Das Myon-Pretrigger-System für das **HERA – B** Experiment

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

DISSERTATION

von
Diplom-Physiker Björn Schwenninger
aus Stuttgart

Dortmund

Juni 2001

Gutachter: 1. Prof. Dr. P. Buchholz
2. Prof. Dr. D. Wegener

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 2001

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

In naturwissenschaftlicher Forschung liegt dem Gewinn neuer Erkenntnisse ein Zusammenspiel von Messungen und Modellvorstellungen zugrunde. Einerseits werden Modellvorstellungen in der Regel auf der Basis vorliegender Messungen entwickelt und liefern Vorhersagen für experimentell noch nicht untersuchte Bereiche. Andererseits erlauben weitere Messungen, diese Vorhersagen zu überprüfen. Dies führt entweder zu einer Bestätigung der Modellvorstellung, oder aber sie muß verworfen werden und durch andere Modelle ersetzt werden, die die Ergebnisse der Messungen erklären können.

In der Elementarteilchenphysik, die sich mit den kleinsten Konstituenten der Materie und den Kräften, die zwischen ihnen wirken, beschäftigt, können alle bisherigen Messungen im Rahmen des sogenannten Standardmodells mit hoher Genauigkeit beschrieben werden [Gur 00]. Diese Theorie beinhaltet jedoch mit den Massen der Teilchen und den Kopplungsstärken der Wechselwirkungen 25 freie Parameter. Diese können nicht aus ersten Prinzipien abgeleitet werden, sondern müssen durch Messungen bestimmt werden. Des weiteren kann eine Wechselwirkung, die Gravitation, bislang nicht im Rahmen des Standardmodells beschrieben werden. Da es neben den beiden dargestellten weitere aus theroretischer Sicht unbefriedigende Zusammenhänge gibt, werden intensive Bemühungen unternommen, theoretische Vorhersagen des Standardmodels experimentell zu prüfen, es gegebenenfalls zu falsifizieren und Ansätze für eine bessere Theorie zu finden.

Einen möglichen Test, der in mehreren Experimenten weltweit in unterschiedlicher Weise durchgeführt wird, stellt die Untersuchung der CP-Verletzung bei neutralen B-Mesonen dar. Abhängig von der – zu messenden – Stärke des Effektes ist er im Rahmen des Standardmodells erklärbar oder nicht. Letzterer Fall käme einer Widerlegung des Standardmodells in seiner heutigen Form gleich. Dann muß je nach dem Ergebnis der Messung das Standardmodell so erweitert werden, daß es zusätzliche Quellen für CP-verletzende Effekte enthält, oder durch eine neue Modellvorstellung ersetzt werden.

1.1 CP-Verletzung

In der modernen Physik ist der Zusammenhang von physikalischen Erhaltungsgrößen und der Symmetrie oder Invarianz von Naturgesetzen unter Transformationen, wie beispielsweise der CP-Transformation, von fundamentaler Bedeutung. Er basiert für kontinuierliche Transformationen auf dem Noether-Theorem [Noe 18], wonach zu jeder solchen Transformation, die die Bewegungsgleichungen eines Systems unverändert läßt, eine Symmetrie dieses Systems gehört. Ein Beispiel aus der klassischen Mechanik stellt der Zusammenhang der Invarianz unter räumlichen Translationen mit der Erhaltung des Impulses dar.

1.1.1 Diskrete Symmetrien

Für diskrete Symmetrien, also Symmetrien, die sich nicht aus infinitesimalen Teilen zusammensetzen lassen, gilt das Noether-Theorem nicht. Zu den diskreten Transformationen zählen räumliche Spiegelungen (Paritätstransformation P), zeitliche Spiegelungen (Zeit- bzw. Bewegungsumkehrtransformation T) und die Umkehr aller ladungsartigen Größen (Ladungskonjugation C). Zu den ladungsartigen Größen zählen, neben der elektrischen Ladung und dem magnetischen Moment, quantenmechanische Ladungen wie Leptonzahl, Baryonzahl, Strangeness, Charm oder Beauty. Die C-Transformation entspricht der der Überführung eines Teilchens in sein Antiteilchen.

Für die Einzeltransformationen P, T und C wurde experimentell gezeigt, daß sie in der starken und elektromagnetischen Wechselwirkung erhalten sind, nicht jedoch in der schwachen Wechselwirkung [Fri 57, Gar 57, Sch 57, Wu 57]. Da die Anwendung der CP-Transformation in allen Wechselwirkungen – auch in der schwachen – physikalische Zustände wieder in physikalische Zustände überführt, wird sie in Abgrenzung zur C-Transformation als physikalische Teilchen-Antiteilchen-Transformation bezeichnet. Es wurde angenommen, daß alle Kräfte invariant unter der CP-Transformation seien, gleichbedeutend mit einer Symmetrie aller Naturgesetze für Teilchen und Antiteilchen. Christenson et al. zeigten jedoch 1964, daß die langlebigen K^0-Mesonen CP-verletzend mit einem Verzweigungsverhältnis von etwa $2 \cdot 10^{-3}$ in zwei Pionen zerfallen [Chr 64]. Dies bedeutet nicht nur eine Verletzung der CP-Symmetrie, sondern indirekt auch eine Verletzung der Zeitumkehr T, da die Kombination CPT für alle lokalen und kausalen lorentzinvarianten Quantenfeldtheorien erhalten ist [Lüd 54, Pau 55]. In diesen T-verletzenden Teilchensystemen besitzt folglich die Zeit eine eindeutige Richtung.

Eine Verletzung der CP-Symmetrie ist auch eine notwendige Voraussetzung, um die Dominanz von Materie über Antimaterie im Universum zu erklären [Sak 67]. Bei der Entstehung des Universums herrschten so hohe Energien, daß die Effekte, die heute nur in teilchenphysikalischen Experimenten zu beobachten sind, von großer Bedeutung waren. Die vom Standardmodell der Elementarteilchenphysik vorausgesagte Größe der CP-Verletzung ist jedoch um mehrere Größenordnungen zu klein, um die kosmologischen Beobachtungen zu erklären (z. B. nach [Kol 90]). Mit Erweiterungen des Standardmodells ist dies jedoch möglich.

1.1.2 CP-Verletzung im Standardmodell

Im Rahmen des Standardmodells sind zwei Arten elementarer Teilchen, das heißt Objekte ohne Ausdehnung und ohne Substruktur bis zur Grenze der heutigen experimentellen

Tab. 1.1: Die zwölf elementaren Fermionen: Quarks und Leptonen.

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

Auflösung von etwa $10^{-18} - 10^{-19}$ m, bekannt. Zum einen gibt es Materieteilchen, aus denen alle Materie aufgebaut ist, zum anderen Teilchen, die die Kräfte zwischen den Materieteilchen vermitteln und als Austauschteilchen bezeichnet werden. Die Gravitationskraft wird im folgenden nicht betrachtet, da sie im Standardmodell nicht beschrieben wird.

Der Spin beschreibt eine quantenmechanische Eigenschaft von Teilchen, die kein mechanisches Analogon besitzt. Teilchen werden in Fermionen mit halbzahligem Spin und Bosonen mit ganzzahligem Spin unterteilt. Die Materieteilchen besitzen einen Spin von $\frac{1}{2}$ und gehören deshalb zur Gruppe der Fermionen. Sie werden in Leptonen mit ganzzahliger und Quarks mit drittelzahliger elektrischer Ladung unterschieden. In Tabelle 1.1 ist die Gliederung der zwölf elementaren Fermionen in drei Familien dargestellt. Ihre Massen nehmen dabei von den leichtesten Mitgliedern der ersten Familie bis zur dritten Familie hin zu. Das zu jedem Teilchen gehörende Antiteilchen ist nicht aufgeführt. Die stabile Materie aus den Teilchen der ersten Familie, Up-, Down-Quarks und Elektronen aufgebaut. Im Gegensatz zu Leptonen besitzen Quarks einen zusätzlichen Freiheitsgrad, der als Farbe bezeichnet wird. Diese Farbe wird jedoch in der Natur nicht beobachtet, da Quarks nie einzeln, sondern immer zusammengesetzt als sogenannte Hadronen vorkommen. Sie treten immer als Mesonen aus einem Quark und einem Antiquark oder als Baryonen aus drei Quarks auf. Das Proton ist ein Beispiel für ein Baryon mit der Quarkzusammensetzung uud.

Die Austauschteilchen der Kräfte, die einen Spin von 1 besitzen, werden Eichbosonen genannt. In Tabelle 1.2 sind sie mit ihren wichtigsten Eigenschaften aufgelistet. Die Gluonen vermitteln die starke Wechselwirkung, die für die Anziehung zwischen Quarks auch gegen die elektromagnetische Abstoßung verantwortlich ist, und tragen eine Farbladung. Die elektromagnetische Wechselwirkung, die eine unendliche Reichweite besitzt, wird durch die masselosen Photonen übertragen. Die schwache Wechselwirkung hat eine kurze Reichweite von etwa 10^{-18} m und wird durch den Austausch massiver Eichbosonen, der W- und Z-Bosonen, vermittelt. Die schwache Kraft ist z. B. die Ursache für den radioaktiven Zerfall von Neutronen.

Die Quark-Zustände, die an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen, entsprechen nicht den Masseneigenzuständen, die in Tabelle 1.1 aufgeführt sind. Die Transformation zwischen beiden Zustandssystemen kann mittels einer unitären 3×3-Matrix beschrieben

Tab. 1.2: Die Eichbosonen mit ihrer Ladung in Einheiten der Elementarladung und ihrer Masse [Gro 00].

Eichboson		Ladung	Masse
8 Gluonen	$\mathrm{g_i}, \mathrm{i} = 1...8$	0	masselos
Photon	γ	0	masselos
Z-Boson	Z^0	0	$(91{,}1882 \pm 0{,}0022)$ GeV
W^+-Boson	W^+	$+1$	$(80{,}419 \pm 0{,}056)$ GeV
W^--Boson	W^-	-1	$(80{,}419 \pm 0{,}056)$ GeV

werden, der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM-Matrix) [Kob 73]:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{d}' \\ \mathrm{s}' \\ \mathrm{b}' \end{pmatrix} = V_{CKM} \begin{pmatrix} \mathrm{d} \\ \mathrm{s} \\ \mathrm{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{\mathrm{ud}} & V_{\mathrm{us}} & V_{\mathrm{ub}} \\ V_{\mathrm{cd}} & V_{\mathrm{cs}} & V_{\mathrm{cb}} \\ V_{\mathrm{td}} & V_{\mathrm{ts}} & V_{\mathrm{tb}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathrm{d} \\ \mathrm{s} \\ \mathrm{b} \end{pmatrix}.$$

Sie verallgemeinert den Fall zweier Quark-Familien, in dem zur Parametrisierung der Übergänge ein Winkel ausreicht, der sogenannte Cabibbo-Winkel [Cab 63]. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Quarks verschiedener Art sind proportional dem Betragsquadrat des entsprechenden Matrixelementes der CKM-Matrix. Die verschiedenen Arten von Quarks werden als Flavour[1] bezeichnet.

