbare Schwelle überschreitet. Das Veto-Signal wird zusammen mit der Bunch Crossing Number (BX-Nummer) des Ereignisses an die Pretrigger-Systeme verteilt. Wie in Abschnitt 3.1.3 erläutert, gelangen diese Signale über ein Verteilersystem [Rie 98] und die PMGs zu den PCUs des Myon-Pretrigger-Systems. Ist das Veto-Signal für ein Ereignis gesetzt, markieren die Koinzidenz-CPLDs auf der PCU alle Koinzidenzdaten, die in die Auffang-FIFOs geschrieben werden, als ungültig. Daraufhin werden diese Koinzidenzen nicht weiter prozessiert, so dass für das betreffende Ereignis keine Triggernachrichten zum FLT gesendet werden.

Die ECAL EIC befindet sich in der Entwicklungs- und Testphase. Für die Datennahme im HERA – B Experiment stand sie bisher noch nicht zur Verfügung. Neben dem ECAL kommen weitere Subdetektoren des HERA – B Experimentes als Quellen eines Multiplizitäts-Veto-Signals in Betracht. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie werden Treffermultiplizitäten in verschiedenen Subdetektoren für verschiedene Datensätze untersucht [Ada 01a, Ada 01c]. Dabei werden Korrelationen der Multiplizitäten in den Subdetektoren betrachet und der Effekt eines auf unterschiedlichen Subdetektoren basierenden Multiplizitäts-Vetos untersucht.

Die Untersuchung wird mit den folgenden Datensätzen durchgeführt:

1. Ein Datensatz mit etwa 166 000 vorselektierten Ereignissen wird verwendet, die im Laufe der Datennahme im Jahr 2000 mit dem aus Myon-Pretrigger und SLT bestehenden Myonpaar-Trigger angesammelt wurden. Die Daten wurden bei einer mittleren Wechselwirkungsrate am Target von 5 MHz aufgezeichnet. Innerhalb dieses Datensatzes werden 1531 Ereignisse identifiziert, die Kandidaten für den Zerfallsprozess $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ darstellen [Hus 01a].

2. Ein weiterer Datensatz wird analysiert, der bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz mit einem Random Trigger aufgenommen wurde und ca. 180 000 Ereignisse beinhaltet.

3. Zusätzlich werden die Treffermultiplizitäten für Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignisse untersucht. Durch die Überlagerung mehrerer inelastischer Proton-Nukleon-Wechselwirkungen werden verschiedene Wechselwirkungsraten am Target nachgebildet. Ein Datensatz mit etwa 53 000 Ereignissen bei einer simulierten Wechselwirkungsrate von 10 MHz und ein weiterer mit etwa 35 000 Ereignissen bei 20 MHz werden verwendet.

Für alle Datensätze wird

- eine vollständige Rekonstruktion für das ECAL und
- eine partielle Rekonstruktion für das Ring Imaging Cherenkov Hodoscope (RICH), den Outer Tracker (OTR) und das Myon-System durchgeführt. Hierbei werden aus den aufgezeichneten Rohdaten bzw. für die Monte-Carlo-Datensätze die getroffenen Detektorkanäle in diesen Subdetektoren ermittelt.

Somit stehen für jedes Ereignis Informationen über die im ECAL nachgewiesenen Energiedepositionen sowie über die Treffermultiplizitäten in den genannten Subdetektoren zur Verfügung.

Im Rahmen dieser Studie werden verschiedene Detektorkomponenten betrachtet. Diese sind in Tabelle 5.27 aufgeführt. Dabei ist auch erläutert, welche Größe als Maß für die Multiplizität der jeweiligen Komponente verwendet wird.

Tabelle 5.27: *Zur Untersuchung der Treffermultiplizitäten betrachtete Detektorkomponenten.*

Komponente	Erläuterung
ECAL	Summe der nachgewiesenen Energiedepositionen im inneren Kalorimeter; dies entspricht den Eingangsdaten der ECAL EIC
RICH	Gesamtzahl der Treffer im RICH
RICH FED 9+10	Gesamttrefferzahl in zwei FED-Subsystemen, die jeweils aus einer FED-Mutter- und vier FED-Tochterkarten bestehen; der Prototyp des RICH-Veto-Systems verwendet die Trefferdaten von zwei FED-Subsystemen; die Subsysteme 9 und 10 werden betrachtet, da es gemäß den Trefferverteilungen dort keine Hinweise auf heiße Kanäle gibt
PC1	Trefferzahl in der OTR-Superlage PC1
PC2	Trefferzahl in der OTR-Superlage PC2
PC1-4	Summe der Treffer in den OTR-Superlagen PC1 bis PC4
TC2	Trefferzahl in der OTR-Superlage TC2
TC1+2	Summe der Treffer in den OTR-Superlagen TC1 und TC2

5.4.1 Korrelationen zwischen den Treffermultiplizitäten verschiedener Subdetektoren

Der FLT führt für alle Spurkandidaten eine Spurverfolgung und -rekonstruktion im Bereich des HERA – B Spurkammersystems durch. Dazu werden die Trefferdaten von vier Superlagen des Spurkammersystems verwendet. Mit steigenden Treffermultiplizitäten in diesen Lagen nimmt die Wahrscheinlichkeit von zufälligen Koinzidenzen zu, die zur Gesamtzahl der Nachrichten innerhalb des FLT-Prozessornetzwerkes beitragen. Eine wichtige Anforderung an ein Trigger-Veto-System ist es, die Verarbeitung von Ereignissen mit einer großen Zahl von Treffern in den Detektorlagen, die vom FLT verwendet werden, zu unterbinden. Um dies zu erreichen, ist eine große Korrelation zwischen der Trefferzahl in diesen Spurkammerlagen und in dem Subdetektor erforderlich, der die Informationen zur Erzeugung des Veto-Signals liefert. Daher wird der Korrelationskoeffizient für unterschiedliche Kombinationen von Subdetektoren für die verschiedenen im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Datensätze berechnet. Der Korrelationskoeffizient ρ_{xy} einer Verteilung der Zufallsgrößen x und y wird gemäß

$$\rho_{xy} = \frac{\mathrm{cov}[x, y]}{\sigma_x \sigma_y} \tag{5.23}$$

bestimmt, wobei die Kovarianz $\mathrm{cov}[x, y]$ durch

$$\mathrm{cov}[x, y] = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = E[xy] - \mu_x \mu_y \tag{5.24}$$

gegeben ist. Dabei bezeichnet $E[x] = \mu_x$ den Erwartungswert von x, $E[y] = \mu_y$ den Erwartungswert von y und $E[xy]$ den Erwartungswert des Produktes xy. σ_x und σ_y sind die Standardabweichungen von x und y.

In Abbildung 5.24 sind zwei Verteilungen als Beispiele für die Korrelationen zwischen verschiedenen Subdetektoren gezeigt. Diese Verteilungen sind aus der Untersuchung aller Ereignisse des Myonpaar-Datensatzes hervorgegangen. Die Verteilungen für Kombinationen anderer Subdetektoren sowie für die übrigen Datensätze zeigen vergleichbare Korrelationen. Im auf der linken Seite abgebildeten Histogramm ist die Gesamttrefferzahl in den Superlagen TC1 und TC2 des äußeren Spurkammersystems, die vom FLT verwendet werden, gegen die Summe der im inneren Bereich des ECAL rekonstruierten Energiedepositionen aufgetragen. Im Histogramm auf der rechten Seite ist die Trefferzahl in TC1 und TC2 gegen die Zahl der Treffer im RICH aufgetragen. Die Zahl der Treffer bzw. die Energiesumme sind deutlich korreliert. Dabei fällt auf, dass für einige Ereignisse die Energiesumme im inneren Kalorimeter Werte nahe null annimmt, während die Trefferzahl in TC1 und TC2 deutlich von null verschieden ist.

In Tabelle 5.28 sind für die untersuchten Datensätze jeweils die Korrelationskoeffizienten für verschiedene Kombinationen von Subdetektoren aufgeführt. Alle betrachteten Kombinationen von Subdetektoren zeigen deutlich korrelierte Multiplizitäten. Dabei weisen die Kombinationen des RICH mit verschiedenen Spurkammerlagen einen größeren Korrelationskoeffizienten auf als die des ECAL mit den entsprechenden Spurkammerlagen. Somit ist das RICH als Quelle eines Veto-Systems zur Unterdrückung von Ereignissen mit hohen Treffermultiplizitäten im Spurkammersystem gut geeignet.

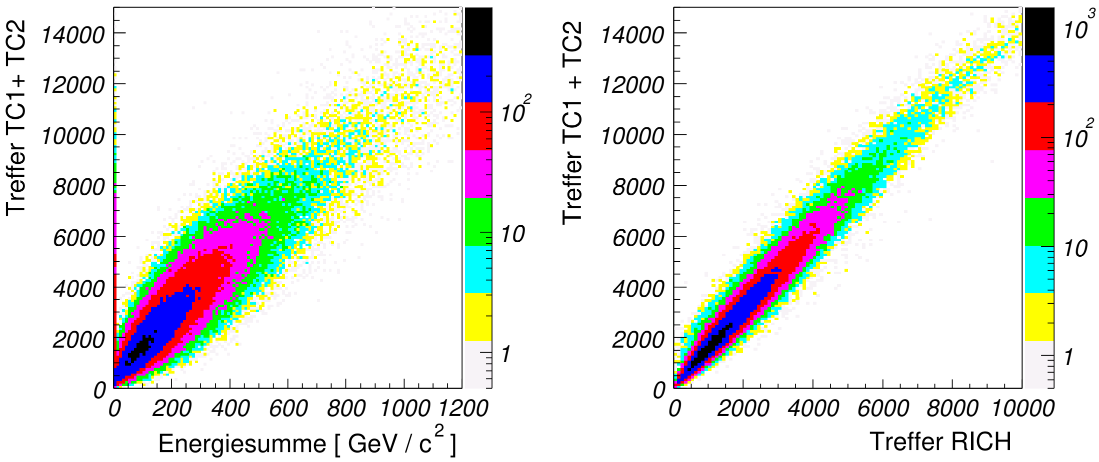


Abbildung 5.24: *Korrelationen zwischen den Multiplizitäten verschiedener Subdetektoren. Die dargestellten Verteilungen sind aus der Betrachtung aller Ereignisse des Myonpaar-Datensatzes hervorgegangen. Die Gesamttrefferzahl in den Superlagen TC1 und TC2 des äußeren Spurkammersystems ist gegen die Summe der rekonstruierten Energiedepositionen im inneren Bereich des Kalorimeter (links) und gegen die Trefferzahl im RICH (rechts) aufgetragen.*

5.4.2 Unterdrückung von Untergrundereignissen durch ein Multiplizitäts-Veto-System

Wie oben beschrieben wird ein Subdetektor als Quelle des Veto-Signals benötigt, dessen Multiplizität in hohem Maße mit der Multiplizität im Spurkammersystem korreliert ist. Als ein weiterer wichtiger Aspekt eines Multiplizitäts-Veto-Systems wird der Zusammenhang zwischen der Unterdrückung von Untergrundereignissen und dem Verlust an Signalereignissen untersucht. Diese Untersuchung wird mit dem Myonpaar-Datensatz durchgeführt.

In Abbildung 5.25 sind die Multiplizitätsverteilungen für Ereignisse, die Kandidaten für den Zerfallsprozess $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ darstellen, sowie für alle Ereignisse des Myonpaar-Datensatzes gezeigt. Die Verteilungen in der oberen Reihe stellen die Treffer in den Superlagen PC1 und TC2 dar, die beide vom FLT verwendet werden. In der mittleren Reihe ist links die Verteilung der Summe der rekonstruierten Energiedepositionen im inneren Kalorimeter dargestellt. Dies entspricht den Eingangsdaten der ECAL EIC. Die Trefferverteilung der Superlage PC2 ist daneben gezeigt. Diese Superlage wird nicht vom FLT verwendet und kann als Quelle eines Veto-Signals dienen, da Platz zur Installation von Elektronikkomponenten in den FED-Crates zur Verfügung steht. In der unteren Reihe sind links die Treffermultiplizitäten für das gesamte RICH und rechts für die beiden FED-Subsysteme 9 und 10 des RICH gezeigt.

Die Multiplizitäten der Ereignisse mit einem Kandidaten für einen J/ψ-Zerfall liegen deutlich unterhalb der maximalen Multiplizitätswerte der Gesamtverteilungen für die verschiedenen Subdetektoren. Dies zeigt, dass ein Multiplizitäts-Veto derart betrieben werden kann, dass

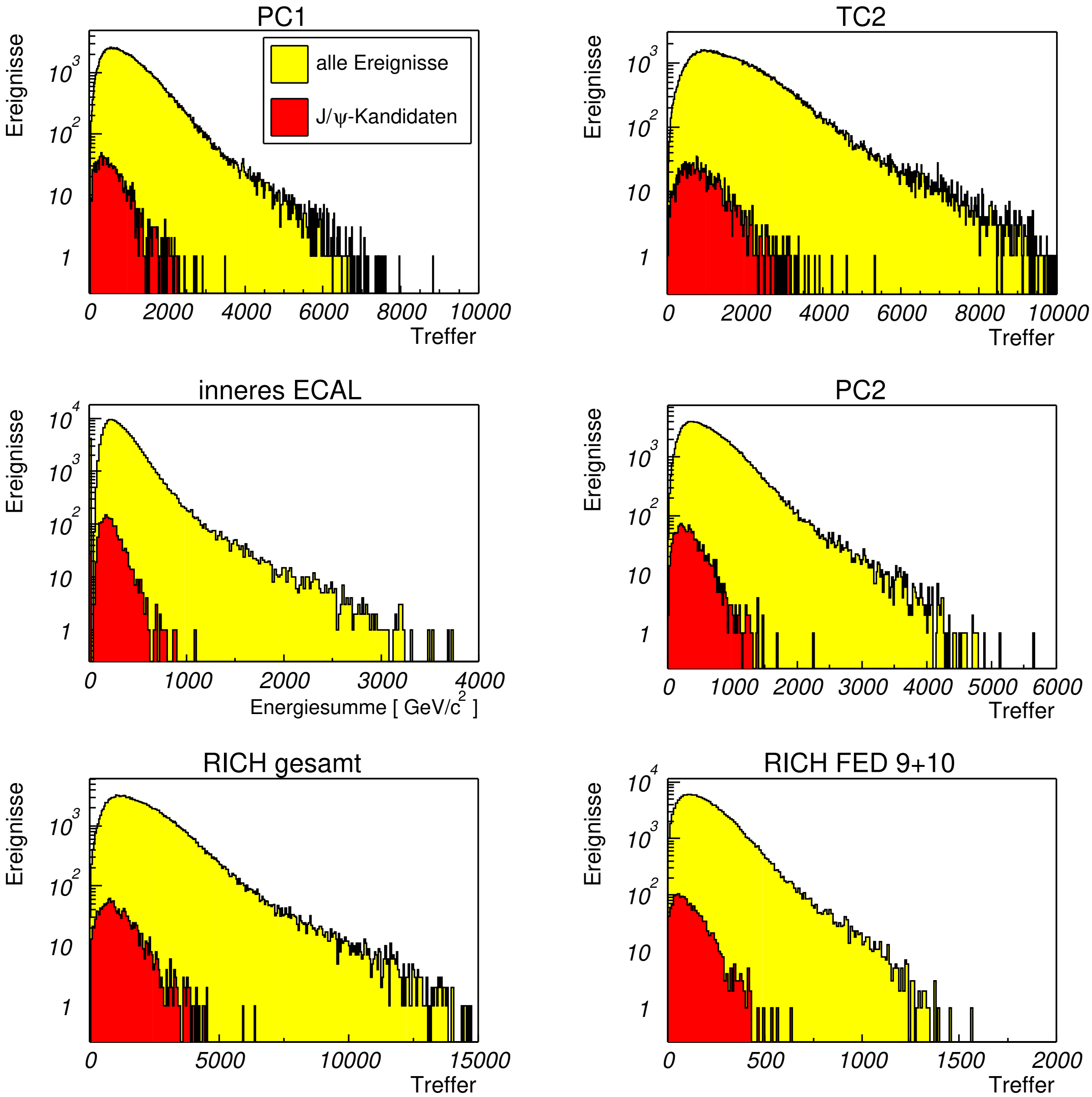


Abbildung 5.25: *Multiplizitätsverteilungen verschiedener Subdetektoren für den Myonpaar-Datensatz. Gezeigt sind jeweils die Treffer- bzw. Energieverteilung für alle Ereignisse des Datensatzes sowie überlagert für die Ereignisse, die Kandidaten für einen Zerfall* $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$ *darstellen.*

Tabelle 5.28: *Korrelationskoeffizienten für die Treffermultiplizitäten in verschiedenen Subdetektoren für die untersuchten Datensätze. Für das ECAL wird anstelle der Trefferzahl die Summe der im inneren Bereich des Kalorimeters rekonstruierten Energiedepositionen betrachtet.*

Korrelation	SLT Myonpaar	Random	MC 10 MHz	MC 20 MHz
ECAL - (TC1+TC2)	$(86{,}76 \pm 0{,}06)\,\%$	$(88{,}48 \pm 0{,}05)\,\%$	$(80{,}11 \pm 0{,}16)\,\%$	$(83{,}86 \pm 0{,}16)\,\%$
ECAL - (PC1−PC4)	$(83{,}68 \pm 0{,}07)\,\%$	$(85{,}40 \pm 0{,}06)\,\%$	$(76{,}79 \pm 0{,}18)\,\%$	$(81{,}33 \pm 0{,}18)\,\%$
RICH - (TC1+TC2)	$(97{,}68 \pm 0{,}01)\,\%$	$(96{,}93 \pm 0{,}01)\,\%$	$(93{,}81 \pm 0{,}05)\,\%$	$(94{,}99 \pm 0{,}05)\,\%$
RICH - (PC1−PC4)	$(95{,}70 \pm 0{,}02)\,\%$	$(94{,}31 \pm 0{,}03)\,\%$	$(91{,}12 \pm 0{,}07)\,\%$	$(92{,}91 \pm 0{,}07)\,\%$
ECAL - RICH	$(87{,}58 \pm 0{,}06)\,\%$	$(89{,}26 \pm 0{,}05)\,\%$	$(82{,}23 \pm 0{,}14)\,\%$	$(85{,}54 \pm 0{,}14)\,\%$

Ereignisse mit sehr hohen Treffermultiplizitäten ohne bzw. mit einem geringen Verlust an Signalereignissen unterdrückt werden können.

Die Unterdrückung von Untergrundereignissen wird basierend auf den Multiplizitätsverteilungen für den Myonpaar-Datensatz untersucht. Für die betrachteten Subdetektoren wird dazu jeweils eine obere Schranke $N_{\text{Schnitt}}(\text{Detektor})$ für die Multiplizität festgelegt. Diese wird so bestimmt, dass der Verlust an Ereignissen mit Kandidaten für J/ψ-Zerfälle einen vorgegebenen Wert nicht übersteigt, wenn Ereignisse mit einer Multiplizität $N_{\text{Treffer}}(\text{Detektor}) > N_{\text{Schnitt}}(\text{Detektor})$ verworfen werden. Dann wird der Anteil der Ereignisse des gesamten Datensatzes bestimmt, deren Trefferzahl oberhalb der zuvor festgelegten Schranke liegt und die somit verworfen werden. In Tabelle 5.29 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammengetragen. Bei einem Verlust von etwa 1 % der Ereignisse mit Kandidaten für J/ψ-Zerfälle kann durch ein Veto-System eine Unterdrückung von Untergrundereignissen von etwa 10 % erreicht werden. Für niedrigere Multiplizitätsschranken wird das Verhältnis aus Untergrundunterdrückung und Signalverlust kleiner. Bei einem Verlust von etwa 5 % der Signalereignisse kann durch ein Veto-System basierend auf den hier betrachteten Subdetektoren eine Untergrundunterdrückung zwischen etwa 26 % und 31 % erzielt werden. Für noch kleinere Werte von N_{Schnitt}, die zu einem Verlust von etwa 10 % der J/ψ-Kandidaten führen, können zwischen etwa 36 % und 42 % der Untergrundereignisse unterdrückt werden. Den Werten in Tabelle 5.29 kann außerdem entnommen werden, dass bei einem Verlust von 5 % und 10 % der Ereignisse mit J/ψ-Kandidaten durch Schnitte auf die Multiplizitäten in der OTR-Superlage PC 2 und im RICH eine größere Unterdrückung von Untergrundereignissen erreicht werden kann als durch einen Schnitt auf die Energiesumme im inneren ECAL. Dies steht in Einklang mit den zuvor bestimmten Korrelationskoeffizienten für die Multiplizitäten verschiedener Subdetektoren. Dort zeigte sich, dass die Korrelationen zwischen der Energiesumme im inneren ECAL und den Treffermultiplizitäten im Spurkammersystem kleiner ist als die Korrelation der Multiplizitäten des RICH und der Spurkammern. Für große Treffermultiplizitäten in den Spurkammerlagen, die durch die Triggersysteme verwendet werden, nimmt die Wahrscheinlichkeit von zufälligen Trefferkoinzidenzen zu und infolgedessen auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis vom Trigger akzeptiert wird. Daher kann durch ein Veto-System eine umso größere Unterdrückung von Untergrundereignissen erzielt werden, je stärker die Multiplizität

Tabelle 5.29: *Unterdrückung von Untergrundereignissen für unterschiedliche Multiplizitätsschranken. Für die betrachteten Subdetektoren ist jeweils die obere Schranke für die Multiplizität* N_{Schnitt} *aufgeführt. Zudem ist der Anteil der unterdrückten Untergrundereignisse sowie der Verlust an Signalereignissen angegeben.*

Subdetektor	N_{Schnitt}	Untergrundunterdrückung	J/ψ-Verlust
ECAL	584	$(10{,}5 \pm 0{,}1)\,\%$	$(1{,}0 \pm 0{,}3)\,\%$
PC 2	1215	$(10{,}5 \pm 0{,}1)\,\%$	$(1{,}1 \pm 0{,}3)\,\%$
RICH	3750	$(10{,}7 \pm 0{,}1)\,\%$	$(1{,}2 \pm 0{,}3)\,\%$
RICH FED 9+10	386	$(9{,}5 \pm 0{,}1)\,\%$	$(1{,}0 \pm 0{,}3)\,\%$
ECAL	422	$(25{,}9 \pm 0{,}1)\,\%$	$(5{,}2 \pm 0{,}6)\,\%$
PC 2	790	$(31{,}0 \pm 0{,}2)\,\%$	$(5{,}2 \pm 0{,}6)\,\%$
RICH	2525	$(29{,}7 \pm 0{,}2)\,\%$	$(5{,}1 \pm 0{,}6)\,\%$
RICH FED 9+10	259	$(27{,}2 \pm 0{,}1)\,\%$	$(5{,}0 \pm 0{,}6)\,\%$
ECAL	360	$(36{,}4 \pm 0{,}2)\,\%$	$(10{,}3 \pm 0{,}9)\,\%$
PC 2	665	$(41{,}3 \pm 0{,}2)\,\%$	$(10{,}2 \pm 0{,}9)\,\%$
RICH	2050	$(42{,}1 \pm 0{,}2)\,\%$	$(10{,}2 \pm 0{,}9)\,\%$
RICH FED 9+10	216	$(37{,}4 \pm 0{,}2)\,\%$	$(10{,}2 \pm 0{,}9)\,\%$

des Subdetektors, auf dem das Veto-System basiert, mit der Treffermultiplizität im Spurkammersystem korreliert ist.

Auf der Grundlage der im Rahmen dieser Untersuchung erzielten Resultate wurde beschlossen, ein Multiplizitäts-Veto-Systems zu entwickeln, das die Trefferdaten des RICH verwendet [HER 01]. Im Gegensatz zu den FED-Crates der Superlagen PC 2 und PC 3 erlauben die des RICH-Systems eine einfache Installation von zusätzlichen Elektronikkomponenten zum Aufbau eines Veto-Systems. Das RICH-Veto-System [Cru 01a] ist modular aus verschiedenen Komponenten aufgebaut und erlaubt eine schnelle Berechnung der Treffersumme im RICH. Übersteigt die Gesamttrefferzahl einen einstellbaren Schwellenwert, so wird ein Veto-Signal erzeugt und wie das Signal der ECAL EIC an die Pretrigger-Systems verteilt.

Aus den in Tabelle 5.29 gezeigten Resultaten geht hervor, dass sich bereits ein Prototyp des RICH-Veto-Systems, der im HERA–B Experiment installiert worden ist und für die Datennahme im Jahr 2002 zur Verfügung steht, zur effektiven Unterdrückung von Untergrundereignissen eignet. Mit einem solchen System, das ein Veto-Signal auf der Grundlage der Trefferzahl in zwei FED-Subsystemen erzeugt, ergeben sich Werte für die Untergrundunterdrückung, die im Bereich der Werte der anderen hier betrachteten Subdetektoren liegen.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zum Verhalten des Myon-Pretriggers präsentiert. Dabei wurden wichtige Kenngrößen bestimmt, die die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems charakterisieren. Um diese Ergebnisse zu erzielen, war es notwendig, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsprogramm zu verwenden.

Die Nachweiseffizienz des Myon-Pretriggers für Trefferkoinzidenzen ist eine wichtige Größe bei der Analyse von Daten, die unter Verwendung des Myon-Pretriggers selektiert wurden. Im HERA – B Experiment können mit Hilfe des FCS Testdaten in den FED-Systemen erzeugt werden. Damit stehen bekannte Referenzsignale zur Verfügung, die wie Detektordaten verarbeitet werden. Jedoch wird für diese Testdaten entweder für jeden Kanal oder für jeden zweiten ein Treffersignal generiert. FCS-Testdaten führen zu einer Vielzahl von Koinzidenzen im Myon-Pretrigger-System. Lokale Fehlfunktionen, die z. B. nur ein Pad des MU4-Musters betreffen und im realen Betrieb zu einer Ineffizienz des Myon-Pretrigger führen, könnten mit den FCS-Testdaten nur durch eine aufwendige Maskierung entdeckt werden. FCS-Testdaten sind daher nicht geeignet, um die Effizienz des Myon-Pretriggers zu ermitteln.