Die Beträge der meisten Matrixelemente von V_{CKM} konnten aus schwachen Zerfällen der betreffenden Quarks oder aus tiefinelastischer Neutrino-Nukleon-Streuung bestimmt werden. Die Werte der 90%-Vertrauensintervalle sind [Gro 00]:

$$\begin{pmatrix} 0{,}9742 \ldots 0{,}9757 & 0{,}219 \ldots 0{,}226 & 0{,}002 \ldots 0{,}005 \\ 0{,}219 \ldots 0{,}225 & 0{,}9734 \ldots 0{,}9749 & 0{,}037 \ldots 0{,}043 \\ 0{,}004 \ldots 0{,}014 & 0{,}035 \ldots 0{,}043 & 0{,}9990 \ldots 0{,}9993 \end{pmatrix}. \tag{1.1}$$

Daraus ist zu erkennen, daß die Übergänge innerhalb einer Familie, ausgedrückt durch die Diagonalelemente der CKM-Matrix, verglichen mit den Übergängen zwischen den Familien dominieren. Besonders schwach sind die Kopplungen zwischen der ersten und der dritten Familie. Die offensichtlich vorhandene Hierarchie der Koppplungsstärken legt die Einführung eines Parameters nahe, nach dem die Matrixelemente entwickelt werden können. Die von Wolfenstein vorgeschlagene Parametrisierung der CKM-Matrix [Wol 83] führt den Parameter λ ein, der durch den Cabibbo-Winkel $\sin(\theta_C)$ gegeben ist. Damit läßt sich die CKM-Matrix als

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \tag{1.2}$$

[1] engl.: Geschmack

schreiben, wobei

$$\lambda \equiv \sin(\theta_C),$$
$$A\lambda^2 \equiv |V_{\mathrm{cb}}| \quad \text{und}$$
$$A\lambda^3(\rho - i\eta) \equiv V_{\mathrm{ub}}$$

gelten[Ros 97]. Damit ergeben sich die Zahlenwerte der Parameter zu

$$\lambda = 0{,}2205 \pm 0{,}0018 \quad ,$$
$$A = 0{,}808 \pm 0{,}058 \quad \text{und}$$
$$(\rho^2 + \eta^2)^{1/2} = 0{,}363 \pm 0{,}073 \quad .$$

Für drei Familien werden somit vier Parameter benötigt, um die Quarkübergänge zu beschreiben. Die Übergänge zwischen der ersten und zweiten Familie, ausgedrückt durch die linke obere 2×2-Submatrix, werden hingegen in dieser Näherung durch den einen Parameter λ beschrieben.

Von besonderer Bedeutung ist das Auftreten komplexer Anteile in der CKM-Matrix, falls der Parameter η von Null verschieden ist. Wenn in der Lagrange-Funktion einer Theorie komplexe Kopplungskonstanten auftreten, die nicht durch geeignete Definition der Phasen der Felder verschwinden, ist die CP-Symmetrie in dieser Theorie verletzt [BAB 98]. In diesem Fall kann CP-Verletzung im Rahmen des Standardmodells erklärt werden.

Aus der Unitaritätsbedingung für die CKM-Matrix folgen sechs Beziehungen zwischen Matrixelementen, von denen

$$V_{\mathrm{ud}}V_{\mathrm{ub}}^* + V_{\mathrm{cd}}V_{\mathrm{cb}}^* + V_{\mathrm{td}}V_{\mathrm{tb}}^* = 0 \tag{1.3}$$

besonders geeignet ist, um das Auftreten einer komplexen Kopplung zu veranschaulichen. Geometrisch entspricht Gleichung (1.3) einem Dreieck in der komplexen Ebene. Dies ist in Abbildung 1.1 graphisch als sogenanntes Unitaritätsdreieck veranschaulicht. Werden Terme bis zur Größenordnung λ^5 berücksichtigt, erhält man als Koordinaten $(\overline{\rho}, \overline{\eta})$ des oberen Eckpunktes [Bur 94]:

$$\overline{\rho} = \rho\,(1 - \frac{\lambda^2}{2}) \qquad \text{und} \qquad \overline{\eta} = \eta\,(1 - \frac{\lambda^2}{2})\,. \tag{1.4}$$

Zusätzlich sind in Abbildung 1.1 physikalische Prozesse angegeben, aus deren Untersuchung sich Winkel oder Seitenlängen experimentell bestimmen lassen. Da das Dreieck aus der Unitaritätsgleichung (1.3) der ersten und dritten Spalte, d. h. für d- und b-Quarks abgeleitet wird, sind insbesondere physikalische Prozesse, an denen B^0-Mesonen beteiligt sind, von Bedeutung. Um CP-Verletzung im Rahmen des Standardmodells nachzuweisen, müssen die relevanten Größen des Unitaritätsdreiecks so genau bestimmt werden, daß entschieden werden kann, ob die Fläche des Dreiecks von Null verschieden ist.

1.2 Grundlagen und Ziele des HERA – B Experimentes

Eines der Experimente, die sich die Untersuchung der Produktion und der Zerfälle von B-Mesonen zum Ziel gesetzt haben, mit besonderer Betonung der Suche nach CP-Verletzung, ist das HERA – B Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg [Loh 94].

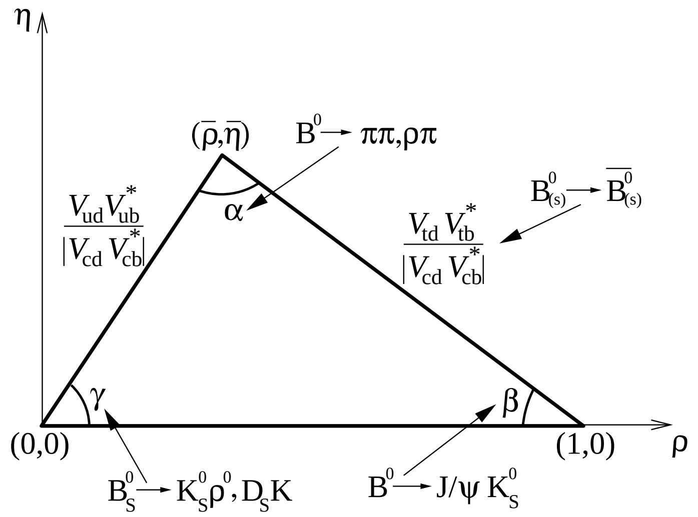

Abb. 1.1: Das Unitaritätsdreieck in der (ρ-η)-Ebene und physikalische Prozesse, mit denen sich Winkel und Seitenlängen bestimmen lassen.

1.2.1 Untersuchung der CP-Verletzung im B-Meson-System

Die Größe jedes CP-verletzenden Effektes im Rahmen des Standardmodells ist unabhängig vom betrachteten Teilchen-System proportional zur Fläche eines der sechs gleich großen Unitaritätsdreiecke. Diese Größe hängt vom Produkt der CP-Asymmetrie eines Zerfalles und seiner Resonanzbreite ab. Im K-Meson-System ist die CP-Asymmetrie gegenüber dem B-Meson-System um einen Faktor $A^2\lambda^2$ kleiner, dagegen gibt es bei B-Mesonen um denselben Faktor kleinere Resonanzbreiten [Ale 99a]. Abhängig vom zur Verfügung stehenden Phasenraum sind deshalb in der Regel die Zerfallsraten im B-Meson-System kleiner. Zusätzlich zum größeren CP-verletzenden Effekt gibt es bei B-Mesonen aufgrund der höheren Masse eine höhere Zahl von CP-Eigenzuständen, in die die Teilchen zerfallen können. Für diese Endzustände spielen nicht genau bekannte hadronische Matrixelemente keine Rolle [Big 89].

Bei B-Mesonen werden drei Mechanismen unterschieden, die zu CP-Verletzung führen:

1. Von direkter CP-Verletzung spricht man, wenn die Ursache im Zerfallsprozeß selbst liegt. Dies drückt sich z. B. durch unterschiedliche Raten für den Zerfall und den CP-konjugierten Zerfall aus.

2. Kommt es zur Mischung zwischen zwei CP-konjugierten Zuständen und sind die Raten der Übergänge unterschiedlich, wird dies als indirekte CP-Verletzung bezeichnet.

3. Die Interferenz der Amplituden aus Zerfall und Mischung kann zu CP-Verletzung führen, selbst wenn weder direkte noch indirekte CP-Verletzung auftritt. Zerfälle in denselben Endzustand können untersucht werden, wenn es sich um einen CP-Eigenzustand handelt.

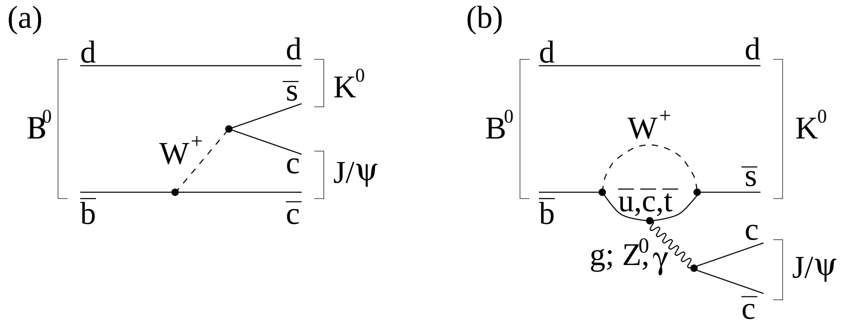

Abb. 1.2: Feynmandiagramme auf Quark-Niveau, die den größten Beitrag zum Zerfall $B^0 \to J/\psi K^0$ besitzen. Die Amplituden aus dem Diagramm auf Born-Niveau (a) und aus dem Pinguin-Diagramm (b) sind von gleicher Größenordnung.

Besondere Bedeutung für das HERA – B Experiment hat der Zerfallsprozeß

$$B^0/\overline{B^0} \to J/\psi\, K^0_S \to \ell^+\,\ell^-\,\pi^+\,\pi^- \qquad (\ell = \mathrm{e\ oder\ } \mu), \tag{1.5}$$

für dessen Nachweis der Aufbau des Detektors und des Triggersystems optimiert ist. Im Rahmen des Standardmodells wird für diesen Zerfall CP-Verletzung aus der Interferenz zwischen Zerfall und Mischung vorausgesagt, die Beiträge von direkter und indirekter CP-Verletzung sind vernachlässigbar klein. Dieser Zerfallsprozeß, der auch von anderen Experimenten mit ähnlicher Zielsetzung untersucht werden soll [Bou 95, Che 95, Bla 96, D0 96], wird als „goldener Zerfall“ bezeichnet, da er ein vergleichsweise großes Verzweigungsverhältnis besitzt, seine Endzustände experimentell gut meßbar sind und die theoretischen Unsicherheiten vernachlässigbar klein sind [BAB 98].

Zu dem Zerfall (1.5) tragen drei physikalische Prozesse bei: $B^0/\overline{B^0}$-Mischung, der Zerfall $B^0/\overline{B^0} \to J/\psi\, K^0/\overline{K^0}$ und $K^0/\overline{K^0}$-Mischung. Ein B^0-($\overline{B^0}$-)Meson kann direkt zerfallen oder zuvor durch Mischung in ein $\overline{B^0}$ (B^0) übergehen, das dann zerfällt. Zum Zerfall tragen hauptsächlich die Amplituden der in Abbildung 1.2 dargestellten Feynmandiagramme bei. Dabei treten zwei Phasen auf, die in die Berechnung der CP-Verletzung eingehen. Jedoch ist eine Phase um mindestens $\mathcal{O}(\lambda^2)$ unterdrückt [BAB 98] und kann somit vernachlässigt werden. Die im Endzustand des Zerfalls auftretenden K^0- und $\overline{K^0}$-Mesonen gehen, da sie keine Massen-Eigenzustände sind, durch Mischung in K^0_S- oder K^0_L-Mesonen über. Nur so kann der CP-Eigenzustand $J/\psi\, K^0_S$ erreicht werden und die Zerfalls- und Mischungsamplituden von B^0- und $\overline{B^0}$-Mesonen CP-verletzend interferieren.