Die Effizienz des Myon-Pretriggers wurde durch die Analyse von Daten bestimmt, die im Strahlbetrieb des HERA – B Experimentes aufgezeichnet wurden. Das Myon-Pretrigger-System wurde während der Datennahme betrieben, hatte aber keinen Einfluss auf die Ereignisselektion. Die Triggerinformationen des Myon-Pretriggers wurden für jedes Ereignis zusammen mit den Trefferdaten aufgezeichnet. Die Daten wurden mit der Simulation des Myon-Pretriggers verarbeitet. Diese suchte in den aufgezeichneten Trefferdaten des Myon-Pad-Systems nach Trefferkoinzidenzen und erzeugte die zugehörigen Triggernachrichten nach dem gleichen Algorithmus wie der Myon-Pretrigger während der Datennahme. Die Effizienz wurde für jeden Elektronikkanal des Myon-Pretrigger-Systems separat bestimmt. Dazu wurde zu jeder vom Simulationsprogramm erzeugten Triggernachricht in den aufgezeichneten Daten desselben Ereignisses eine übereinstimmende vom Myon-Pretrigger-System stammende Nachricht gesucht. Der Effizienzwert eines Pretrigger-Kanals wurde als der Anteil der vom Simulationsprogramm erzeugten Triggernachrichten bestimmt, für die eine übereinstimmende Nachricht in den aufgezeichneten Daten gefunden wurde. Während der Datennahme konnten nicht alle Parameter der Triggernachrichten unverändert übertragen und aufgezeichnet werden. Daher wurden im Rahmen dieser Analyse Triggernachrichten als übereinstimmend betrachtet, deren Parameter ξ und η, die den Ortskoordinaten des MU3-Treffers entsprechen, identisch waren.

Die Effizienz des Myon-Pretriggers wurde separat für zwei verschiedene Datensätze bestimmt. Der erste wurde zu einer Zeit aufgezeichnet, als die Installation des Myon-Pretriggers im Pad-System noch nicht abgeschlossen war. Die zweite Datennahme erfolgte, nachdem sämtliche Komponenten des Pretriggers für das Pad-System in Betrieb genommen worden waren. Zudem wurden zwischen den beiden Datennahmen Hardware-Defekte behoben. Dadurch konnte z. B. der Anteil der maskierten Datenkanäle in MU3 von im Mittel etwa 10 % auf weniger als 1 % gesenkt werden. Für den ersten Datensatz waren etwa 41 % aller Pretrigger-Kanäle im Pad-System entweder noch nicht installiert oder von diversen Defekten betroffen, so dass für diese Kanäle keine Effizienzbestimmung möglich war. Für den zweiten Datensatz betrug der Anteil der Kanäle, für die aufgrund von Defekten kein Effizienzwert ermittelt werden konnte, etwa 8,5 %. Bei der Berechnung der Effizienzwerte blieben diejenigen Kanäle außer Betracht, für die die Pretrigger-Elektronik nicht vollständig installiert war oder die von unterschiedlichen

Defekten betroffen waren, so dass von diesen Kanälen keine Triggerinformationen vorlagen.

Für den ersten Datensatz wurde das arithmetische Mittel der Effizienzwerte der betrachteten Datenkanäle zu $0{,}908 \pm 0{,}007$ für das gesamte Pad-System bestimmt. Die Effizienzwerte der Datenkanäle wurden zusätzlich mit Gewichtsfaktoren skaliert, die aus dem Beitrag eines jeweiligen Datenkanals zu einer Koinzidenzverteilung für Monte-Carlo-Ereignisse mit Zerfällen $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ berechnet wurden. Dadurch erhalten die Effizienzwerte von Kanälen nahe dem Protonstrahlrohr ein größeres Gewicht als die von Kanälen im Randbereich des Detektors. Der Mittelwert der so gewichteten Effizienzwerte betrug $0{,}930 \pm 0{,}001$ für das gesamte Pad-System und $0{,}953 \pm 0{,}001$ für die $+y$-Hälfte und $0{,}908 \pm 0{,}001$ für die $-y$-Hälfte. Für den ersten Datensatz lag der Anteil der Datenkanäle mit Effizienzwerten oberhalb von 0,999 bei nahezu 80 % sowohl in der oberen als auch der unteren Detektorhälfte.

Der Effekt fehlerhafter optischer Datenübertragungen auf die Effizienz der davon betroffenen Datenkanäle wurde untersucht, indem diese Datenkanäle bei der Mittelung der Effizienzwerte nicht berücksichtigt wurden. Dabei stieg der arithmetische Mittelwert für das Pad-System von $0{,}908 \pm 0{,}007$ auf $0{,}946 \pm 0{,}006$. Der Mittelwert der wie oben beschrieben skalierten Effizienzwerte stieg von $0{,}930 \pm 0{,}001$ auf $0{,}978 \pm 0{,}001$.

Durch eine detaillierte Untersuchung von Kanälen mit niedrigen Effizienzwerten konnten verschiedene Fehlfunktionen der Pretrigger-Hardware entdeckt und lokalisiert werden. Dabei handelte es sich um fehlerhaft übertragene Datenbits oder um ein defektes Auffang-FIFOs, das fehlerhafte Koinzidenzadressen verursachte.

Für den zweiten Datensatz konnte für eine deutlich größere Zahl von Pretrigger-Kanälen ein Effizienzwert ermittelt werden. Der arithmetische Mittelwert der Effizienzwerte für das gesamte Pad-System wurde zu $0{,}953 \pm 0{,}003$ bestimmt und der Mittelwert der gewichteten Effizienzwerte zu $0{,}959 \pm 0{,}001$. Durch Ausschluss der Kanäle, die von fehlerhaften optischen Verbindungen betroffen waren, ergaben sich die entsprechenden Mittelwerte zu $0{,}973 \pm 0{,}002$ und $0{,}977 \pm 0{,}001$.

Auch für den zweiten Datensatz wurden diverse Hardware-Defekte durch eine eingehende Untersuchung von Kanälen mit niedrigen Effizienzwerten identifiziert. Insbesondere wurde dabei nach der Ursache für die niedrigeren Effizienzwerte der Kanäle in der $+y$-Hälfte im Vergleich zu denen in der $-y$-Hälfte gesucht. Der Anteil der Datenkanäle mit einem Effizienzwert oberhalb von 0,99 lag in der $-y$-Hälfte bei 80,5 % und in der $+y$-Hälfte bei lediglich 31,7 %. Die Konsistenz aller aufgezeichneten Triggernachrichten des Myon-Pretriggers wurde überprüft. Dazu wurde ausgenutzt, dass sich der Abstand einer Koinzidenzposition von der z-Achse aus den Parametern ξ und η sowie unabhängig davon aus dem Parameter P der Triggernachricht berechnen lässt. Triggernachrichten, für die die beiden Abstandswerte nicht im Rahmen der Auflösung der betrachteten Parameter übereinstimmten, wurden als inkonsistent bezeichnet. Der Anteil der inkonsistenten Triggernachrichten in der $+y$-Hälfte wurde zu 1,5 % bestimmt, während er in der $-y$-Hälfte nur bei $5{,}1 \cdot 10^{-3}$ % lag. Wurden Ereignisse mit wenigstens einer inkonsistenten Nachricht bei der Effizienzanalyse ausgeschlossen, so stiegen die mittleren Effizienzwerte in der $+y$-Hälfte an, während die Werte für die $-y$-Hälfte nahezu unverändert blieben. Ebenso stieg dadurch der Anteil der Kanäle in der $+y$-Hälfte mit einem Effizienzwert oberhalb von 0,99 deutlich an, und zwar von 31,7 % auf 73,1 %. Daraus lässt sich schließen, dass die niedrigeren Effizienzwerte der Kanäle in der $+y$-Hälfte auf das Auftreten inkonsistenter Nachrichten zurückzuführen war.

Es wurde gezeigt, dass die LUT-Konfigurationsdateien, die während der Datennahme verwendet wurden, konsistente Parameterwerte enthielten. Das Auftreten von inkonsistenten Nachrichten praktisch nur in der $+y$-Hälfte kann wahrscheinlich auf eine Fehlfunktion derjenigen TFU zurückgeführt werden, die alle Triggernachrichten des Myon-Pretriggers in der $+y$-Hälfte weiterleitete.

In der Zwischenzeit wurden alle Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems überprüft und sämtliche bekannten Fehlfunktionen behoben. Daher ist für die bevorstehende Datennahme im Jahr 2002 eine weitere Verbesserung der mittleren Nachweiseffizienz des Myon-Pretriggers zu erwarten.

Neben der Nachweiseffizienz stellt die Akzeptanz eine grundlegende Kenngröße des Myon-Pretriggers dar. Besondere Bedeutung im Rahmen der bisherigen Datennahme und auch im Hinblick auf das Physikprogramm des HERA–B Experimentes für das Jahr 2002 hat dabei die Akzeptanz für den Zerfallsprozess $J/\psi \to \mu^+\mu^-$. Eine Untersuchung mit Hilfe des Simulationsprogramms für den Myon-Pretrigger wurde durchgeführt, um die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für diesen Zerfallsprozess zu ermitteln. Dabei wurde die Akzeptanz des Myon-Pretriggers im Pad-System für den Zerfallsprozess zu $0{,}423 \pm 0{,}002$ bestimmt. Die geometrische Akzeptanz des Pad-Systems für diesen Zerfallsprozess beträgt $0{,}434 \pm 0{,}002$. Die Akzeptanz des Pretriggers für Myonspuren aus dem J/ψ-Zerfall wurde zu $0{,}650 \pm 0{,}002$ für das μ^+ und zu $0{,}660 \pm 0{,}002$ für das μ^- bestimmt. Diese Werte liegen jeweils etwa 1 % unterhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems für die entsprechenden Spuren.

Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen wurde in Abhängigkeit von ihrem Abstand vom Protonstrahlrohr ermittelt. Es zeigte sich, dass die Akzeptanz des Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz im Randbereich des Pad-Systems – für Abstände vom Strahlrohr größer als etwa 3 m – abnimmt. Dies wird dadurch erklärt, dass sich für Spuren vom Target mit zunehmendem Abstand vom Protonstrahlrohr die Position des MU4-Treffers relativ zum MU3-Treffer weiter nach außen verschiebt. Im Randbereich des Detektors kann diese Verschiebung dazu führen, dass der Treffer in MU4 nicht mehr im Bereich der Spalten liegt, die gemäß dem Koinzidenzschema zum MU4-Muster der getroffenen MU3-Spalte beitragen. Die relativen Akzeptanzwerte der einzelnen Spalten wurden mit Gewichten skaliert, die aus der Verteilung der Durchstoßpunkte in MU3 von Myonspuren aus J/ψ-Zerfällen berechnet wurden. Damit ergab sich eine mittlere relative Akzeptanz des Pretriggers von etwa 0,987 für Myonspuren aus dem Zerfall eines J/ψ-Mesons. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers im Pad-System für den Zerfallsprozess beträgt $0{,}975 \pm 0{,}006$ relativ zur geometrischen Akzeptanz.

Die Gesamtlatenzzeit bis zur Triggerentscheidung des FLT beträgt für Myon-Kandidaten etwa $10\,\mu$s. Dies liegt im Bereich der maximal zur Verfügung stehenden Zeit, die durch die Tiefe der Datenzwischenspeicher gegeben ist. Triggersignale, die nach dieser maximalen Latenzzeit erzeugt werden, werden durch das FCS verworfen. Daher ist es notwendig, die Latenzzeiten aller Komponenten des Pretriggers und des FLT möglichst präzise zu ermitteln. Wegen der ereignisgetriebenen Datenprozessierung in Teilen des Pretrigger-Systems und im FLT kann die Gesamtlatenzzeit nicht genau vorhergesagt werden. Die Verteilung der Gesamtlatenzzeit kann aus aufgezeichneten Daten bestimmt werden. Der Beitrag einzelner Komponenten kann auf diese Weise nicht ermittelt werden.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms wurde eine Untersuchung zur Latenzzeit des Myon-Pretriggers durchgeführt. Dabei werden in der Simulation die Schaltungen auf den Komponenten des Myon-Pretriggers detailliert nachgebildet, die an der ereignisgetrieben Prozessierung auf der PCU und dem PMG beteiligt sind. Die Latenzzeitverteilungen der Triggernachrichten in der Simulation wurden mit gemessenen Latenzzeitverteilungen des realen Myon-Pretrigger-Systems verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Simulation die gemessenen Latenzzeitverteilungen gut beschreibt. Dabei wird auch der unterschiedliche Verlauf der Latenzzeit für „PHYS_SM“- und „PHYS_MM“-LUT-Parametrisierungen durch die Simulation reproduziert. Dadurch, dass beim Einsatz der „PHYS_MM“-Parametrisierung pro Koinzidenz drei Triggernachrichten statt einer erzeugt werden, steigt der mittlere Zeitbedarf um etwa eine halbe BX-Einheit. Die Latenzzeitverteilung für die „PHYS_MM“-Konfiguration fällt zudem oberhalb des Maximalwertes weniger schnell ab und besitzt Ausläufer zu größeren Latenzzeitwerten.

Mit Hilfe des Simulationsprogrammes wurde der Einfluss der Wechselwirkungsrate am Target auf die Latenzzeiten der Triggernachrichten des Myon-Pretriggers untersucht. Die mittlere Latenzzeit wächst mit zunehmender Wechselwirkungsrate nur geringfügig an. Dabei steigt jedoch der Anteil der Triggernachrichten, deren Latenzzeiten deutlich oberhalb des Maximalwertes liegen. Aus einer gemessenen Latenzzeitverteilung wurde die Differenz zwischen der Position der Latenzzeitschwelle, oberhalb der Triggersignale verworfen wurden, und dem Maximum der Latenzzeitverteilung ermittelt. Der Anteil der Triggernachrichten, deren Latenzzeit nach der Prozessierung durch den Myon-Pretrigger weiter oberhalb des Maximums lag als der zuvor bestimmte Differenzwert, betrug maximal $(1{,}8 \pm 0{,}8) \cdot 10^{-4}$ bei einer simulierten Wechselwirkungsrate von 40 MHz. Für etwa 99 % der Triggernachrichten liegt die Latenzzeit nach der Prozessierung durch den Myon-Pretrigger maximal drei BX-Einheiten oberhalb des Maximums der Verteilung. Der beobachtete Verlust an Nachrichten geht im Wesentlichen auf die starke Verbreiterung der Latenzzeitverteilung nach der Prozessierung durch den FLT zurück.

Um die Gesamtlatenzzeit für Myon-Kandidaten zu reduzieren, wird in Erwägung gezogen, die TFU-Lage in der Superlage MU4 oder MU3 nicht im FLT zu verwenden. Dies würde zu einer Verringerung der Gesamtlatenzzeit um etwa 800 ns bzw. etwa 8 BX-Einheiten und damit zu einem geringeren Verlust an Myon-Kandidaten führen.

Ereignisse mit hohen Treffermultiplizitäten in den Spurkammerlagen, die der FLT verwendet, führen zu einer Anhäufung von Triggernachrichten. Stauen sich Triggernachrichten innerhalb des FLTs auf, so erhöht sich der Zeitbedarf für die Prozessierung. Dies kann zu einer Ineffizienz des FLT führen, falls die Latenzzeit bis zur Triggerentscheidung einen vorgegebenen Maximalwert übersteigt. Durch den Einsatz eines Veto-Systems soll die Verarbeitung von Ereignissen mit hoher Treffermultiplizität bereits durch die Pretrigger-Systeme eingestellt werden.

Die ECAL EIC erzeugt ein Veto-Signal für die Pretrigger, falls die Summe der im inneren ECAL nachgewiesenen Energiedepositionen eine einstellbare Schwelle übersteigt. Dieses Veto-System stand für die bisherige Datennahme noch nicht zur Verfügung. Daher wurden verschiedene Subdetektoren als mögliche Quellen eines Multiplizitäts-Veto-Systems untersucht. Die Treffermultiplizitäten in den Spurkammerlagen, die vom FLT verwendet werden, sind stärker mit der Treffermultiplizität im RICH korreliert als mit der Energiesumme im inneren ECAL. Aus der Untersuchung von Myonpaar-Ereignissen, die im Jahr 2000 aufgezeichnet wurden, ergab sich, dass die Multiplizitäten der Ereignisse mit einem Kandidaten für einen J/ψ-Zerfall deutlich unterhalb der maximalen Multiplizitätswerte von Untergrundereignissen liegen. Ereignisse mit hohen Treffermultiplizitäten können demnach durch ein Multiplizitäts-Veto bei einem geringen Verlust an J/ψ-Zerfällen unterdrückt werden. Für verschiedene Subdetektoren wurde der Anteil der unterdrückten Untergrundereignisse zusammen mit dem Verlust an J/ψ-Kandidaten für unterschiedliche Multiplizitätsschnitte ermittelt. Durch Schnitte auf die Multiplizität im RICH kann eine größere Unterdrückung von Untergrundereignissen erzielt werden als durch Schnitte auf die Energiesumme im inneren ECAL.

Auf der Grundlage der Resultate dieser Untersuchung wurde die Entwicklung eines RICH-Multiplizitäts-Veto-Systems beschlossen. Bereits mit dem Prototypen dieses Systems, der zwischenzeitlich im HERA–B Experiment installiert wurde und für die Datennahme im Jahr 2002 zur Verfügung steht, können Untergrundereignisse mit hoher Multiplizität effektiv unterdrückt werden.

Zusammenfassung

Das Myon-Pretrigger-System des HERA – B Experimentes initiiert den Selektionsprozess der ersten Triggerstufe für Myonspuren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsprogramm für den Myon-Pretrigger und ein Programm zur Erzeugung von LUT-Konfigurationsdateien entwickelt. Unter Einsatz des Simulationsprogrammes wurden verschiedene Untersuchungen zum Systemverhalten durchgeführt und einige wichtige Kenngrößen des Myon-Pretrigger-Systems bestimmt.

Die Simulation beschreibt die Funktion des Myon-Pretriggers auf dem Niveau von Bitoperationen. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass die Simulationsergebnisse unmittelbar mit Daten des realen Systems verglichen werden können. Das Simulationsprogramm ist nach der objektorientierten Methode entworfen, wobei die Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems als Klassen implementiert sind. Das Programm ist modular in Form einer Klassenbibliothek aufgebaut. Somit können Teile der Software leicht in anderen Programmen eingesetzt werden, beispielsweise zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien. Durch die bereitgestellten Benutzerroutinen kann die Simulation des Myon-Pretriggers in verschiedene Anwendungen eingebunden werden kann. Von besonderer Bedeutung ist die Funktion der Simulation des Myon-Pretriggers, Startpunkte für die Simulationsprogramme der ersten oder zweiten Triggerstufe zu liefern. Dies ermöglicht es, das Verhalten der gesamten Triggerkette mit Hilfe der Simulation zu untersuchen und modifizierte Triggeralgorithmen zu studieren.

Die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems kann detailliert in der Simulation nachgebildet werden. Dies schafft die Grundlage für den Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem realen System. Als Quellen der Konfigurationsdaten werden diverse Tabellen der HERA – B Datenbank verwendet. Alternativ können stattdessen Konfigurationsdateien eingesetzt werden. Änderungen der Konfiguration des Myon-Pretriggers während der Datennahme werden durch das Simulationsprogramm automatisch berücksichtigt, indem die Konfiguration für die Simulation dementsprechend aktualisiert wird.

Aufgrund der ereignisgetriebenen Prozessierung ist die Latenzzeit des Myon-Pretriggers nicht konstant. Wegen der Rückkopplungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten auch über die Grenzen einzelner Ereignisse hinweg kann die Latenzzeit zudem nicht vorhergesagt werden. Die Schaltungselemente in dem Teil des Myon-Pretrigger-Systems, der ereignisgetrieben arbeitet, sind im Simulationsprogramm im Detail implementiert. Die Simulation ermöglicht es somit, den Zeitbedarf für diese Prozessierungsschritte zu bestimmen.

Zu gefundenen Koinzidenzen werden auf den PMGs des Myon-Pretrigger-Systems Triggernachrichten durch Zugriffe auf LUTs erzeugt. Die Triggernachrichten enthalten Informationen über die Koinzidenzen und dienen dem FLT dazu, erste RoIs für die Spurverfolgung von

Myon-Kandidaten zu definieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm erstellt, das Konfigurationsdateien für die LUTs auf den PMGs erstellt. Wesentliche Funktionen des Programmes werden durch Teile der Klassenbibliothek zur Verfügung gestellt, die auch für das Simulationsprogramm verwendet wird. Das Programm berechnet für alle möglichen Koinzidenzdatensätze jeweils die Werte sämtlicher Parameter der Triggernachricht. Dabei können verschiedene für den Betrieb des Myon-Pretriggers mit dem FLT, dem SLT oder für den Testbetrieb entwickelte LUT-Parametrisierungen eingesetzt werden.

Für das Pad-System sind das Simulationsprogramm und das Programm zur Erzeugung der LUT-Konfigurationsdateien vollständig implementiert. Für das Pixel-System stehen Programme mit eingeschränkter Funktionalität zur Verfügung. Das Simulationsprogramm verarbeitet Monte-Carlo-Ereignisse als Eingangsdaten und führt eine Koinzidenzsuche durch. Die geplante Implementierung der Funktion des PMBs, einzelne Auslesekanäle der Pixel-Detektoren zu Pseudo-Pads zusammenzufassen, wird es erlauben, aufgezeichnete Detektordaten zu verarbeiten. Um Triggernachrichten für das Pixel-System zu erzeugen, sind geringe Modifikationen gegenüber dem Pad-System erforderlich. Bisher stehen nur LUT-Konfigurationsdateien für den Testbetrieb des Myon-Pretriggers im Pixel-System zur Verfügung. Damit wurden gegen Ende der Datennahmeperiode 2000 erste Messungen durchgeführt. Die zur Erzeugung von Triggernachrichten für das Pixel-System notwendigen Erweiterungen der Software erlauben es auch, die zum Betrieb mit FLT und SLT benötigten LUT-Konfigurationsdateien zu erstellen.

In dieser Arbeit wurden Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zum Verhalten des Myon-Pretrigger-Systems präsentiert. Diese Untersuchungen setzten den Einsatz des Simulationsprogrammes voraus.

Die Nachweiseffizienz für Trefferkoinzidenzen ist eine wichtige Kenngröße des Myon-Pretriggers. Da im HERA – B Experiment keine geeigneten Referenzsignale zur Verfügung stehen, kann sie nur mit Hilfe des Simulationsprogrammes ermittelt werden. Dazu wird das Myon-Pretrigger-System ohne Einfluss auf die Ereignisselektion betrieben, wobei die Triggerinformationen des Pretriggers zusammen mit den Trefferdaten aufgezeichnet werden. Das Simulationsprogramm bildet die Konfiguration des realen Systems nach und sucht in den aufgezeichneten Trefferdaten nach Koinzidenzen. Die Effizienz wird als der Anteil der vom Simulationsprogramm erzeugten Triggernachrichten bestimmt, für die eine übereinstimmende Triggernachricht des realen Systems in den aufgezeichneten Daten vorliegt.

Zwei verschiedene Datensätze wurden analysiert, um die Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems im Pad-System zu bestimmen. Der erste wurde aufgezeichnet, bevor die Installation des Pretriggers im Pad-System abgeschlossen war. Aufgrund diverser Defekte konnte nur für etwa 40 % aller Kanäle ein Effizienzwert ermittelt werden. Die zweite Datennahme erfolgte nach der vollständigen Inbetriebnahme des Pretriggers im Pad-System sowie der Reparatur bekannter Hardware-Defekte. Hier konnte für etwa 66 % der Pretrigger-Kanäle ein Effizienzwert bestimmt werden. Dabei betrug der Anteil der Kanäle, die wegen eines Defektes nicht betrachtet werden konnten, 8,5 % . Für die übrigen Kanäle wurden entweder keine Koinzidenzen im gesamten Datensatz nachgewiesen oder die Zahl der Koinzidenzen war so gering, dass eine Effizienzbestimmung statistisch nicht sinnvoll gewesen wäre. Das arithmetische Mittel der Effizienzwerte der betrachteten Kanäle betrug für den ersten Datensatz $0{,}908 \pm 0{,}007$ und $0{,}953 \pm 0{,}003$ für den zweiten.

Die Effizienzwerte der Datenkanäle wurden mit Gewichten skaliert. Diese wurden mit Hilfe einer parametrisierten Koinzidenverteilung für Monte-Carlo-Ereignisse mit Zerfällen $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ berechnet. Für den ersten Datensatz betrug der Mittelwert der so gewichteten Effizienzwerte $0{,}930 \pm 0{,}001$ für das gesamte Pad-System, für den zweiten Datensatz $0{,}959 \pm 0{,}001$.

Es wurde gezeigt, dass fehlerhafte optische Verbindungen zu einer Abnahme der Effizienz der betroffenen Kanäle führen. Unter Ausschluss dieser Kanäle ergab sich ein mittlerer Effizienzwert von $0{,}946 \pm 0{,}006$ für den ersten und $0{,}973 \pm 0{,}002$ für den zweiten Datensatz.

Anhand verschiedener Beispiele wurde gezeigt, dass die Effizienzbestimmung dazu geeignet ist, diverse Fehlfunktionen der Pretrigger-Hardware aufzufinden und zu lokalisieren. Die Analyse des zweiten Datensatzes ergab deutlich niedrigere Effizienzwerte für die Kanäle in der oberen im Vergleich zu denen in der unteren Detektorhälfte. Es wurde gezeigt, dass dies auf das Auftreten von Triggernachrichten mit inkonsistenten Parameterwerten in den Kanälen der oberen Hälfte zurückzuführen war. Dies wurde wahrscheinlich durch eine Fehlfunktion der TFU verursacht, die die Triggernachrichten aller Kanäle des Myon-Pretriggers in der oberen Hälfte weiterleitete.

Aus dem zweiten Datensatz wurde unter Auschluss von Ereignissen mit inkonsistenten Triggernachrichten ein mittlerer Effizienzwert von $0{,}960 \pm 0{,}003$ für das gesamte Pad-System berechnet. Dabei wurden Kanäle, die von Fehlfunktionen der optischen Verbindungen betroffen waren, mit berücksichtigt. Nach der Datennahme im Jahr 2000 wurden sämtliche Komponenten des Myon-Pretriggers eingehend überprüft und alle erkannten Fehlfunktionen behoben. Daher ist für die kommende Datennahmeperiode im Jahr 2002 eine mittlere Effizienz im Pad-System oberhalb dieses Wertes zu erwarten. Eine möglichst frühzeitige Datennahme zur Bestimmung der Effizienz des Pretrigger im Pad- und Pixel-System ist anzustreben, da sich daraus auch Hinweise auf Fehlfunktionen der Hardware ergeben.

Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für Zerfälle $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ wurde mit Monte-Carlo-Ereignissen untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz für Abstände vom Protonstrahlrohr größer als etwa 3 m abnimmt. Für Spuren vom Target verschiebt sich der Treffer in MU4 relativ zum MU3-Treffer mit zunehmendem Abstand zum Protonstrahlrohr weiter nach außen. Dabei steigt die Wahrschienlichkeit, dass der MU4-Treffer nicht mehr in den Spalten liegt, die zum MU4-Muster der getroffenen MU3-Spalte beitragen. Für Myonen aus J/ψ-Zerfällen wurde die Akzeptanz des Myon-Pretriggers relativ zur geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems zu $0{,}9871 \pm 0{,}0003$ bestimmt. Für einen Anteil von $0{,}434 \pm 0{,}002$ aller betrachteten Zerfälle liegen beide Myonspuren innerhalb der geometrischen Akzeptanz des Pad-Systems. Die Akzeptanz des Myon-Pretriggers für diesen Zerfallsprozess beträgt $0{,}423 \pm 0{,}002$.

Mit Hilfe des Simulationsprogrammes wurde die Verteilung der Latenzzeiten der Triggernachrichten des Myon-Pretriggers untersucht. Dabei zeigte sich, dass die gemessenen Latenzzeitverteilungen sowohl für die „PHYS_SM“- als auch für die „PHYS_MM“-LUT-Parametrisierungen durch die Simulation gut beschrieben werden. Eine Untersuchung mit Hilfe des Simulationsprogrammes ergab, dass die mittlere Latenzzeit des Myon-Pretriggers mit zunehmender Wechselwirkungsrate am Target nur geringfügig ansteigt. Für etwa 99 % der Triggernachrichten liegt die Latenzzeit nach der Prozessierung durch den Myon-Pretrigger maximal drei BX-Einheiten oberhalb des Modalwertes der Verteilung. Nur für einen sehr geringen Teil der Triggernachrichten liegt die Latenzzeit des Myon-Pretriggers so hoch, dass diese nach der Verarbeitung durch den FLT vom FCS verworfen würden.

Eine grundlegende Untersuchung zu einem RICH-Multiplizitäts-Veto-System wurde durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass die Treffermultiplizitäten in den vom FLT verwendeten Lagen des äußeren Spurkammersystems stärker mit der Treffermultiplizität im RICH als mit der Energiesumme im inneren ECAL korreliert sind. Durch Schnitte auf die Multiplizität im RICH kann zudem bei einem vergleichbaren Verlust an Kandidaten für Zerfälle $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ eine größere Unterdrückung von Untergrundereignissen erzielt werden als durch Schnitte auf die Energiesumme im inneren ECAL. Mit dem bereits im HERA – B Experiment installierten Prototypen des RICH-Multiplizitäts-Veto-Systems können Untergrundereignisse mit hoher Multiplizität effektiv unterdrückt werden.

Anhang A

Parameteranpassung zur funktionalen Beschreibung der Koinzidenzverteilung

Bei der Bestimmung des Mittelwerts der Effizienz oder des gemittelten Anteils maskierter Kanäle werden Gewichte verwendet, um die Bedeutung eines Datenkanals zu quantifizieren. Die Gewichtsfaktoren ergeben sich aus dem Beitrag eines Datenkanals zur Koinzidenzrate des gesamten Pad-Systems.

Zur Berechnung der Gewichte wird eine Funktion verwendet, die den angenommenen Verlauf der Koinzidenzverteilung beschreibt. Die Funktionsparameter werden durch eine Anpassungsrechnung bestimmt.

In [Bec 01] wird die Koinzidenzratenverteilung durch eine Funktion beschrieben, die von einem exponentiellen Abfall der Koinzidenzrate mit dem Abstand $r(s,p)$ eines Pads vom Protonstrahl ausgeht. Die Koinzidenzrate $R_{\text{Koinz}}(s,p)$ eines Pads mit der Spaltennummer s und der Padnummer p ergibt sich demnach wie folgt:

$$R_{\text{Koinz}}(s,p) = \frac{1}{N} \cdot \exp\left(-\frac{r(s,p)}{c}\right) = \frac{1}{N} \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{(s-a)^2 + (p-b)^2}}{c}\right) \ . \tag{A.1}$$

In [Bec 01] werden empirisch folgende Werte für die Funktionsparameter bestimmt:

$$a = 33{,}5 \ , \ b = 0 \ \text{ und } \ c = 5{,}5 \ . \tag{A.2}$$

Bei dieser Parametrisierung der Koinzidenzverteilung werden die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld in der x-z-Ebene sowie die unterschiedlichen Kantenlängen der Pads in x- und y-Richtung nicht berücksichtigt. Um diese Effekte zu berücksichtigen, wird hier ausgehend von (A.1) die Koinzidenzverteilung durch die Funktion

$$R_{\text{Koinz}}(s,p) = \frac{1}{N} \cdot \exp\left(-\left[\left(\frac{s-a}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{p-b}{c_2}\right)^2\right]^{d/2}\right) \tag{A.3}$$

beschrieben. Dabei wird die exponentielle Abnahme in x-Richtung, d. h. entlang sich ändernder Spaltennummern, und in y-Richtung, entlang sich ändernder Padnummern, durch unterschiedliche Konstanten c_1 und c_2 charakterisiert. Zudem wird die ursprünglich angenommene Proportionalität $R_{\mathrm{Koinz}}(s,p) \propto \exp(-r(s,p))$ durch den allgemeineren Ansatz $R_{\mathrm{Koinz}}(s,p) \propto \exp(-r^d(s,p))$ ersetzt.

Die Werte der Funktionsparameter werden durch eine Anpassung an eine aus Monte-Carlo-Ereignissen resultierende Koinzidenzverteilung bestimmt. Dabei werden zwei verschiedene Datensätze von Monte-Carlo-Ereignissen benutzt. Der erste Datensatz umfasst 90 000 Minimum-Bias-Ereignisse (engl.: minimale Verzerrung), bei denen jeweils eine inelastische Wechselwirkung eines Protons mit einem Nukleon im Targetdraht simuliert wird, wobei kein spezieller physikalischer Prozess ausgewählt wird. Der zweite Datensatz enthält 30 000 Ereignisse mit je einer inelastischen Wechselwirkung, bei der jeweils ein J/ψ-Meson erzeugt wird, das dann in ein Myonpaar gemäß $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$ zerfällt. Für beide Datensätze wird eine Simulation des Myon-Pretriggers im Pad-System durchgeführt. Dabei sind keine Datenkanäle ausmaskiert. In Tabelle A.1 sind die Zahl der Ereignisse und die Zahl der von der Simulation gefundenen Koinzidenzen angegeben.

Tabelle A.1: *Die zur Parameteranpassung verwendeten Datensätze von Monte-Carlo-Ereignissen. Der erste Datensatz enthält Minimum-Bias-Ereignisse mit je einer inelastischen Proton-Nukleon-Wechselwirkung. Der zweite Datensatz umfasst Ereignisse, in denen jeweils ein J/ψ-Meson produziert wird, das in ein Myonpaar zerfällt. Angegeben sind die Zahl der Ereignisse und die Zahl der Koinzidenzen, die durch die Simulation des Myon-Pretriggers im Pad-System gefunden werden.*

Datensatz		Zahl der	Zahl der
Nummer	Typ	Ereignisse	Koinzidenzen
1	Minimum Bias	90 000	15 168
2	$\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$	30 000	56 914

Die Parameteranpassung wird mit dem Programmpaket Minuit [Jam 75] innerhalb der Analyseumgebung ROOT [Bru 97] durchgeführt. Nach der Anpassung werden die Häufigkeitsverteilung sowie der Normierungsparameter der Anpassungsfunktion skaliert, indem durch die Anzahl der Ereignisse des jeweiligen Datensatzes dividiert wird. In Abbildung A.1 ist die so bestimmte Koinzidenzratenverteilung zusammen mit der Anpassungsfunktion (A.3) für den ersten Datensatz, d. h. für die Minimum-Bias-Ereignisse dargestellt. Abbildung A.2 zeigt die Koinzidenzratenverteilung und die Anpassungsfunktion für die Monte-Carlo-Ereignisse mit Zerfällen des Typs $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$.

Die aus der Anpassungsrechnung gewonnenen Werte der Funktionsparameter sind in Tabelle A.2 für die beiden Datensätze zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass für beide Datensätze das Maximum der Anpassungsfunktion mit dem Mittelpunkt $(s,p) = (33{,}5\,,\,0)$ des Pad-Systems übereinstimmt. Die Koinzidenzverteilungen unterscheiden sich vor allem durch die unterschiedliche Abnahme der Koinzidenzrate in x- und y-Richtung. Dies kommt in Abbildung A.3 zum Ausdruck, wo das Verhältnis der Gewichte $g'_{\mathrm{J}/\psi}(s,p)/g'_{inel}(s,p)$ als Funktion

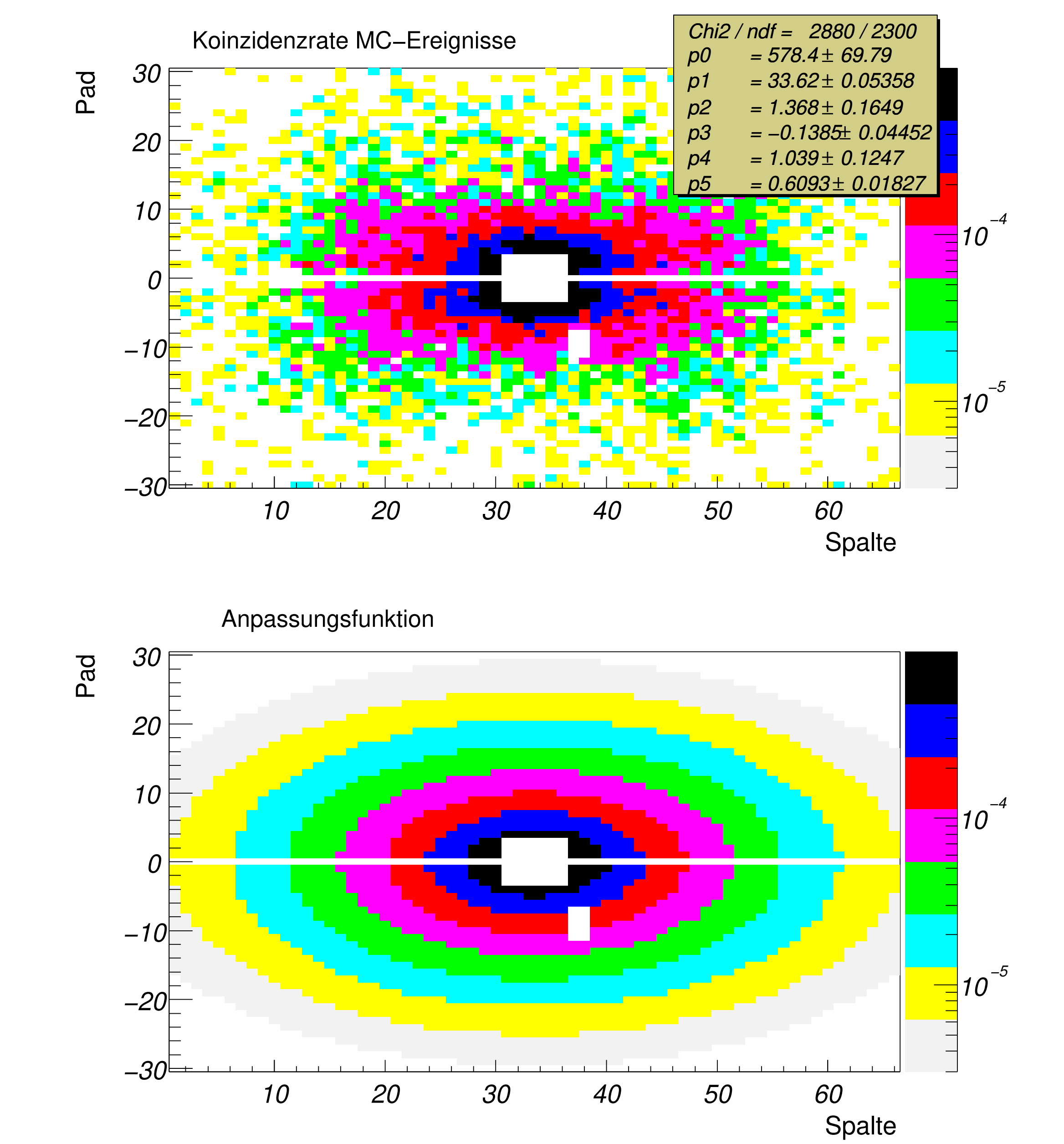


Abbildung A.1: *Koinzidenzratenverteilung (oben) und Anpassungsfunktion (unten) für Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignisse. Die Achsenskalierung ist für beide Histogramme identisch. Die Ergebnisse der Parameteranpassung sind im oberen Histogramm angegeben. Die Parameter entsprechen den in Formel (A.3) verwendeten wie folgt:* $p0 \equiv N_E/N$, $p1 \equiv a$, $p2 \equiv c_1$, $p3 \equiv b$, $p4 \equiv c_2$ *und* $p5 \equiv d$. N_E *ist die Gesamtzahl der Ereignisse des Datensatzes.*