Eine geeignete Observable zur Messung von CP-Verletzung ist die Asymmetrie A_{CP} zwischen den Zerfallsraten Γ von B^0- und $\overline{\Gamma}$ von $\overline{B^0}$-Mesonen. Aufgrund der oben beschriebenen physikalischen Zusammenhänge weist sie, sowohl zeitabhängig als auch zeitintegriert gemessen, einen besonders einfachen Zusammenhang mit dem Winkel β des Unitaritätsdreiecks auf:

$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(t) - \overline{\Gamma}(t)}{\Gamma(t) + \overline{\Gamma}(t)} = -\sin(2\beta)\,\sin(x_d t)\,, \tag{1.6}$$

$$A_{CP,int} \equiv \frac{\int \Gamma(t)dt - \int \overline{\Gamma}(t)dt}{\int \Gamma(t)dt + \int \overline{\Gamma}(t)dt} = -\sin(2\beta)\,\frac{x_d}{1+x_d^2}\,. \tag{1.7}$$

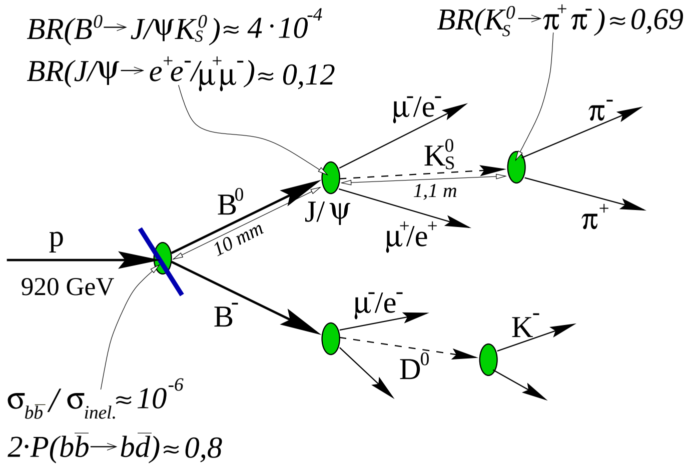

Abb. 1.3: Der goldene Zerfall für ein B^0-Meson (obere Hälfte). Die Produktionswahrscheinlichkeit für neutrale B-Mesonen und die Verzweigungsverhältnisse sind angegeben. Aus dem zugehörigen Zerfall eines B-Mesons (untere Hälfte) kann auf verschiedene Arten der Quarkinhalt des B-Mesons aus dem goldenen Zerfall bestimmt werden.

Dabei ist die Zeit t in Einheiten der Lebensdauer der B^0-Mesonen angegeben. Neben dem Winkel β ist A_{CP} von der durch den Parameter x_d ausgedrückten Mischung zwischen B^0- und $\overline{B^0}$-Mesonen abhängig [Alb 87].

Zur Produktion der B-Mesonen werden im HERA – B Experiment Protonen des Speicherringes HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) mit einer Energie von 920 GeV mit einem internen Drahttarget zur Wechselwirkung gebracht. In Abbildung 1.3 sind die Produktionswahrscheinlichkeit und die Verzweigungsverhältnisse für den goldenen Zerfall dargestellt. Daraus folgt, daß im Mittel nur bei einer von etwa 1,25 Millionen primären Wechselwirkungen ein B^0- oder $\overline{B^0}$-Meson produziert wird. Um eine möglichst hohe Rate goldener Zerfälle zu erzeugen, wird eine Wechselwirkungsrate am Target von 40 MHz angestrebt. Damit bleiben, unter Berücksichtigung der Verzweigungsverhältnisse, der Akzeptanz und Effizienz des Detektors, sowie der Effizienz der Rekonstruktion, von den erwarteten $2{,}96 \cdot 10^8$ B^0- oder $\overline{B^0}$-Mesonen pro Jahr etwa 490 rekonstruierte goldene Zerfälle mit Myonpaaren sowie 233 mit Elektron-Positron-Paaren im Endzustand [HER 00a]. Dabei wird eine Meßzeit von 10^7 s für ein Jahr angenommen. Die genannten Zahlen aufgezeichneter goldener Zerfälle können nur mit einem effizienten Triggersystem erreicht werden, das aus der großen Zahl inelastischer Wechselwirkungen die physikalisch interessanten Ereignisse herausfiltert. Da aus dem Endzustand nicht auf den Quarkinhalt des ursprünglich zerfallenen B-Mesons geschlossen werden kann, muß zur Messung von A_{CP} der Zerfall des B-Hadrons untersucht werden, das parallel zu dem B-Meson aus dem goldenen Zerfall produziert wird. Durch eine mögliche Mißidentifikation des Quarkinhalts wird der Fehler für $\sin(2\beta)$ vergrößert. Für diesen Fehler wird ein Wert von $\Delta\sin(2\beta) = 0{,}16$ für eine Datennahmeperiode von einem Jahr bei der nominellen Wechselwirkungsrate von 40 MHz erwartet, der sich auf einen Wert von $\Delta\sin(2\beta) = 0{,}23$ bei halbierter Wechselwirkungsrate verschlechtert [HER 00a]. Dies liegt über den Erwartungen der Fehler bereits laufender Experimente von etwa 0,11 [BAB 98, Che 95], stellt jedoch eine zu diesen Experimenten komplementäre Messung dar.

1.2.2 Weitere HERA – B Physik

Die Produktion von Mesonen und Hadronen, die schwere Quarks enthalten, eröffnet neben der Möglichkeit, CP-Verletzung zu messen, noch viele weitere Felder der Elementarteilchenphysik für das HERA – B Experiment.

Die physikalischen Zielsetzungen des HERA – B Experimentes können in kurzfristige und längerfristige Ziele unterteilt werden, wobei sich der kurze Zeitraum auf die Datennahmeperiode von Dezember 2001 bis Dezember 2002 bezieht. Grund für die Notwendigkeit dieser Unterscheidung ist eine etwa zweijährige Verzögerung bei der Fertigstellung des HERA – B Detektors sowie der Datennahme- und Triggersysteme, die ursprünglich für den Anfang des Jahres 1998 geplant war [Har 95]. Zum einen Teil sind Probleme mit der Strahlungshärte der Spurkammer-Systeme und die deshalb notwendigen Modifikationen der Detektortechnologien für die Verzögerung verantwortlich. Zum anderen konnte, teilweise dadurch verursacht, der Zeitplan für die Inbetriebnahme der Komponenten der ersten Triggerstufe nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund wurden die kurzfristigen Zielsetzungen an den Stand des Detektors im Jahr 2000 und realistische Annahmen über in kurzer Zeit erreichbare Verbesserungen angepaßt. Parallel dazu soll in den Jahren 2001 und 2002 der Detektor und das Triggersystem auf einen Stand gebracht werden, der es erlaubt, die ursprünglichen physikalischen Zielsetzungen zu verfolgen.

Im folgenden werden exemplarisch längerfristige und kurzfristige Zielsetzungen des HERA – B Experimentes – neben der Messung der CP-Verletzung mittels des goldenen Zerfalls – beschrieben werden. Weitere mögliche Untersuchungen werden in [HER 00a, HER 00b] dargestellt.

Längerfristige Zielsetzungen

Die Mischung zwischen $\mathrm{B_s^0}$- und $\overline{\mathrm{B_s^0}}$-Mesonen konnte bisher – im Gegensatz zu der Mischung zwischen $\mathrm{B^0}$- und $\overline{\mathrm{B^0}}$-Mesonen – noch nicht gemessen werden. Sie erlaubt, aus dem Verhältnis der Mischungsparameter x_d und x_s eine Seite des Unitaritätsdreiecks, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, zu bestimmen. Besonders geeignete Zerfallskanäle mit relativ großen Verzweigungsverhältnissen und geringen Multiplizitäten sind hierfür $\mathrm{B_s^0} \to \mathrm{D_s^-}\pi^+$ und $\mathrm{B_s^0} \to \mathrm{D_s^-}\pi^+\pi^+\pi^-$, da sie vollständig rekonstruiert werden können. Dies ermöglicht, zusammen mit einer sehr guten Vertex-Auflösung, eine hohe Genauigkeit der Eigenzeit-Messung, die wegen der hohen Oszillationsfrequenz von $x_s > 15{,}7$ [Gro 00] bei $\mathrm{B_s^0}/\overline{\mathrm{B_s^0}}$-Mesonen sehr wichtig ist. Wie bei der Messung der CP-Verletzung mittels des goldenen Zerfalls muß der Flavour des ursprünglich zerfallenden $\mathrm{B_s^0}/\overline{\mathrm{B_s^0}}$-Mesons bestimmt werden. Dazu wird die Ladung des Leptons gemessen, das aus dem Zerfall des zweiten B-Mesons stammt. Unter der Annahme einer Wechselwirkungsrate von 20 MHz ist eine Bestimmung von x_s in dem vom Standardmodell vorausgesagten Bereich möglich [HER 00a]. Dazu müssen jedoch weitreichende Verbesserungen der ersten Triggerstufe erreicht werden, um Ereignisse anzureichern, die Mesonen mit einem hohen Transversalimpuls enthalten.

Zerfallskanäle, bei denen Leptonen angereichert werden, können ohne die genannte Weiterentwicklung der ersten Triggerstufe untersucht werden. Ein Beispiel ist der seltene Zerfall $\mathrm{B}^0 \to \mathrm{K}^{*0}\mu^+\mu^- \to \mathrm{K}^+\pi^-\mu^+\mu^-$, der als Flavour-ändernder neutraler Strom im Standardmodell auf Born-Niveau verboten ist. Aus der Messung des Verzweigungsverhältnisses für diesen Zerfall kann darauf geschlossen werden, ob es physikalische Prozesse gibt, die im Rahmen des Standardmodells nicht beschrieben werden. Zudem bietet dieser Zerfallskanal sowohl aus theoretischer als auch experimenteller Sicht Vorteile: Es sind genaue theoretische Vorhersagen möglich und das vorausgesagte Verzweigungsverhältnis ist in der gleichen Größenordnung wie das des goldenen Zerfalls und damit experimentell zugänglich. Zudem ist der Endzustand experimentell klar nachweisbar. Für eine Wechselwirkungsrate von 20 MHz werden, mit Trigger-Effizienz für diesen Zerfall ϵ_{trig} von maximal 60 %, $20 \cdot \epsilon_{trig}$ vollständig rekonstruierte Zerfälle pro Jahr erwartet [HER 00a]. Damit kann das HERA – B Experiment einen signifikanten Beitrag leisten, wenn die Abgrenzung zu dem Zerfallskanal $\mathrm{B}^0 \to \mathrm{K}^{*0}\mathrm{J}/\psi \to \mathrm{K}^+\pi^-\mu^+\mu^-$ verbessert werden kann [Kla 00].

Kurzfristige Zielsetzungen

Die Untersuchung des Produktionsmechanismus von $\mathrm{b\overline{b}}$-Quark-Paaren in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen erlaubt es, theoretische Vorhersagen, die mit großen Fehlern behaftet sind, zu überprüfen [Fri 97]. Weiterhin ist der Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\mathrm{b\overline{b}}}$ für Abschätzungen über das zukünftige Potential des HERA – B Experimentes wichtig, da entsprechende Extrapolationen bisheriger Messungen Werte zwischen 8 und 60 nbarn/Nukleon erlauben [Ale 99b, Jan 95]. Experimentell läßt sich $\sigma_{\mathrm{b\overline{b}}}$ entweder aus rekonstruierten exklusiven Zerfallskanälen, wie etwa $b \to \mathrm{J}/\psi X \to \mu^+\mu^- X$, bestimmen oder aus inklusiven Messungen. Aufgrund der sehr guten Vertex-Auflösung und da ein großer kinematischer Bereich abgedeckt werden kann, kann diese Messung auf einer kurzen Zeitskala durchgeführt werden [HER 00b].

Untersuchungen der Lepton-Paar-Erzeugung aus Wechselwirkungen von Hadronen sind ebenfalls zugänglich. Im Rahmen des Drell-Yan-Modells lassen sie sich als Parton-Parton-Annihilation verstehen [Dre 70]. Aufgrund größerer theoretischer Unsicherheiten bietet es sich an, statt des gesamten Wirkungsquerschnitts die Winkelverteilung der Leptonen im Endzustand zu untersuchen. Nach störungstheoretischen Vorhersagen ist sie durch

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 1 + \lambda\cos^2(\theta) + \mu\sin(2\theta)\cos(\phi) + \frac{\nu}{2}\sin^2\theta\cos(2\phi) \tag{1.8}$$

gegeben, wobei θ den Polarwinkel zwischen der Richtung des positiv geladenen Leptons im Endzustand und der z-Achse im Ruhesystems des virtuellen Photons angibt und ϕ den Azimuthwinkel [Col 77]. Die Parameter λ und ν aus (1.8) sind über die Lam-Tung-Relation

$$\lambda = 1 - 2\nu \tag{1.9}$$

verbunden [Lam 80]. In Pion-Nukleon-Wechselwirkungen wurde experimentell nachgewiesen, daß diese Relation verletzt ist [Fal 86, Gua 88, Con 89]. Verschiedene theoretische Modelle können diese Verletzung erklären, jedoch erlauben die vorliegenden experimentellen Daten nicht, zwischen den Modellen zu unterscheiden. Das HERA – B Experiment bietet neben einem neu zugänglichen kinematischen Bereich und einer höheren Schwerpunktsenergie den Vorteil, diese Untersuchung zum ersten Mal mit Proton-Nukleon-Wechselwirkungen durchführen zu können. Erste Untersuchungen auf der Basis der im Jahr 2000 genommenen Daten zeigen, daß eine Überprüfung der Lam-Tung-Relation im HERA – B Experiment wegen großer Unsicherheiten bei der Behandlung des Untergrundes schwierig sein wird. Weitere Verbesserungen des Detektors, des Triggers und der Analysealgorithmen sind für eine mögliche Messung notwendig [Hus 01].

1.3 Ziele dieser Arbeit

Wie in Abschnitt 1.2 gezeigt wurde, sind physikalische Prozesse, die Myonen im Endzustand enthalten, im HERA – B Experiment von großer Bedeutung. Dies gilt sowohl für einen effizienten Nachweis als auch für das Ansammeln einer möglichst großen Zahl von physikalisch interessanten Ereignissen mit Myonen. Da die Datenrate der Ereignisse zu groß ist, um alle Daten zur weiteren Analyse speichern zu können, wird ein Triggersystem für die Vorauslese benötigt. Der Myon-Pretrigger liefert dabei Startpunkte für die Suche nach Myonspuren in der ersten Triggerstufe. Um die hohen Datenraten von etwa 10 GByte/s in der zur Verfügung stehenden Zeit von nur 1 μs verarbeiten zu können, ist das System aus drei Gruppen von spezialisierten Hardware-Modulen aufgebaut.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Myon-Pretrigger-Module in ein Gesamtsystem integriert. Dazu wurden zunächst Treiberfunktionen, vor allem für die beiden über Schnittstellen steuerbaren Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems, die Pretrigger Coincidence Unit (PCU) und den Pretrigger Message Generator (PMG), entwickelt. Darauf aufbauend wurden Programme entwickelt, um einzelne Module und Minimalsysteme, die einen Teil der logischen Kette des Myon-Pretriggers umfassen, betreiben und testen zu können. Das aus etwa 100 Hardware-Modulen bestehende Gesamtsystem wurde in das HERA – B Experiment integriert und dort während der Datennahmeperiode im Jahr 2000 erfolgreich betrieben. Zu diesem Zweck wurde Online-Software entwickelt, die mehrere Prozesse mit unterschiedlichen Aufgaben umfaßt. Sie nimmt die Initialisierung und Überwachung der Funktion des Myon-Pretriggers wahr und koordiniert die Schnittstellen zu anderen Systemen wie etwa der ersten Triggerstufe und dem Datennahmesystem. Besonderes Gewicht wurde dabei auf die Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit des Verhaltens sowohl der Online-Software als auch der Hardware gelegt. Dazu wird den Myon-Pretrigger-Modulen kontinuierlich sogenannte Monitoring-Information entnommen, ausgewertet und dauerhaft gespeichert, um auftretende Fehlfunktionen möglichst schnell zu erkennen. Diese würden ansonsten leicht zu einer Erhöhung der Totzeit des Triggersystems oder dem Aufzeichnen fehlerhafter Daten führen. Neben der Anforderung der Zuverlässigkeit muß die Online-Software die Initialisierung, das Starten und Stoppen des Myon-Pretrigger-Systems innerhalb kurzer Zeit durchführen, um keine negativen Auswirkungen auf die Effizienz der Datennahme im HERA – B Experiment zuzulassen. Anhand der zur Verfügung stehenden Monitoring-Information der Online-Software wurden abschließend Untersuchungen durchgeführt, um die Funktionsweise des Myon-Pretrigger-Systems zu charakterisieren und Vorschläge für Verbesserungen und Erweiterungen des Monitorings zu erarbeiten.

Zur Einordnung des Myon-Pretriggers in das HERA – B Experiment wird im folgenden Kapitel der HERA – B Detektor beschrieben, unter besonderer Betonung des Myon-Detektors, sowie das Trigger- und das Datennahmesystem. Der Aufbau des Myon-Pretriggers aus seinen Hardware-Komponenten und die Schnittstellen zu anderen Systemen werden in Kapitel 3 dargestellt, wobei insbesondere die Module PCU und PMG in den Mittelpunkt gestellt werden. Gegenstand des vierten Kapitels sind zunächst die Entwicklungen, die einen Betrieb der Einzelkomponenten und von Minimalsystemen ermöglichen. Dazu gehören die Treiberfunktionen, eine menügesteuerte Benutzeroberfläche und Steuer-Skripte, die die reproduzierbare Wiederholung von Zugriffen ermöglichen. Weiterhin werden Systemtestfunktionen beschrieben, die es erlauben, automatisierte Tests von Minimalsystemen über längere Zeiträume durchzuführen. Anschließend werden die Anforderungen für die Entwicklung der Online-Software und ihre Implementierung beschrieben. Die Online-Software umfaßt mehrere Prozesse, verschiedene Protokolle, die zur Kommunikation zwischen den Prozessen und mit anderen Systemen dienen, und Strukturen zur Speicherung und Darstellung von Daten. Neben der Darstellung des aktuellen Stands werden Vorschläge zur Verbesserung und zum Ausbau der Funktionalität der Online-Software gegeben. In Kapitel 5 werden Untersuchungen zur Funktion des Myon-Pretriggers auf der Basis von Daten des Monitorings dargestellt und Möglichkeiten für Erweiterungen des Monitorings erarbeitet. Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefaßt.

Kapitel 2

Das HERA – B Experiment

HERA – B ist als eines von vier Experimenten am Proton-Elektron-Speicherring HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg aufgebaut. Es verfolgt einen konträren Ansatz zu den beiden Experimenten BABAR [Bou 95] in den USA und BELLE [Che 95] in Japan, deren hauptsätzliche Zielsetzung ebenfalls der Nachweis der CP-Verletzung im System der neutralen B-Mesonen ist. Für diese Experimente mußten komplexe asymmetrische e^+e^--Speicherringe konstruiert werden, während die Anforderungen an die Detektoren moderat sind. HERA – B hingegen nutzt die Wechselwirkungen von Protonen aus dem vorhandenen HERA-Speicherring mit einem Drahttarget, um B-Mesonen zu erzeugen. Da jedoch der totale inelastische Wirkungsquerschnitt den Erzeugungsquerschnitt für B-Mesonen $\sigma_{b\bar{b}}$ etwa 10^6-fach übertrifft, sind die Detektorkomponenten hohen Teilchenflüssen und damit hohen Strahlenbelastungen ausgesetzt. Zugleich müssen sie fein segmentiert sein, um trotz der hohen Zahl von Spuren – vor allem nahe dem Protonstrahlrohr – eine gute Ortsauflösung erreichen zu können. Die feine Segmentierung wiederum führt zu einer hohen Zahl von Auslesekanälen, die in einer Datenrate des gesamten HERA – B Detektors von etwa 650 GByte/s resultiert. Daher ist eine Vorauswahl physikalisch interessanter Ereignisse notwendig, um die Datenrate so weit zu reduzieren, daß ein dauerhaftes Speichern der Detektorinformationen ermöglicht wird. Hierzu ist ein aufwendiges und flexibles Triggersystem zwingend erforderlich.

Im folgenden wird das Myon-Pretrigger-System in das HERA – B Experiment eingeordnet. Zunächst werden der HERA-Speicherring und das HERA – B Target dargestellt, bevor die Komponenten des HERA – B Detektors beschrieben werden. Hier steht der Myon-Detektor im Mittelpunkt, dessen Information vom Myon-Pretrigger verwendet wird. Anschließend wird das mehrstufige Triggersystem vorgestellt – unter besonderer Betonung der Pretrigger-Systeme und der ersten Triggerstufe. Schließlich wird ein Überblick über das Datennahmesystem gegeben.