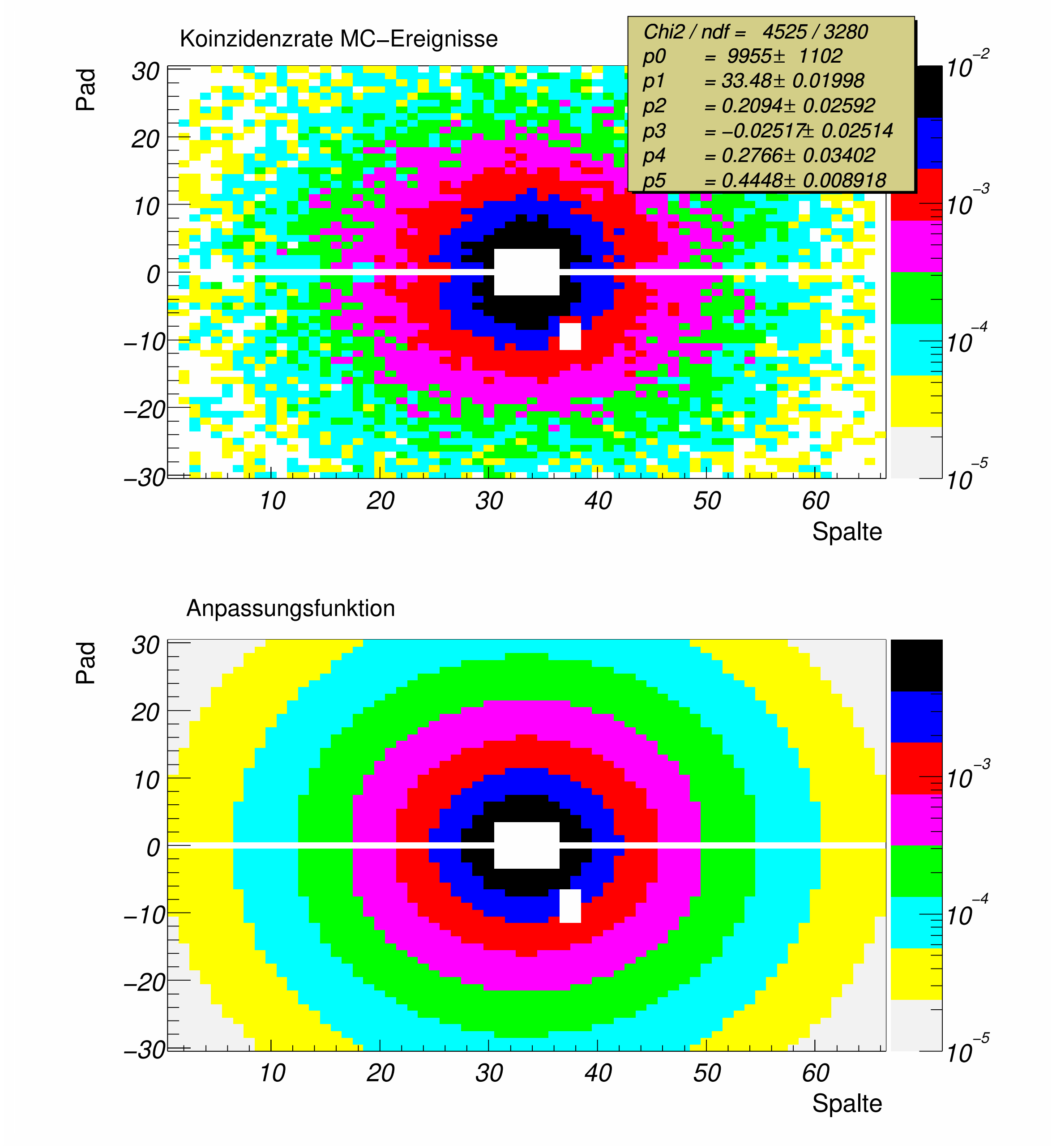


Abbildung A.2: *Koinzidenzratenverteilung (oben) und Anpassungsfunktion (unten) für Monte-Carlo-Ereignisse des Zerfalls $J/\psi \to \mu^+\mu^-$. Die Achsenskalierung ist für beide Histogramme identisch. Die Bezeichnung der im oberen Histogramm dargestellten Anpassungsparameter wird in der Bildunterschrift zu Abbildung A.1 erläutert.*

Tabelle A.2: *Werte der Funktionsparameter zur Beschreibung der Koinzidenzverteilung aus der Anpassungsrechnung. Angegeben sind die Werte für die Parameter in Funktion (A.3) für Datensatz 1 mit Minimum-Bias-Ereignissen und für Datensatz 2 mit Ereignissen, die je einen Zerfall* $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ *enthalten.*

Daten-	Parameterwerte					
satz	a	b	c_1	c_2	d	N^{-1}
1	$33{,}62 \pm 0{,}05$	$-0{,}14 \pm 0{,}04$	$1{,}37 \pm 0{,}17$	$1{,}04 \pm 0{,}13$	$0{,}61 \pm 0{,}02$	578 ± 72
2	$33{,}48 \pm 0{,}02$	$-0{,}03 \pm 0{,}03$	$0{,}21 \pm 0{,}03$	$0{,}28 \pm 0{,}03$	$0{,}44 \pm 0{,}01$	9955 ± 1102

der Spaltennummer s und der Padnummer p dargestellt ist. Zur Berechnung der Gewichte $g'_{\mathrm{J}/\psi}(s,p)$ und $g'_{inel}(s,p)$ wird die Funktion (A.3) mit den aus der Anpassung gewonnenen Parameterwerten für Ereignisse der Art $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu^-$ bzw. Minimum-Bias-Ereignisse verwendet, wobei die Funktion jeweils so normiert wird, dass die Summe der Gewichte aller Pads im Bereich des gesamten Pad-Systems 1 ergibt. Für Ereignisse des Typs $\mathrm{J}/\psi \to \mu^+\mu-$ ist die Koinzidenzverteilung nahezu kreissymmetrisch. Berücksichtigt man, dass die Pads in x- und y-Richtung unterschiedlich groß sind, so wird der exponentielle Abfall in die jeweilige Richtung durch folgende Parameter charakterisiert:

$$\tilde{c}_1(\mathrm{J}/\psi) \equiv c_1(\mathrm{J}/\psi) \cdot \Delta x = 0{,}21 \cdot 12{,}94\,\mathrm{cm} = 2{,}72\ \mathrm{cm}\ , \tag{A.4}$$

$$\tilde{c}_2(\mathrm{J}/\psi) \equiv c_2(\mathrm{J}/\psi) \cdot \Delta y = 0{,}28 \cdot 10{,}0\,\mathrm{cm} = 2{,}80\ \mathrm{cm}\ . \tag{A.5}$$

Für Minimum-Bias-Ereignisse ergeben sich aus den Parametern der Anpassung unter Berücksichtigung der Padgröße die Werte:

$$\tilde{c}_1(inel.) \equiv c_1(inel.) \cdot \Delta x = 1{,}37 \cdot 12{,}94\,\mathrm{cm} = 17{,}73\ \mathrm{cm}\ , \tag{A.6}$$

$$\tilde{c}_2(inel.) \equiv c_2(inel.) \cdot \Delta y = 1{,}04 \cdot 10{,}0\,\mathrm{cm} = 10{,}40\ \mathrm{cm}\ . \tag{A.7}$$

Hierbei bezeichnet $\Delta x = 12{,}94\,\mathrm{cm}$ die effektive Größe zweier hintereinander liegender MU3-Pads in x-Richtung, deren Signale auf Ausleseebene durch ein logisches ODER kombiniert werden. $\Delta y = 10{,}0\,\mathrm{cm}$ ist die Padgröße in y-Richtung. Die Koinzidenzverteilung für Minimum-Bias-Ereignisse fällt in y-Richtung deutlich schneller ab als in x-Richtung. Die Unterschiede zwischen beiden Koinzidenzverteilungen kommen dadurch zustande, dass die Mehrzahl der Koinzidenzen in Datensatz 2 von Myonen aus dem Zerfall des J/ψ-Mesons verursacht wird. Diese Myonen haben im Mittel einen deutlich höheren Transversalimpuls – in der Größenordnung der Hälfte der Masse des J/ψ-Mesons – als die Teilchen, die die Koinzidenzen in Datensatz 1 hervorrufen. Häufig gehen die Koinzidenzen in Minimum-Bias-Ereignissen auf Myonen zurück, die in Zerfällen von Pionen oder Kaonen im Flug entstehen. Diese Teilchen haben im Mittel einen geringeren Impuls als die Myonen aus J/ψ-Zerfällen und werden daher durch den Spektrometermagneten stärker in der x-z-Ebene abgelenkt. Wie in Abbildung A.3 zu erkennen, wird durch die Koinzidenzverteilung für J/ψ-Ereignisse der Bereich oberhalb und unterhalb des Protonstrahlrohrs im Verhältnis stärker gewichtet als durch die Verteilung für Minimum-Bias-Ereignisse. Diese gibt stattdessen dem Bereich der äußeren Spalten des Pad-Systems, insbesondere bei kleinen Padnummern, ein größeres Gewicht.

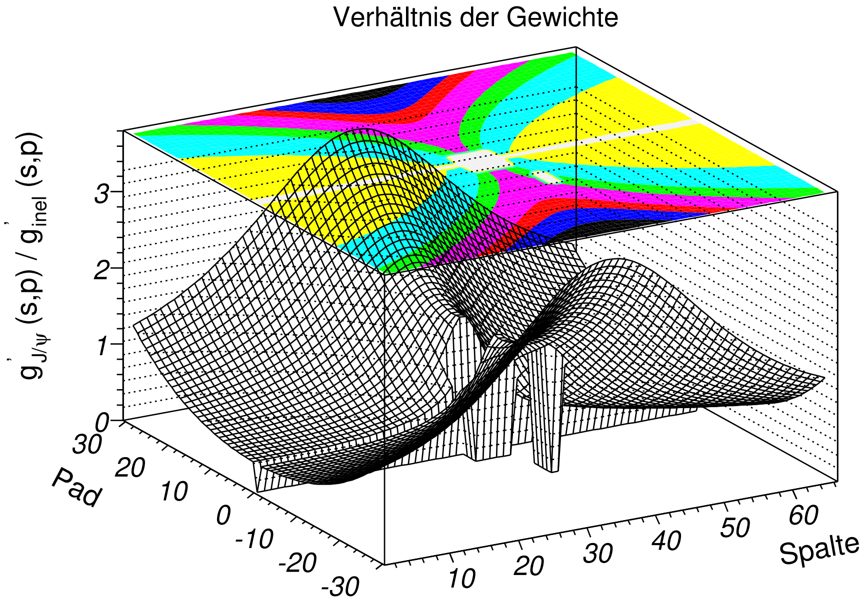


Abbildung A.3: *Verhältnis der Gewichte für $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ und Minimum Bias Monte-Carlo-Ereignisse. Die Gewichte $g'_{J/\psi}(s,p)$ und $g'_{inel}(s,p)$ sind mit der Funktion (A.3) mit den durch die Anpassungsrechnung gewonnenen Parameterwerten für beide Datensätze berechnet. Die Funktion (A.3) wird jeweils so normiert, dass die Summe der Gewichte aller Pads im Bereich des Pad-Systems 1 ergibt.*

Anhang B

Die Berechnung des Fehlers der Effizienzwerte

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Fehler der Effzienzwerte bestimmt werden (nach [Bra 92]).

Ist die Effizienz $\tilde{\varepsilon}$ eines Triggerkanals bekannt, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass von N Ereignissen in diesem Kanal N_{sel} selektiert werden, nach der Binomialverteilung:

$$P(N_{sel}) = \binom{N}{N_{sel}} \cdot \tilde{\varepsilon}^{N_{sel}} \cdot (1-\tilde{\varepsilon})^{N-N_{sel}} \ . \tag{B.1}$$

Der Erwartungswert $E(N_{sel})$ und die Varianz $V(N_{sel})$ sind für eine Binomialverteilung gegeben durch:

$$E(N_{sel}) = N\tilde{\varepsilon} \ , \tag{B.2}$$

$$V(N_{sel}) = N\tilde{\varepsilon}(1-\tilde{\varepsilon}) \ . \tag{B.3}$$

$\tilde{\varepsilon}$ kann aus einer Messung von N_{sel} und N bestimmt werden, wobei das Verhältnis

$$\varepsilon = \frac{N_{sel}}{N} \tag{B.4}$$

als Schätzwert für die unbekannte Effizienz $\tilde{\varepsilon}$ dient. Als Fehler σ_ε für den abgeschätzten Effizienzwert ε erhält man mit (B.3)

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\sigma(N_{sel})}{N} = \frac{\sqrt{V(N_{sel})}}{N} = \sqrt{\frac{\tilde{\varepsilon}\cdot(1-\tilde{\varepsilon})}{N}} \ , \quad \text{für } \tilde{\varepsilon} \neq 0{,}1 \ . \tag{B.5}$$

Der Fehler kann mit Hilfe der gemessenen Effizienz ε abgeschätzt werden durch

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\varepsilon\cdot(1-\varepsilon)}{N}} \ , \quad \text{für } \varepsilon \neq 0{,}1 \ . \tag{B.6}$$

Nachfolgend wird gezeigt, wie für die beiden Fälle $\varepsilon = 0$ – d. h. $N_{sel} = 0$ – und $\varepsilon = 1$ – gleichbedeutend mit $N_{sel} = N$ – der Fehler σ_ε bestimmt wird.