2.1 Der Speicherring HERA und das HERA – B Target

HERA ist der einzige Speicherring, in dem Protonen einerseits und Elektronen bzw. Positronen andererseits beschleunigt, gespeichert und miteinander zur Wechselwirkung

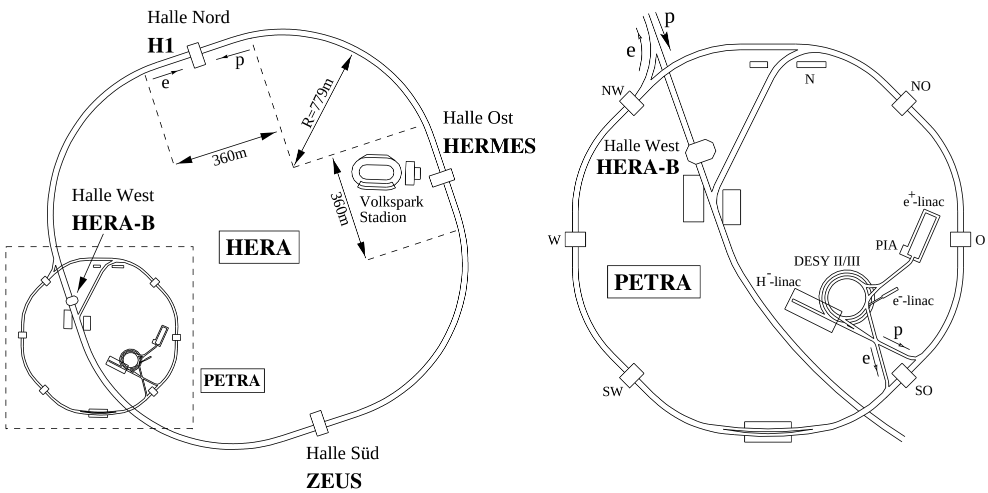

Abb. 2.1: Der Proton-Elektron-Speicherring HERA mit den vier Experimenten H1, HERMES, ZEUS und HERA – B [DES 00]. Die Vorbeschleuniger für HERA sind im rechten Teil vergrößert dargestellt.

gebracht werden. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird im folgenden der Begriff „Elektronen“ sowohl für Elektronen als auch Positronen verwendet. In zwei getrennten, parallel geführten Strahlrohren von einer Länge von 6336 m werden Protonen auf eine Endenergie von 920 GeV und Elektronen auf 27,5 GeV beschleunigt. An zwei der vier in Abbildung 2.1 dargestellten Wechselwirkungszonen werden Protonen und Elektronen zur Kollision gebracht. Dort befinden sich die Experimente H1 [Abt 93] bzw. ZEUS [ZEU 86], die die innere Struktur des Protons in Streuungen mit Elektronen untersuchen. An den beiden anderen Wechselwirkungszonen sind sogenannte Fest-Target-Experimente installiert, bei denen nur einer der beiden Strahlen von HERA genutzt wird, der auf ein fest installiertes Target trifft. Im HERMES-Experiment [HER 90] wird die Spin-Struktur von Protonen und Neutronen untersucht, indem der Elektronstrahl mit einem polarisierten Gas-Target zur Reaktion gebracht wird. Das HERA – B Experiment nutzt hingegen ausschließlich den Protonstrahl, um B-Mesonen in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen auf einem Drahttarget zu erzeugen.

Die Protonen laufen in HERA in Paketen von $5-7\cdot10^{10}$ Teilchen um, die als Bunche (engl. für Bund) bezeichnet werden. Insgesamt besteht eine Protonen-Füllung aus 220 Bunchen, von denen 180 Protonen enthalten. Der zeitliche Abstand der Bunche beträgt 96 ns, entsprechend einer Rate von 10,4 MHz und einer mittleren Rate gefüllter Proton-Bunche von 8,5 MHz.

Zur Erzeugung von $b\overline{b}$-Quark-Antiquark-Paaren aus Proton-Nukleon-Wechselwirkungen werden in den äußeren Bereich des Protonstrahls, den sogenannten Halo, bis zu acht Drahtbänder eingebracht. Sie besitzen eine typische Ausdehnung von 50 μm senkrecht zum Protonstrahl und 500 μm entlang des Protonstrahls. Sie sind, wie in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt, in zwei Stationen mit je vier Drähten angeordnet, wobei jeder Draht einzeln beweglich ist. Durch ihre geeignete Positionierung sollen Protonen des Halo, die später an den Aperturgrenzen von HERA verloren gingen, mit

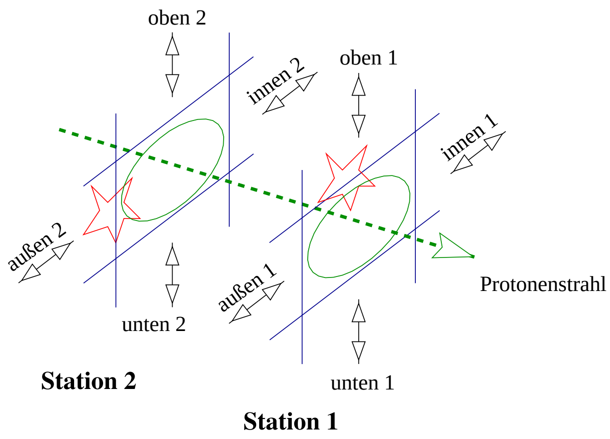

Abb. 2.2: Anordnung der Target-Drähte in zwei Stationen mit je vier einzeln beweglichen Drähten [İşs 01].

einem Draht zur Wechselwirkung gebracht werden. Die Anordnung in zwei Stationen erlaubt auch bei mehreren Wechselwirkungen eine Trennung der Vertices für jeden Proton-Bunch, der das Target passiert, dem sogenannten Bunch-Crossing. Für die nominelle Wechselwirkungsrate von 40 MHz müssen im Mittel etwa fünf gleichzeitige Wechselwirkungen pro Bunch-Crossing auftreten. Wichtige Anforderungen an das Target sind ein sicherer und zuverlässiger Betrieb sowie eine hohe Effizienz, um die geforderte Wechselwirkungsrate zu erzielen, wobei die Datennahme der drei anderen Experimente bei HERA nicht gestört werden darf [Ehr 00]. Diese Ziele sind erreicht worden, vor allem durch die Entwicklung eines automatisierten Steuerprogramms, das die Positionen der Targetdrähte bestimmt [İşs 01]. Um die Ereignisse im HERA – B Detektor rekonstruieren zu können, muß neben einer möglichst stabilen Target-Rate die Proton-Nukleon-Wechselwirkung alle 96 ns innerhalb eines schmalen Zeitfensters von 1 ns stattfinden. Dies wird, abhängig vom gewählten Target-Draht, erheblich durch einen Gleichstromanteil des Protonstrahls erschwert [Spr 00]. Er sorgt dafür, daß die Zeit der Wechselwirkung mit dem Target nicht genau bestimmt werden kann. Die Untersuchungen, wie dieser Effekt abgeschwächt werden kann, sind noch nicht abgeschlossen.

2.2 Die Komponenten des HERA – B Detektors

Der in Abbildung 2.3 schematisch dargestellte HERA – B Detektor ist als offenes Vorwärtsspektrometer ausgelegt. Diese Anordung der Detektorkomponenten erlaubt eine hohe Akzeptanz, d. h. eine Abdeckung von etwa 90 % des Raumwinkels im Schwerpunktsystem der Wechselwirkung, entsprechend einem Winkelbereich in der horizontalen Ebene von 10 mrad bis 250 mrad im Laborsystem. Daneben bietet die offene Anordnung logistische Vorteile, wie etwa eine gute Zugänglichkeit der Subdetektoren für Installationen oder Reparaturen. Um die in Kapitel 1 beschriebenen physikalischen Zielsetzungen verfolgen zu können, ist eine gute Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen notwendig, um ihren Impuls, ihre Ladung und ihre Zerfallsvertices bestimmen zu können. Die zu

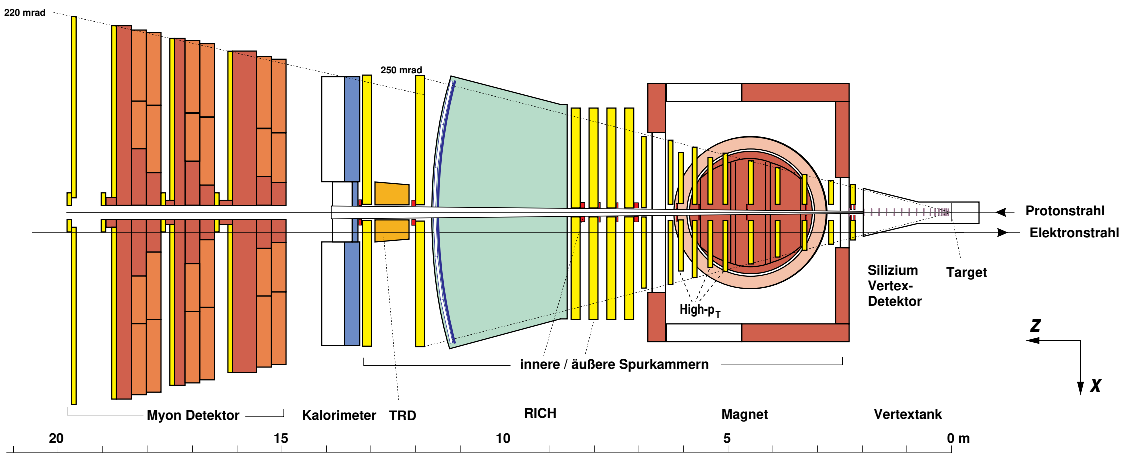

Abb. 2.3: Schematische Aufsicht des HERA – B Detektors [Pyr 97]. An das Target schließen sich die Detektorkomponenten zur Spurfindung an, der Vertex-Detektor, das innere und äußere Spurkammersystem und der High-p$_T$-Detektor. In Protonflugrichtung dahinter befinden sich die Teilchenidentifizierungssysteme, RICH-Detektor, Übergangsstrahlungsdetektor (TRD), elektromagnetisches Kalorimeter und Myon-Detektor.

diesem Zweck entwickelten Detektorkomponenten, der Vertex-Detektor, das innere und das äußere Spurkammersystem und der High-p$_T$-Detektor, werden in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Weiterhin muß zwischen verschiedenen Teilchenarten unterschieden werden können. Dazu dienen der Übergangsstrahlungsdetektor (Transition Radiation Detector, TRD), der RICH-Detektor (Ring Imaging Čerenkov Hodoscope), das elektromagnetische Kalorimeter und der Myon-Detektor. Ein Überblick über diese Komponenten wird in Abschnitt 2.2.2 gegeben, der Myon-Detektor wird aufgrund seiner Bedeutung für den Myon-Pretrigger in Abschnitt 2.2.3 detailliert beschrieben.

Die Definition des rechtshändigen Koordinatensystems, das in der Folge verwendet wird, ist in Abbildung 2.3 erkennbar: Die z-Achse wird durch die Protonflugrichtung definiert. Die Biegeebene des Magneten, in der geladene Teilchen abgelenkt werden, wird als x-z-Ebene bezeichnet, wobei die positive x-Richtung zum Zentrum des HERA-Speicherringes zeigt. Die positive y-Achse weist vertikal nach oben.

2.2.1 Spurdetektoren

Da geladene Teilchen durch Wechselwirkungen mit Materie von ihrer Bahn abgelenkt werden, schließen sich die Spurdetektoren des HERA – B Detektors in Protonrichtung an das Target an. So durchqueren die Teilchen möglichst wenig Materie, bevor sie nachgewiesen werden. Die Spurdetektoren gliedern sich nach ihrer Funktion in verschiedene Subsysteme, die unterschiedliche Anforderungen bezüglich ihrer Auflösung und Strahlenhärte erfüllen müssen. Die Komponenten, die nahe dem Protonstrahlrohr installiert sind, müssen dabei aufgrund der hohen Dichte geladener Teilchenspuren die feinsten Granularitäten besitzen und trotz der höchsten Strahlendosen ihre Funktion beibehalten.

Dies gilt insbesondere für den Vertex-Detektor, der bis auf 10 mm an den Protonstrahl heranbewegt werden kann. Insgesamt acht Superlagen von doppelseitigen Siliziumstreifenzählern bestehen aus jeweils zwei Lagen, die um 5° gegeneinander verdreht sind. Dies erlaubt eine dreidimensionale Rekonstruktion von Spuren. Die sieben sich an das Target anschließenden Superlagen sind innerhalb eines Stahltanks lateral und radial beweglich angeordnet. Dies erlaubt, die Zähler für die Datennahme nah an den Protonstrahl zu bewegen, sie aber zurückzuziehen, wenn Protonen in den Speicherring injiziert werden. Die gemessene Auflösung für Vertices liegt bei $\sigma_z \approx 600\,\mu$m longitudinal und $\sigma_{xy} \approx 80\,\mu$m transversal zum Protonstrahl [Bau 00].

Zur Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen dienen mehrere Superlagen von Spurkammern innerhalb des Magneten, zwischen Magnet und RICH-Detektor, sowie zwischen RICH-Detektor und elektromagnetischem Kalorimeter. Das Spurkammersystem gliedert sich in einen inneren und einen äußeren Teil mit unterschiedlichen Granularitäten und Detektortechnologien.

Für das innere Spurkammersystem (Inner Tracker) werden insgesamt 10 Superlagen mit Mikrostreifen-Gasdetektoren (Microstrip Gaseous Chamber, MSGC) verwendet, die den Bereich von 6 bis 30 cm Abstand vom Protonstrahl – entsprechend einem Polarwinkelbereich von 10 bis 100 mrad – abdecken. Um eine dreidimensionale Bestimmung von Teilchendurchgängen zu ermöglichen, besteht eine Superlage aus drei Lagen von MSGC-Detektoren, deren Streifen vertikal (0°) bzw. um ±5° gedreht orientiert sind. Da sich die ursprünglich verwendete Detektortechnologie als nicht ausreichend strahlenhart für die Betriebsbedingungen im HERA – B Experiment herausgestellt hat, werden im Driftraum der MSGC-Kammern Gas Electron Multiplier-Folien als Zwischenstufe der Gasverstärkung eingesetzt [Zeu 00]. Aufgrund der kurzen Betriebszeit des inneren Spurkammersystems während der Datennahme im Jahr 2000 konnte die Auflösung in der Biegeebene des Magneten (x-z-Ebene) bislang nur für einige Kammern außerhalb des Magneten bestimmt werden. Dort erreicht sie mit $\sigma_{xz} \approx 100\,\mu$m den erforderlichen Wert [Zeu 01a].

Das äußere Spurkammersystem (Outer Tracker) deckt den Polarwinkelbereich vom Überlappungsbereich mit dem inneren Spurkammersystem bis 250 mrad ab. Es besitzt im Vergleich zum Inner Tracker drei zusätzliche Superlagen innerhalb des Magneten, also insgesamt 13 Superlagen. Analog zum Inner Tracker besteht eine Superlage aus drei Stereolagen von Detektoren, die um 0° bzw. ±5° gedreht sind. Eine Stereolage ist aus einer Anordung von wabenförmigen Driftzellen aufgebaut, die einen Durchmesser von 5 mm im inneren und 10 mm im äußeren Bereich besitzen [Cap 00]. Nur die Stereolagen, die für die erste Triggerstufe verwendet werden, sind zur Erhöhung der Effizienz aus Doppellagen aufgebaut. Insgesamt wurde bisher für Zellen mit einem Durchmesser von 5 mm eine Ortsauflösung von etwa $350\,\mu$m in der Biegeebene des Magneten erreicht, deutlich über der geforderten Auflösung von $200\,\mu$m [HER 00a].

Innerhalb des Magneten befinden sich drei High-$\mathrm{p_T}$-Detektorlagen. Sie werden in der ersten Triggerstufe verwendet, um Ereignisse anzureichern, die Teilchenspuren mit hohem Transversalimpuls besitzen. Im inneren Teil werden Gas-Pixel-Kammern verwendet, im äußeren Teil bestehen die Detektoren aus zylinderförmigen Driftkammern, die

Kathoden-Pads besitzen.

2.2.2 Detektoren zur Teilchenidentifizierung

Um die zu einer rekonstruierten Spur gehörende Teilchensorte und auch neutrale Teilchen zu identifizieren, gibt es eine Reihe spezialisierter Detektorkomponenten.

Mit Hilfe eines RICH-Detektors kann die Masse eines Teilchens und damit seine Art identifiziert werden: Aus der Abstrahlung von Čerenkov-Photonen kann auf die Geschwindigkeit des Teilchens geschlossen werden, woraus die Masse berechnet werden kann, wenn der Impuls mit einer unabhängigen Messung bestimmt wird. Der HERA – B RICH-Detektor besteht aus einem Stahltank, der mit dem Strahlungsmedium C_4F_{10} gefüllt ist. Um die Ringe der Čerenkov-Photonen nachweisen zu können, wird ein optisches Abbildungssystem aus sphärischen und planaren Spiegeln verwendet. Mittels Photomultipliern werden aus den primären Photonen elektrische Signale erzeugt. Eine effektive Trennung von Elektronen, Pionen und Kaonen in verschieden Impulsbereichen ist mit diesem Detektorsystem möglich, es kann sogar in beschränktem Umfang zur Rekonstruktion von Spuren verwendet werden [HER 00a].

Zur Trennung von Elektronen und Hadronen im inneren Bereich, wo die Dichte der Teilchenspuren am höchsten ist, wird ein Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) verwendet. Er besteht aus einer feinsegmentierten Anordnung von Polypropylen-Fasern und zylinderförmigen Proportional-Kammern.

Das elektromagnetische Kalorimeter (Electromagnetic Calorimeter, ECAL) dient in erster Linie zur Bestimmung von Kandidaten für Elektron-Spuren für das Triggersystem. Weiterhin erlaubt es eine gute Trennung von Elektronen und Hadronen sowie den Nachweis von und das Triggern auf Photonen. Das HERA – B ECAL ist ein Sampling-Kalorimeter, in dem Lagen aus Konvertermaterial mit Lagen aus aktivem Szintillatormaterial abwechseln. Das Szintillationslicht wird über Wellenlängenschieber auf Photomultiplier geleitet, die es in elektrische Signale umwandeln. Das ECAL besitzt drei Bereiche mit unterschiedlicher Segmentierung, abhängig vom Abstand vom Protonstrahlrohrs, und seine Tiefe beträgt etwa 20 Strahlungslängen [Zoc 00].

2.2.3 Das Myon-Detektorsystem

Informationen des Myon-Detektors werden sowohl für die Identifizierung von Myonen bei der Analyse gespeicherter Daten verwendet, als auch für die Entscheidung des Triggersystems, insbesondere im Myon-Pretrigger-System und der ersten Triggerstufe.

Myonen unterscheiden sich von anderen geladenen Teilchen durch ihren größere Reichweite beim Durchgang durch Materie. Sie werden deshalb nachgewiesen, indem durch die Verwendung von Absorbermaterial vor dem Nachweisdetektor die Wahrscheinlichkeit für den Durchgang anderer geladener Teilchen als Myonen minimiert wird. Aus diesem Grund befindet sich das Myon-Detektorsystem mit einem Abstand von etwa 15 m bis 19,5 m am weitesten vom Drahttarget entfernt. Wie in Abbildung 2.4 gezeigt, besteht es aus drei Blöcken Absorbermaterial, den Myon-Filtern MF1 bis MF3, sowie vier Superlagen mit Nachweisdetektoren, MU1 bis MU4. Die Gesamtdicke des Absorbers, der aus

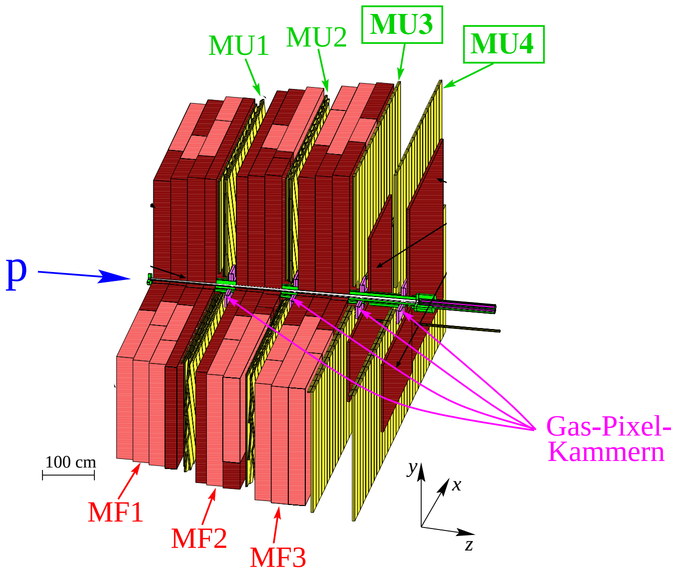

Abb. 2.4: Darstellung des Myon-Detektorsystems mit drei Blöcken Absorbermaterial, MF1 bis MF3, und vier Superlagen mit Nachweisdetektoren, MU1 bis MU4 (nach [Fom 97]). Im inneren Bereich bestehen sie aus Gas-Pixel-Kammern und im äußeren Bereich aus Proportionalkammern, in den Lagen MU3 und MU4 auch mit Kathodenpad-Auslese.

Eisen und Stahlbeton besteht, beträgt etwa 3 m. Sie ergibt sich aus zwei Randbedingungen: Um die Wahrscheinlichkeit für das Durchdringen des Absorbers für andere Teilchen als Myonen zu minimieren, muß möglichst viel Absorbermaterial vorhanden sein. Da jedoch Spuren im Myon-Detektor mit Spuren im inneren und äußeren Spurkammersystem kombiniert werden müssen, dürfen die Myonen nicht zu stark durch Vielfachstreuung abgelenkt werden. Aus der Dicke des Absorbers kann geschlossen werden, daß Myonen mit einem Impuls von mehr als 4,5 GeV/c nachgewiesen werden können [Tit 00]. Zur Unterdrückung von vor allem strahlinduziertem Untergrund ist zwischen den Superlagen MU3 und MU4 im inneren Bereich ein nur etwa 5 cm dicker Stahlabsorber installiert, um die Myonen zwischen diesen beiden Lagen möglichst wenig zu streuen. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben wird, werden die Informationen dieser beiden Superlagen für den Myon-Pretrigger verwendet.

Es werden insgesamt drei verschiedene Arten von Nachweisdetektoren im Myon-System verwendet: Proportionalkammern, Pad-Kammern und Gas-Pixel-Kammern.