Der Fall $N_{sel} = 0$

Nach Gleichung (B.1) beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass kein Ereignis selektiert wird, d. h. $N_{sel} = 0$ ist,

$$P(0) = (1 - \varepsilon)^N \ . \tag{B.7}$$

In diesem Fall ist die bedingte Wahrscheinlichkeit $w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=0}$, dass die Effizienz den Wert ε besitzt, gegeben durch

$$w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=0} = \frac{(1-\varepsilon)^N}{\int_0^1 (1-\varepsilon)^N \mathrm{d}\varepsilon} = (N+1)(1-\varepsilon)^N \ . \tag{B.8}$$

Nun wird ein Konfidenzintervall $[0, \varepsilon_{max}]$ zu einer vorgegebenen Konfidenzwahrscheinlichkeit γ bestimmt:

$$\gamma = \int_0^{\varepsilon_{max}} w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=0} \mathrm{d}\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_{max})^{N+1} \tag{B.9}$$

Die obere Grenze des Konfidenzintervalls ε_{max} wird dabei so festgelegt, dass die Konfidenzwahrscheinlichkeit $\gamma = 68\,\%$ beträgt. Der Wert ε_{max} wird dann in Analogie zur Normalverteilung als Fehler σ_ε angegeben:

$$0{,}68 = \gamma = 1 - (1 - \varepsilon_{max})^{N+1} = 1 - (1 - \sigma_\varepsilon)^{N+1} \tag{B.10}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_\varepsilon = 1 - 0{,}32^{\frac{1}{N+1}} \ . \tag{B.11}$$

Der Fall $N_{sel} = N$

Nach (B.1) beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass alle Ereignisse selektiert werden, d. h. $N_{sel} = N$ ist,

$$P(N) = \varepsilon^N \ . \tag{B.12}$$

Bei $N_{sel} = N$ selektierten Ereignissen, ergibt sich die bedinget Wahrscheinlichkeit $w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=N}$, dass die Effizienz den Wert ε besitzt, zu

$$w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=N} = \frac{\varepsilon^N}{\int_0^1 \varepsilon^N \mathrm{d}\varepsilon} = (N+1)\varepsilon^N \ . \tag{B.13}$$

In diesem Fall wird ein Konfidenzintervall $[\varepsilon_{min}, 1]$ zu einer vorgegebenen Konfidenzwahrscheinlichkeit γ bestimmt:

$$\gamma = \int_{\varepsilon_{min}}^{1} w(\varepsilon)\Big|_{N_{sel}=N} \mathrm{d}\varepsilon = 1 - \varepsilon_{min}^{N+1} \tag{B.14}$$

Die untere Grenze des Konfidenzintervalls ε_{min} wird wie oben so festgelegt, dass die Konfidenzwahrscheinlichkeit $\gamma = 68\,\%$ beträgt.

$$0{,}68 = \gamma = 1 - \varepsilon_{min}^{N+1} \tag{B.15}$$

Als Fehler σ_ε ergibt sich auch hier:

$$\sigma_\varepsilon = 1 - \varepsilon_{min} = 1 - 0{,}32^{\frac{1}{N+1}} \ . \tag{B.16}$$

Anhang C

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
4LT	Fourth Level Trigger
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BX	Bunch Crossing
BxN	Bunch Crossing Number
CN	Cycle Number
CPLD	Complex Programmable Logic Device
DAQ	Data Acquisition
ECAL	Electromagnetic Calorimeter
ECAL EIC	ECAL Energy Inhibit Card
EVB	Event Builder
FCS	Fast Control System
FED	Front End Driver
FEE	Front End Electronics
FIFO	First in First out
FLT	First Level Trigger
GEM	Gas Electron Multiplier
HERA	Hadron-Elektron-Ring-Anlage
ITR	Inner Tracker
LUT	Look-Up Table
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MSGC	Microstrip Gaseous Chamber

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von vorhergehender Seite

Abkürzung	Erläuterung
MUX	Multiplexer
OTR	Outer Tracker
PCU	Pretrigger Coincidence Unit
PECL	Positive Emitter Coupled Logic
PLB	Pretrigger Link Board
PMB	Pixel Mapping Board
PMG	Pretrigger Message Generator
POL	Pretrigger Optical Link
RICH	Ring Imaging Cherenkov Hodoscope
RoI	Region of Interest
SLB	Second Level Buffer
SLT	Second Level Trigger
TDU	Trigger Decision Unit
TFU	Track Finding Unit
TLT	Third Level Trigger
TPU	Track Parameter Unit
TRD	Transition Radiation Detector
TTL	Transistor-Transistor Logic
VDS	Vertex Detector System
VME	VERSA Module Eurocard

Literaturverzeichnis

[Abe 01] K. Abe et al. (BELLE Kollaboration), *Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System*, Phys. Rev. Lett. **87**, 091802 (2001).

[Abt 97] I. Abt et al. (H1 Kollaboration), *The H1 detector at HERA*, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 310.

[Ada 97] M. Adamovich et al. (BEATRICE Kollaboration), *Search for the flavour-changing neutral-current decay* $D^0 \to \mu^+\mu^-$, Phys. Lett. B **408** (1997) 469.

[Ada 01a] M. Adams, *Studies on Hit Multiplicities*, Internes HERA – B Dokument 01-022 (2001).

[Ada 01b] M. Adams, *Study of the muon pretrigger acceptance for muon tracks from* $J/\psi \to \mu^+\mu^-$, Internes HERA – B Dokument 01-057 (2001).

[Ada 01c] M. Adams, *Study of Hit Multiplicities*, Internes HERA – B Dokument 01-059 (2001).

[Aff 00] T. Affolder et al. (CDF Kollaboration), *A measurement of* $\sin(2\beta)$ *from* $B \to J/\psi\, K^0_S$ *with the CDF detector*, Phys. Rev. D **61**, 072005 (2000).

[Ahm 01] Q. R. Ahmad et al. (SNO Kollaboration), *Measurement of the Rate of* $\nu_e + d \to p + p + e^-$ *Interactions Produced by* ^{8}B *Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory*, Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001).

[Alb 87] H. Albrecht et al. (ARGUS Kollaboration), *Observation of* B^0-$\overline{B^0}$*-Mixing*, Phys. Lett. B **192** (1987) 245.

[Alb 95] H. Albrecht, *ARTE Analysis and Reconstruction Tool*, Internes HERA – B Dokument 95-065 (1995).

[Ale 99] T. Alexopoulos et al. (E771 Kollaboration), *Measurement of the* $b\,\bar{b}$ *Cross Section in 800 GeV/c Proton-Silicon Interactions*, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 41.

[Alt 01] Altera™ Corporation, *FLEX 10K ™ Embedded Programmable Logic Device Family*, Datenblatt, Version 4.1 (2001).

[Ame 87] American National Standards Institute, *IEEE Standard for a Versatile Backplane Bus: VMEbus*, ANSI/IEEE Std 1014-1987 (1987).

[Amo 00] A. Amorim et al., *The HERA–B Database Services for Detector, Calibration, Slow Control and Data Classification*, in: CHEP 2000, Computing in High Energy and Nuclear Physics, 469.

[Ari 00] I. Ariño et al., *The HERA–B RICH*, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 289.

[Ato 92] G. S. Atoian et al., *Lead scintillator electromagnetic calorimeter with wavelength shifting fiber readout*, Nucl. Instrum. Meth. A **320** (1992) 144.

[Aub 01] B. Aubert et al. (BaBar Kollaboration), *Observation of CP Violation in the* B^0 *Meson System*, Phys. Rev. Lett. **87**, 091801 (2001).

[Avo 01] G. Avoni et al., *The electromagnetic calorimeter of the HERA–B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. A **461** (2001) 332.

[Bag 01] Y. Bagaturia et al., *Inner Tracker Performance in 2000*, Internes HERA–B Dokument 01-060 (2001).

[Bal 00] V. Balagura et al., *High-p_T trigger for HERA–B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 412.

[Bal 01] V. Balagura und M. Danilov, *First Level Trigger Based on High-p_T - ECAL and High-p_T - MUON Coincidences*, Internes HERA–B Dokument 01-109 (2001).

[Bar 00] R. Barate et al. (ALEPH Kollaboration), *Study of the CP asymmetry of $B^0 \to$ $J/\psi\, K^0_S$ decays in ALEPH*, Phys. Lett. B **492** (2000) 259.

[Bau 00] C. Bauer et al., *The HERA–B vertex detector system*, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 103.

[Bec 01] P. Bechtle, *Inbetriebnahme des HERA–B Myon-Pretrigger-Systems*, Diplomarbeit, Universität Dortmund (2001).

[Big 01] I. I. Bigi und N. G. Uraltsev, $D^0 - \overline{D^0}$ *Oscillations as a Probe of Quark-Hadron Duality*, Nucl. Phys. B **592** (2001) 92.

[Bon 98] R. Bonciani, S. Catani, M. L. Mangano und P. Nason, *NLL resummation of the heavy-quark hadroproduction cross-section*, Nucl. Phys. B **529** (1998) 424.

[Boo 94] G. Booch, *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*, Addison-Wesley, zweite Auflage (1994).

[Bou 95] D. Boutigny et al. (BaBar Kollaboration), BaBar *technical design report*, **SLAC-R-0457** (1995).

[Bra 92] S. Brandt, *Datenanalyse*, BI-Wiss.-Verlag, dritte Auflage (1992).

[Bru 97] R. Brun und F. Rademakers, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. Meth. A **389** (1997) 81. Siehe auch: http://root.cern.ch/.

[Bur 94] A. J. Buras, M. E. Lautenbacher und G. Ostermaier, *Waiting for the top quark mass,* $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$, B^0_s-$\overline{B^0_s}$ *mixing and CP asymmetries in B decays*, Phys. Rev. D **50** (1994) 3433.

[Bur 97] A. J. Buras und R. Fleischer, *Quark mixing, CP violation and rare decays after the top quark discovery*, in: A.J. Buras and M. Linder (Hrsg.), *Heavy Flavours II*, World Scientific (1997) 65, hep-ph/9704376 (1997).

[Cab 63] N. Cabibbo, *Unitary Symmetry And Leptonic Decays*, Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531.

[Cha 84] L. Chau und W. Keung, *Comments on the Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix*, Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 1802.

[Che 95] M. T. Cheng et al. (BELLE Kollaboration), *A Study of CP violation in B meson decays: Technical design report*, **KEK-Report 95-1** (1995).

[Chr 64] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch und R. Turlay, *Evidence For The 2 π decay of the* K_2^0 *meson*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 138.

[Coh 93] A. G. Cohen, D. B. Kaplan und A. E. Nelson, *Progress in Electroweak Baryogenesis*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **43** (1993) 27.

[Col 77] J. C. Collins und D. E. Soper, *Angular distributions of dileptons in high-energy hadron collisions*, Phys. Rev. D **16** (1977) 2219.

[Con 89] J. S. Conway et al., *Experimental study of muon pairs produced by 252-GeV pions on tungsten*, Phys. Rev. D **39** (1989) 92.

[Cru 98a] C. Cruse, *Entwicklung und Untersuchung von Komponenten zur Datenübertragung für den Myon-Pretrigger des HERA – B Experimentes*, Diplomarbeit, Universität Dortmund (1998).

[Cru 98b] C. Cruse, persönliche Mitteilung (1998).

[Cru 01a] C. Cruse, *Hardware Proposal of the RICH VETO System*, Internes HERA – B Dokument 01-022 (2001).

[Cru 01b] C. Cruse, persönliche Mitteilung (2001).

[DES 00] Abteilung Presse und Öffentlichkeitsarbeit, DESY, Hamburg (2000).

[Duj 00] D. Dujmic, R. Eckmann, R. F. Schwitters, *Performance of the HERA – B RICH*, Internes HERA – B Dokument 00-020 (2000).

[Dre 70] S. D. Drell und T.-M. Yan, *Massive Lepton-Pair Production in Hadron-Hadron Collisions at High Energies*, Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 316.

[Eig 00] V. Eiges, *Muon J/ψ triggering*, Vortrag Analyse Treffen der HERA – B Myon-Gruppe, DESY, Hamburg (2000).

[Fal 86] S. Falciano et al. (NA10 Kollaboration), *Angular Distributions of Muon Pairs produced by 194-GeV/c Negative Pions*, Z. Phys. C **31** (1986) 513.

[Fer 34] E. Fermi, *Trends to a Theory of Beta Radiation. (In Italienisch)*, Nuovo Cim. **11** (1934) 1, *An Attempt of a Theory of Beta Radiation. 1*, Z. Phys. **88** (1934) 161.

[Fey 49] R. P. Feynman, *Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics*, Phys. Rev. **76** (1949) 769.

[Fle 01] H. Fleckenstein, *Acceptance and Efficiency of the First Level Trigger*, Internes HERA – B Dokument 01-142 (2001).

[Fle 00] R. Fleischer, *B physics and CP violation*, hep-ph/0011323 (2000).