Die Proportionalkammern werden im äußeren Bereich der Superlagen MU1 und MU2 benutzt. Sie bestehen aus drei Doppellagen, deren Anodendrähte parallel zur y-Achse bzw. um $\pm 20°$ gedreht angeordnet sind. Dies ermöglicht eine Rekonstruktion der Ortskoordinate in y-Richtung. Die einzelnen Zellen haben eine Querschnittsfläche von $14 \times 12\,\mathrm{mm}^2$, die die Driftzeiten innerhalb einer Zelle auf weniger als 96 ns beschränkt, den Abstand der primären Proton-Nukleon-Wechselwirkungen. Um die Antwortzeiten

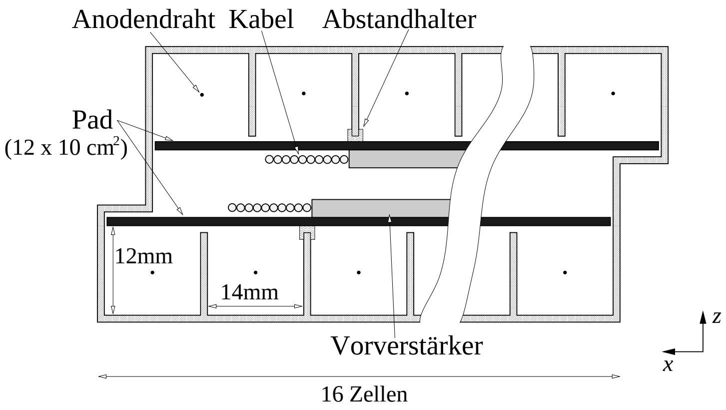

Abb. 2.5: Querschnitt einer Pad-Kammer. Die Skala ist in x-Richtung unterbrochen. In einer Kammer befinden sich zwei um die halbe Größe einer Zelle verschobene Doppelspalten von Kathoden-Pads.

der Signale zu begrenzen, sind die Anodendrähte, die einen Durchmesser von 45 μm besitzen, maximal etwa 3 m lang. Deshalb sind die Superlagen horizontal in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. Um Bereiche geringer Nachweiseffizienz zu vermeiden, sind die beiden Einzellagen einer Doppellage um eine halbe Zellgröße gegeneinander verschoben.

Im äußeren Bereich der MU3- und der MU4-Superlage sind Pad-Kammern installiert. Sie bestehen aus einer Doppellage von Proportionalkammern, deren Anodendrähte parallel zur y-Richtung verlaufen. Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wird das offene Profil der Zellen durch Kathoden-Pads aus kupferbeschichtetem Phenol abgeschlossen. Innerhalb einer Pad-Kammer befinden sich je zwei um die halbe Größe einer Zelle verschobene Spalten von Kathoden-Pads. Jede Spalte besteht aus 30 (MU3) bzw. 29 Pads (MU4), wobei die Normgröße $12{,}1 \times 10{,}0\,\mathrm{cm}^2$ für MU3- und $12{,}1 \times 10{,}5\,\mathrm{cm}^2$ für MU4-Pads beträgt. Davon abweichend sind die MU3-Pads der ersten Reihe im Trennungsbereich der Superlagen, also bei $y = 0$, kleiner und die MU4-Pads der letzten Reihe, d. h. bei maximalem $|y|$, größer. Die bei einem Teilchendurchgang influenzierten Signale werden verstärkt, um sie über etwa 3 m lange Kabel zur Ausleseelektronik außerhalb der Kammer zu übertragen. Dazu dient ein direkt auf dem Kathoden-Pad angebrachter Vorverstärker. Da die Informationen der Kathoden-Pads für den Myon-Pretrigger verwendet werden und dort eine hohe Effizienz für den Nachweis von Teilchendurchgängen wichtig ist, werden je zwei in z-Richtung hintereinander liegende Pads gemeinsam ausgelesen. Im weiteren werden diese durch ein logisches ODER der beiden Kathoden-Pads gebildeten Informationen auf Ausleseebene als „Pads“ bezeichnet. Abbildung 2.6 zeigt schematisch die Anordnung der Pads in der x-y-Ebene und das in der Folge verwendete Numerierungsschema für die Spalten und Reihen des Pad-Systems.

Im Bereich der höchsten Teilchenspurdichten nahe dem Protonstrahlrohr werden in den vier Superlagen Gas-Pixel-Kammern verwendet. Sie sind in jeweils vier Quadranten mit einer kleinen Überlappung um das Protonstrahlrohr installiert. Eine Pixelzelle besteht aus einem 25 μm dicken Signaldraht und vier 500 μm dicken Potentialdrähten. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, haben diese Pixelzellen eine Tiefe von 3 cm in z-Richtung,

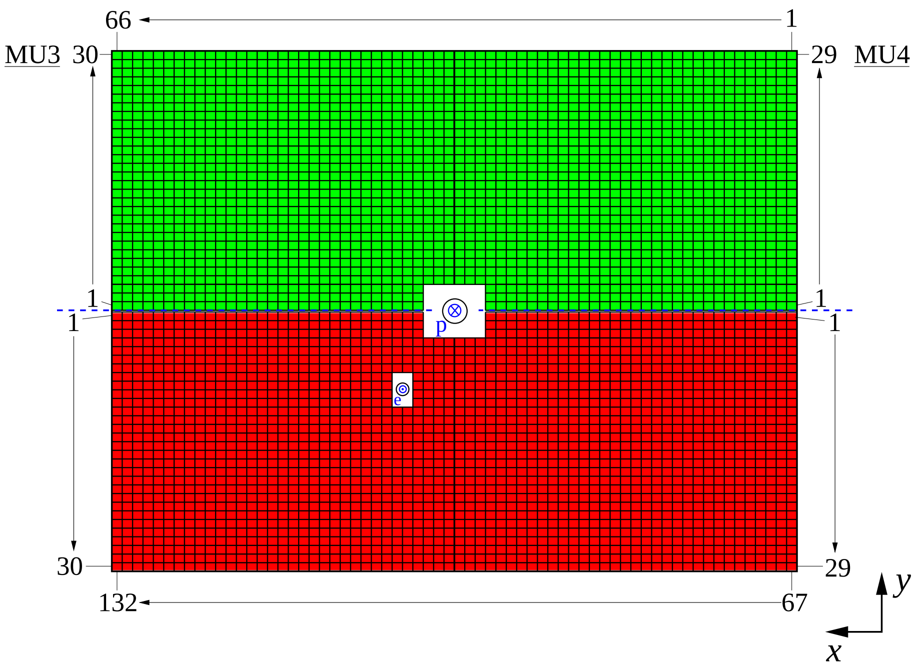

Abb. 2.6: Anordnung der Pads auf Ausleseebene der Superlagen MU3 und MU4 in der x-y-Ebene. Insgesamt besteht MU3 (MU4) aus 132 Spalten mit 30 (29) Pads. Nur im Bereich des Pixel-Systems und um das Elektronstrahlrohr ist diese Anordnung unterbrochen. Das Numerierungsschema für die Spalten und Reihen des Pad-Systems ist ebenfalls eingezeichnet.

so daß die Teilchen eine große Strecke sensitiven Detektorvolumens passieren und deshalb Signale mit großer Signalhöhe erzeugen. Die Grundfläche einer Pixelzelle beträgt $9{,}0 \times 9{,}0\,\text{mm}^2$ für die Superlagen MU1 bis MU3 und $9{,}4 \times 9{,}4\,\text{mm}^2$ für MU4. Um die Zahl der Auslesekanäle zu reduzieren und gleichzeitig eine ausreichend hohe Ortsauflösung beizubehalten, werden Pixelzellen zu einzelnen Auslesekanälen zusammengefaßt: In den Superlagen MU1 und MU2 werden 2×2 Pixelzellen gemeinsam ausgelesen, in MU3 und

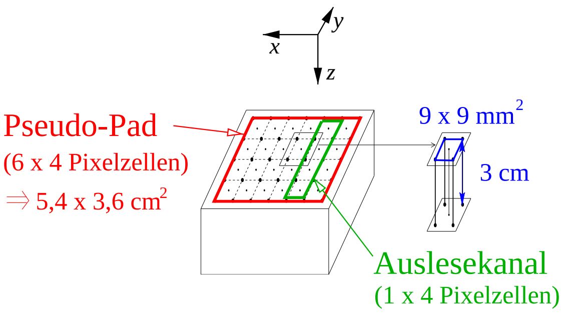

Abb. 2.7: Ausschnitt einer Gas-Pixel-Kammer der Superlage MU3. Vier Pixelzellen in y-Richtung werden zu einem Auslesekanal zusammengefaßt, sechs Auslesekanäle in x-Richtung zu einem „Pseudo-Pad“ für den Myon-Pretrigger.

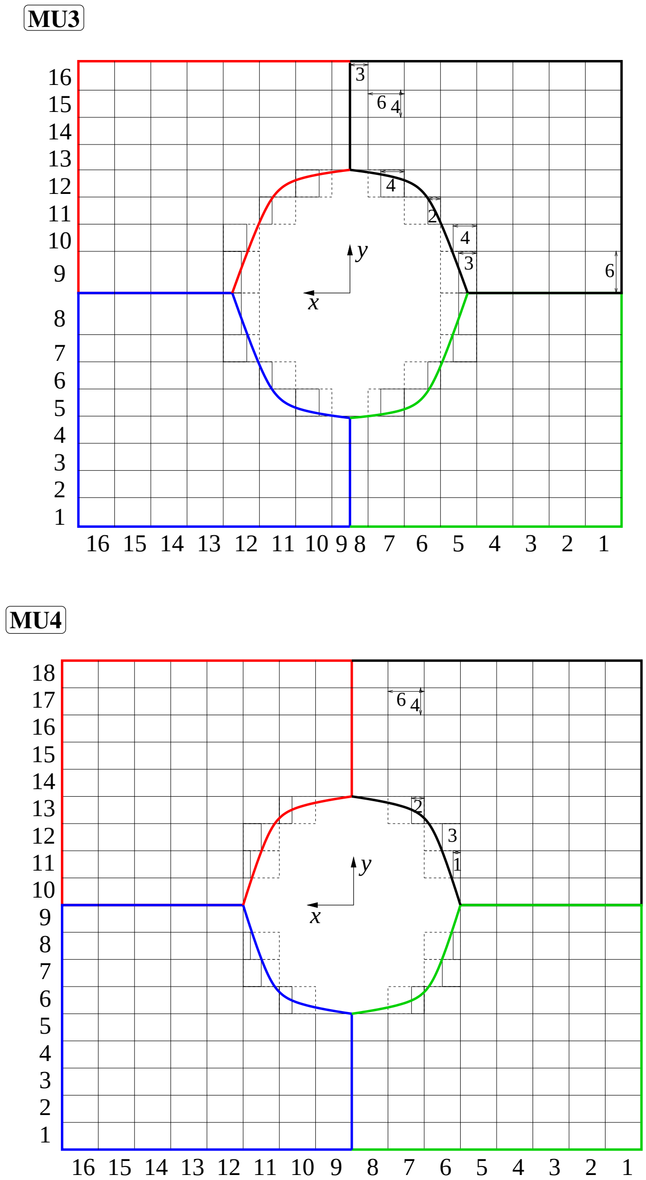

Abb. 2.8: Anordnung der Pseudo-Pads für den Myon-Pretrigger in MU3 und MU4, nach [Sch 99a]. MU3 umfaßt 16 Reihen und MU4 18 Reihen mit jeweils 16 Pseudo-Pads mit einer Normgröße von 6 × 4 Pixelzellen. Die Überlappung in x- und in y-Richtung zwischen benachbarten Quadranten ist aus Darstellungsgründen nicht eingezeichnet. Das Numerierungsschema für das Pixel-System ist dargestellt.