[Fri 57] J. I. Friedman und V. L. Telegdi, *Nuclear Emulsion Evidence for Parity Nonconservation in the Decay Chain* $\pi^+ - \mu^+ - e^+$, Phys. Rev. **105** (1957) 1681.

[Fri 73] H. Fritzsch, M. Gell-Mann und H. Leutwyler, *Advantages of the Color Octet Gluon Picture*, Phys. Lett. B **47** (1973) 365.

[Fuk 98] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Kollaboration), *Study of the atmospheric neutrino flux in the multi-GeV energy range*, Phys. Lett. B **436** (1998) 33, *Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1158 [Erratum-ib. **81** (1998) 4279].

[Gar 57] R. L. Garwin, L. M. Lederman und M. Weinrich, *Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon*, Phys. Rev. **105** (1957) 1415.

[Gel 64] M. Gell-Mann, *A Schematic Model of Baryons and Mesons*, Phys. Lett. **8** (1964) 214.

[Ger 98] E. K. E. Gerndt et al., *Description of Messages and Process-Logic for the First Level Trigger of HERA – B* , Internes Dokument der HERA – B FLT-Gruppe (1998).

[Ger 00a] E. Gerndt, *HERA – B Pretrigger and FLT Latency*, Internes HERA – B Dokument 00-013 (2000).

[Ger 00b] E. K. E. Gerndt und S. Xella (HERA – B Kollaboration), *HERA – B : trigger system*, Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 264.

[Gla 61] S. L. Glashow, *Partial Symmetries of Weak Interactions*, Nucl. Phys. **22** (1961) 579.

[Glä 97] J. Gläß und A Wurz, *Detector Data Transmission to the First Level Trigger for HERA – B* , Internes HERA – B Dokument 97-011 (1997).

[Glä 98] J. Gläß, *HERA – B FLT Message Transfer Module*, Internes Dokument, Lehrstuhl für Informatik V, Universität Mannheim (1998).

[Gra 01] W. Gradl, *The Readout System of the HERA-B Inner Tracker and Prospects of HERA – B in the Field of Drell-Yan Physics*, Dissertation, Universität Heidelberg (2001).

[Gro 00] D. E. Groom et al. (Particle Data Group Kollaboration), *Review of particle physics*, Eur. Phys. J. C **15** (2000) 1.

[Gur 00] A. Gurtu in C. S. Lim, T. Yamanaka (Hrsg.), *Proceedings of the 30th International Conference on High Energy Physics*, Vol. I, World Scientific Publ., Singapore (2001) 107.

[Har 95] E. Hartouni et al., *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** (1995).

[Har 98] P. F. Harrison und H. R. Quinn (Hrsg.), *The BaBar Physics Book, Physics at an Asymmetric B Factory*, SLAC-R-504 (1998).

[Har 99] R. Harr, *Muon Chamber and Channel Numbering*, Internes HERA – B Dokument 99-177 (1999).

[HER 00a] Die HERA – B Kollaboration, *Report on Status and Prospects*, **DESY-PRC 00/04** (2000).

[HER 00b] Die HERA – B Kollaboration, *Report on Status and Prospects, Executive Summary*, **DESY-PRC 00/04** (2000).

[HER 00c] Die HERA – B Kollaboration, *HERA – B Physics in 2001/2002*, Brief an das DESY-Direktorat (2000).

[HER 01] Die HERA – B Kollaboration, *Update on Status and Plans for 2001/2*, Internes HERA – B Dokument 01-064 (2001).

[HER 93] HERMES Kollaboration, *HERMES technical design report* (1993).

[Hus 01a] U. Husemann, persönliche Mitteilung (2001).

[Hus 01b] U. Husemann, *Prospects of Drell-Yan Physics with the HERA – B Detector*, Diplomarbeit, Universität Dortmund (2001).

[İşs 01] S. İşsever, *Entwicklung der Target-Steuersystems für das HERA – B–Experiment und Untersuchung der Eigenschaften des Targetbetriebs am HERA-Speicherring*, Dissertation, Universität Dortmund (2001).

[Jam 75] F. James und M. Roos, *Minuit' A System for Function Minimization and Analysis of the Parameter Errors and Correlations*, Comput. Phys. Commun. **10** (1975) 343.

[Jan 95] D. M. Jansen et al. (E789 Kollaboration), *Measurement of the Bottom-Quark Production Cross Section in 800 GeV/c Proton-Gold Collisions*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 3118.

[Jar 85] C. Jarlskog, *Commutator of the Quark Mass Matrices in the Standard Electroweak Model and a Measure of Maximal CP Nonconservation*, Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 1039.

[Jar 88] C. Jarlskog und R. Stora, *Unitarity Polygons and CP Violation Areas and Phases in the Standard Electroweak Model*, Phys. Lett. B **208** (1988) 268.

[Kle 92] K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, Teubner Studienbücher, dritte Auflage, Stuttgart (1992), Kap. 5.3.

[Kob 73] M. Kobayashi und T. Maskawa, *CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction*, Prog. Theor. Phys. **49** (1973) 652.

[Kol 98] M. Kolander, *Beschreibung der Pretrigger Coincidence Unit*, Universität Dortmund (1998).

[Kol 01] I. Kolotaev, persönliche Mitteilung (2001).

[Lam 78] C.S. Lam und W.-K. Tung, *Systematic approach to inclusive lepton pair production in hadronic collisions*, Phys. Rev. D **18** (1978) 2447.

[Lam 80] C.S. Lam und W.-K. Tung, *Parton-model relation without quantum-chromodynamic modifications in lepton pair production*, Phys. Rev. D **21** (1980) 2712.

[Lan 57] L. Landau, *On the Conservation Laws for Weak Interactions*, Nucl. Phys. **3** (1957) 127.

[Lee 56] T.D. Lee und C.N. Yang, *Question of Parity Conservation in Weak Interactions*, Phys. Rev. **104** (1956) 254.

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

[Lüd 54] G. Lüders, *On the Equivalence of Invariance under Time Reversal and under Particle-Antiparticle Conjugation for Relativistic Field Theories* Dansk Mat. Fys. Medd. **28**, Nr. 5 (1954).

[Mel 01] S. Mele, *Indirect Determination of the Vertex and Angles of the Unitarity Triangle*, hep-ph/0103040 (2001).

[Mot 97] Motorola® Inc., *AutoBahn™ Spanceiver™*, Datenblatt, Version 0 (1997).

[Nir 98] Y. Nir, *Flavor Physics and CP Violation*, in: N. Ellis, J. March-Russell (Hrsg.), *1998 European School on High-Energy Physics*, Proceedings, **CERN 99-04** (1999) 99.

[Noe 18] E. Noether, *Invariante Variationsprobleme*, Nachrichten der Kgl. Ges. d. Wiss., Math.-phys. Klasse, Heft 2, Göttingen (1918) 235.

[Ols 01] S.L. Olsen für die BELLE-Kollaboration, *Measurement of* $\sin 2\phi_1$, Konferenzvortrag Lepton-Photon 2001, Rom (2001).

[Pag 91] B. Page, *Diskrete Simulation. Eine Einführung mit Modula-2*, Springer-Lehrbuch, Berlin (1991).

[Pau 55] W. Pauli, *Niels Bohr and the Development of Physics; Exclusion Principle, Lorentz-Group and Reflection of Space-Time and Charge*, 2. Auflage, Pergamon Press, 1955, 30.

[Pyr 97] J. Pyrlik, *Schematische Zeichnung des HERA – B Detektors*, HERA – B Homepage (1997).

[Rie 98] H. Riege, R. van Staa, *HERA – B Pretrigger System – VETO Distribution Box*, Internes Dokument, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1998).

[Rie 00] H. Riege, J. Schütt, R. van Staa, *Muon Pretrigger Electronics – Message Generator*, Internes Dokument, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (2000).

[Sak 67] A. D. Sakharov, *Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe*, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5** (1967) 32, Sov. Phys. JETP Lett. **5** (1967) 24.

[Sal 68] A. Salam, *Weak and Electromagnetic Interactions*, in: N. Svartholm (Hrsg.), Proc. 8th Nobel Symposium, Almqvist und Wiksells, Stockholm (1968) 367.

[Sau 97] F. Sauli, *GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors*, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997) 531.

[Sav 98] V. Saveliev (HERA – B Kollaboration), *The HERA – B Transition Radiation Detector*, Nucl. Instrum. Meth. A **408** (1998) 289.

[Sch 00a] O. Schneider (LHCb Kollaboration), *Overview of the LHCb experiment*, Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 213.

[Sch 00b] U. Schwanke, *Trigger and Reconstruction Farms in the HERA – B Experiment and Algorithms for a Third Level Trigger*, Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin (2000).

[Sch 99] B. Schwenninger, *Mapping of the Muon Pad Chambers to Pretrigger Coincidence Unit and Pretrigger Message Generator Channels*, Version 1.4, Internes Dokument der HERA – B Myon-Pretrigger-Gruppe (1999).

[Sch 01] B. Schwenninger, *Das Myon-Pretrigger-System für das HERA – B Experiment*, Dissertation, Universität Dortmund (2001).

[Sch 48] J. Schwinger, *Quantum electrodynamics I-III*, Phys. Rev. **74** (1948) 1439, Phys. Rev. **75** (1948) 651, Phys. Rev. **76** (1949) 790.

[Spr 00] S. Spratte, *Bestimmung der Wechselwirkungsrate des HERA – B Targets und Untersuchung des Coasting Beam am HERA Protonen-Ring*, Dissertation, Universität Dortmund (2000).

[Ste 00] C. Stegmann *The Outer Tracker for HERA – B*, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 153.

[tHo 72] G. 't Hooft, M. Veltman, *Regularization and Renormalization of Gauge Fields*, Nucl. Phys. B **44** (1972) 189.

[Tit 00] M. Titov (für die HERA – B Myon-Kollaboration), *The MUON system in the HERA – B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 355.

[Tom 46] S.-I. Tomonaga, *On a relativistic formulation of the quantum theory of wave fields I-V*, Prog. Theor. Phys. **1** (1946) 27, Prog. Theor. Phys. **2** (1947) 101, 198, Prog. Theor. Phys. **1** (1948) 1, 101.

[Vog 01] R. Vogt, *Are the J/ψ and χ_c A Dependencies the Same?*, hep-ph/0107045 (2001).

[Wag 00] G. Wagner, *Aufbau und Test der mit Digitalen-Signal-Prozessoren realisierten Komponenten des Datennahmesystems von HERA−B*, Dissertation, Universität Hamburg (2000).

[Wei 67] S. Weinberg, *A Model of Leptons*, Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264.

[Wol 83] L. Wolfenstein, *Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix*, Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 1945.

[Wu 57] C.S. Wu et al., *Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*, Phys. Rev. **105** (1957) 1413.

[Zeu 00] T. Zeuner(für die HERA−B Kollaboration), *The MSGC-GEM Inner Tracker for HERA−B*, Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 324.

[Zeu 01] T. Zeuner, persönliche Mitteilung (2001).

[ZEU 93] ZEUS Kollaboration, *The ZEUS detector: Status report 1993*, **DESY-PRC 93/05** (1993).

[Zoc 00] A. Zoccoli (für die HERA−B Kollaboration), *The electromagnetic calorimeter of the HERA−B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. A **446** (2000) 246.

Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. P. Buchholz danke ich für die interessante und facettenreiche Aufgabenstellung. Ich danke besonders auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen, verantwortungsvolle Aufgaben zu übernehmen. Dies gab mir die Gelegenheit, vielfältige Kenntnisse zu erlangen.

Herrn Prof. Dr. D. Wegener danke ich für die Bereitschaft, die Zweitkorrektur zu übernehmen. Außerdem gebührt ihm Dank für die sehr angenehme und zugleich anregende Atmosphäre am Lehrstuhl.

Für die sehr gute Zusammenarbeit und die vielfältige Unterstützung danke ich M. Kolander und allen – auch ehemaligen – Kollegen in der Arbeitsgruppe PREFEcT, P. Bechtle, M. Böcker, M. Brüggemann, C. Cruse, U. Husemann, E. Klaus, I. Kolotaev und Dr. B. Schwenninger.

Für das Korrekturlesen des Manuskripts geht mein herzlicher Dank an U. Husemann, Dr. B. Schwenninger und Dr. K. Wacker, dem ich auch einige klärende Antworten zu Fragen der Statistik verdanke.

Stellvertretend für die vielen Mitglieder der HERA – B Kollaboration, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich hier Dr. B. Fominykh meinen Dank aussprechen. Er hat mich während seiner Aufenthalte in Dortmund geduldig in die „Geheimnisse" der HERA – B Software im Allgemeinen und von ARTE im Speziellen eingeführt.

Dem Graduiertenkolleg „Erzeugung und Zerfälle von Elementarteilchen" verdanke ich die Möglichkeit, an lehrreichen und interessanten Schulen und Konferenzen teilnehmen zu können.

Meinen Eltern danke ich zutiefst dafür, dass sie mich stets bedingungslos und tatkräftig auf meinem Lebensweg unterstützten. Ohne sie wäre dies niemals möglich gewesen.

Marion und Yannick, euch danke ich von ganzem Herzen für die Liebe und Freude, mit der ihr mein Leben erfüllt. Ich bin stolz auf das, was wir zusammen erreicht haben.

Die Beteiligung des Lehrstuhls EV am Experiment HERA – B wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter der Projektnummer 057DO55P gefördert.