MU4 1 × 4 Pixelzellen. Für den Myon-Pretrigger werden jeweils sechs Auslesekanäle in x-Richtung für MU3 und MU4 zu „Pseudo-Pads“ zusammengefaßt. In Abbildung 2.8 ist die Anordnung und das Numerierungsschema der Pseudo-Pads der Superlagen MU3 und MU4 dargestellt [Sch 99a]. Zwischen den jeweils vier Quadranten gibt es eine Überlappung in x- und y-Richtung von zwei Pixel-Zellen, die in Abbildung 2.8 nicht dargestellt ist. Sowohl die Größe der Pseudo-Pads im Bereich der Überlappung der MU3-Superlage als auch der Pseudo-Pads nahe dem Ausschnitt für das Protonstrahlrohr weichen von der Normgöße von 6×4 Pixelzellen ab.

Die etwa 32000 Auslesekanäle des gesamten Myon-Detektorsystems werden von speziell entwickelter Ausleseelektronik verstärkt und digitalisiert, die sich für die drei unterschiedlichen Detektorsysteme angepaßt ist [Buc 99]. Sie basiert aber für alle Systeme auf der gleichen zentralen Komponente, dem ASD-08-Baustein [New 93]. Er dient zur Verstärkung, Pulsformung und Digitalisierung der Kammer-Signale. Die Schwelle des enthaltenen Diskriminators kann für jeden Auslesekanal einzeln eingestellt werden, wobei ein Kompromis aus möglichst hoher Effizienz und niedrigem Rauschen erreicht werden soll.

2.3 Das Triggersystem

Da die anfallende Datenmenge des HERA − B Detektors von 650 GByte/s für eine spätere Analyse nicht permanent gespeichert werden kann, muß eine Vorselektion physikalisch interessanter Ereignisse während der Datennahme erfolgen. Bei der angenommenen maximalen Rate von 20 Hz für das permanente Speichern der Daten und einer Datenmenge von 100 kByte pro Ereignis, ergibt sich ein jährliches Speichervolumen von 20 TByte [HER 00a]. Dabei wird eine Meßzeit von 10^7 s pro Jahr zugrunde gelegt. Die zu erwartenden Rate von Zerfällen des Typs $B \to J/\psi X$ liegt bei etwa 0,5 Hz [Loh 94]. Mit einem Triggersystem, das eine Effizienz von 100 % besitzt, ist es also theoretisch möglich, alle diese Ereignisse aufzuzeichnen.

Das Triggersystem des HERA − B Experimentes ist auf eine möglichst effiziente Auswahl von goldenen Zerfällen nach Gleichung (1.5) optimiert, wobei gleichzeitig ausreichend Flexibilität erhalten bleiben muß, um andere physikalisch interessante Zerfälle zu selektieren. Da die Daten eines Ereignisses mit im Mittel 200 geladenen Spuren zu komplex sind, um innerhalb von 96 ns über die Selektion entscheiden zu können, wird ein mehrstufiges Triggersystem verwendet. Darin nimmt mit zunehmender Triggerstufe die Latenzzeit zu, d.h. die Zeit, die für eine Entscheidung zur Verfügung steht, was die Verwendung einer größeren Menge von Detektorinformationen und Algorithmen mit höherem Rechenaufwand erlaubt. Tabelle 2.1 faßt einige wichtige Eigenschaften der vier Triggerstufen des HERA − B Experimentes zusammen. Besonders strenge Anforderungen bezüglich der Latenzzeit und der Ratenreduktion gibt es für die erste Triggerstufe (First Level Trigger, FLT) inklusive der Pretrigger-Systeme. Deshalb wird hier speziell entwickelte Elektronik verwendet, während die Algorithmen der höheren Triggerstufen in Software implementiert sind und auf Farmen von PCs (Personal Computer) ausgeführt werden.

Die erste Triggerstufe soll Kandidaten für den Zerfall $J/\psi \to \ell^+\ell^-$ selektieren. Hierfür wird zunächst nach den Spuren der Leptonen gesucht, wobei die Startpunkte von parallel arbeitenden Pretrigger-Systemen für Elektronen und Myonen definiert werden. Die Spursuche erfolgt entgegen der Teilchenflugrichtung von den Detektorkomponenten, die am weitesten vom Target entfernt sind, zum Target hin, wobei sie im FLT nur bis hinter den Magneten reicht. Aus den Spurinformationen wird der Impuls und die Ladung eines Leptons bestimmt und Schnitte auf den Transversalimpuls und die invariante

Tab. 2.1: Eigenschaften der Stufen des Triggersystems. Die Pretriggersysteme werden als nullte Triggerstufe bezeichnet.

Stufe	Eingangsrate	Latenzzeit	Unterdrückung	Implementierung
0 & 1	10,4 MHz	10,7 μs	200	spezialisierte Elektronik
2	50 kHz	4 ms	100	PC-Farm
3	500 Hz	100 ms	10	PC-Farm
4	50 Hz	2–4 s	2,5	PC-Farm

Masse von Spurpaaren ausgeführt. In der ersten Triggerstufe kann ebenfalls nach Ereignissen gesucht werden, die Teilchen mit hohen Transversalimpulsen enthalten. Die zweite Triggerstufe (Second Level Trigger, SLT) verwendet zusätzliche und genauere Informationen der Spurdetektoren, um die vom FLT gefundene Spur zu verfeinern und durch den Magneten zum Target zu verfolgen. Wenn die Ereignisrate vom SLT nicht ausreichend reduziert werden kann, erfolgt dies in der dritten Triggerstufe (Third Level Trigger, TLT), die erstmals die komplette Detektorinformation zur Verfügung hat. In der vierten Triggerstufe (4th Level Trigger, 4LT) werden die Ereignisse vollständig rekonstruiert. Zudem können die Ereignisse klassifiziert und weiter selektiert werden.

Die Pretrigger-Systeme

Die Algorithmen von FLT und SLT basieren auf Regionen in bestimmten Detektorlagen, in denen nach Treffern gesucht wird. Diese Suchregionen werden als Regions of Interest (RoI) bezeichnet. RoIs werden von drei unabhängig voneinander arbeitenden Pretrigger-Systemen definiert, von einem High-p_T-, einem Elektron- und einem Myon-Pretrigger.

Der High-p_T-Pretrigger dient der Suche nach Teilchen mit hohem Transversalimpuls. Insbesondere für die Messung der B_s^0-Mischung wird er benötigt. Der Algorithmus basiert auf Dreifach-Koinzidenzen zwischen getroffenen Pads einer Reihe in den drei hintereinanderliegenden Detektorlagen PT1 bis PT3 innerhalb des Magneten. Vorgesehen ist ein 1–3–2-Schema, das heißt jedem Pad in PT1 sind drei Pads in PT2 und diesen wiederum zwei Pads in PT3 zugeordnet. In jeder Lage wird mindestens ein getroffenes Pad in der geometrischen Anordnung verlangt. Das Koinzidenzschema ist in den Hardware-Komponenten flexibel gehalten, so daß etwa ein 1–5–2-Schema ebenfalls implementierbar ist [HER 00a].

Um RoIs für Elektron- und Positron-Kandidaten zu bestimmen, benutzt der Elektron-Pretrigger die Informationen des ECAL. Die Triggerlogik sucht dabei nach der Signatur eines elektromagnetischen Schauers, indem die Energiedepositionen in Zellen des ECAL verglichen werden: In einer Zelle muß mindestens so viel Energie deponiert sein wie in den acht direkt benachbarten Zellen zusammen. Außerdem muß die Gesamtenergie der neun Zellen eine einstellbare und vom Abstand des Schauers vom Protonstrahlrohr abhängige Energieschwelle überschreiten. Eine Korrektur der Schauerenergie auf den Energieverlust durch vor dem Magneten abgestrahlte Bremsstrahlungsphotonen kann

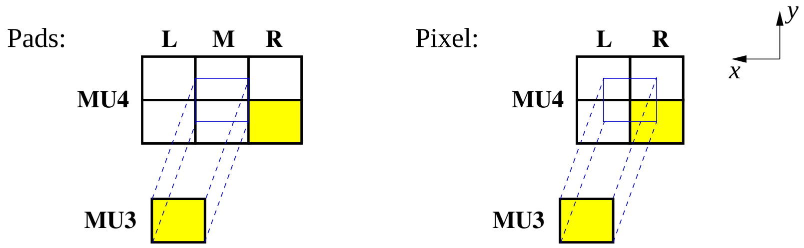

Abb. 2.9: Koinzidenzschemata für den Pad- und den Pixel-Myon-Pretrigger. Im Pad-System wird zu einem getroffenen Pad in MU3 mindestens ein Treffer in 3×2 Pads in MU4 verlangt, z. B. in dem dunkel gekennzeichneten Pad. Im Pixel-System wird ein 2×2-Koinzidenzschema angewendet. Für die Beschreibung des Musters der Treffer in MU4 werden die Spalten mit den Bezeichnungen „L“, „M“ und „R“ versehen, wobei „L“ immer dem niedrigstwertigen Bit entspricht.

auf Pretrigger-Ebene durchgeführt werden. Neben Elektron- und Positron-Kandidaten können auch Photonen mit hoher transversaler Energie selektiert werden.

Kandidaten für Myon-Spuren werden mit Hilfe des Myon-Pretrigger-Systems ausgewählt. Dazu wird – analog zum High-p_T-Pretrigger – ein Koinzidenzschema für Treffer in verschiedenen Lagen des Detektors verwendet. In diesem Fall werden die Pad- und Pixel-Informationen der Superlagen MU3 und MU4 ausgewertet. In Abbildung 2.9 sind die Koinzidenzschemata für das Pad- und das Pixel-System dargestellt. Im Pad-System wird zu einem getroffenen Pad in MU3 mindestens ein Treffer in den 3×2 perspektivisch zugeordneten Pads in MU4 gesucht. Aufgrund der größeren Impulse im inneren Bereich nahe dem Protonstrahlrohr und der kleineren Ausdehnung des Pixel-Systems in x-Richtung, wird hier ein 2×2-Koinzidenzschema verwendet. Im Gegensatz zum High-p_T-Pretrigger werden Koinzidenzen nicht nur in einer (x-Richtung), sondern in zwei Richtungen betrachtet, in der x-y-Ebene. Aus der Position einer gefundenen Koinzidenz und dem Muster der Treffer in MU4 werden die Spurparameter und eine Impulsabschätzung für den Myon-Kandiadten an den FLT mittels sogenannter Nachrichten (engl.: Messages) [Ger 98] übermittelt. Das Muster der Treffer in MU4 enthält dabei im Pad-System nur die Information, welche Spalten getroffen werden, nicht darüber, welches der beiden Pads in y-Richtung. Dazu werden die Spalten wie dargestellt geordnet, wobei „L“ immer dem niedrigstwertigen Bit des Koinzidenzmusters entspricht (engl.: least significant bit), „R“ dem höchstwertigen.

Die erste Triggerstufe

Ausgehend von den Spurkandidaten, die die drei Pretrigger-Systemen definieren, führt der FLT eine Spursuche in Richtung des Targets durch. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Latenzzeit werden nur Trefferinformationen von vier Superlagen des Spurkammersystems und – für Myon-Spurkandidaten – drei Superlagen des Myon-Detektorsystems verwendet. Da eine Auswertung von Driftzeitinformationen zu zeitaufwendig ist, basiert die Spursuche auf der Findung von Koinzidenzen zwischen den

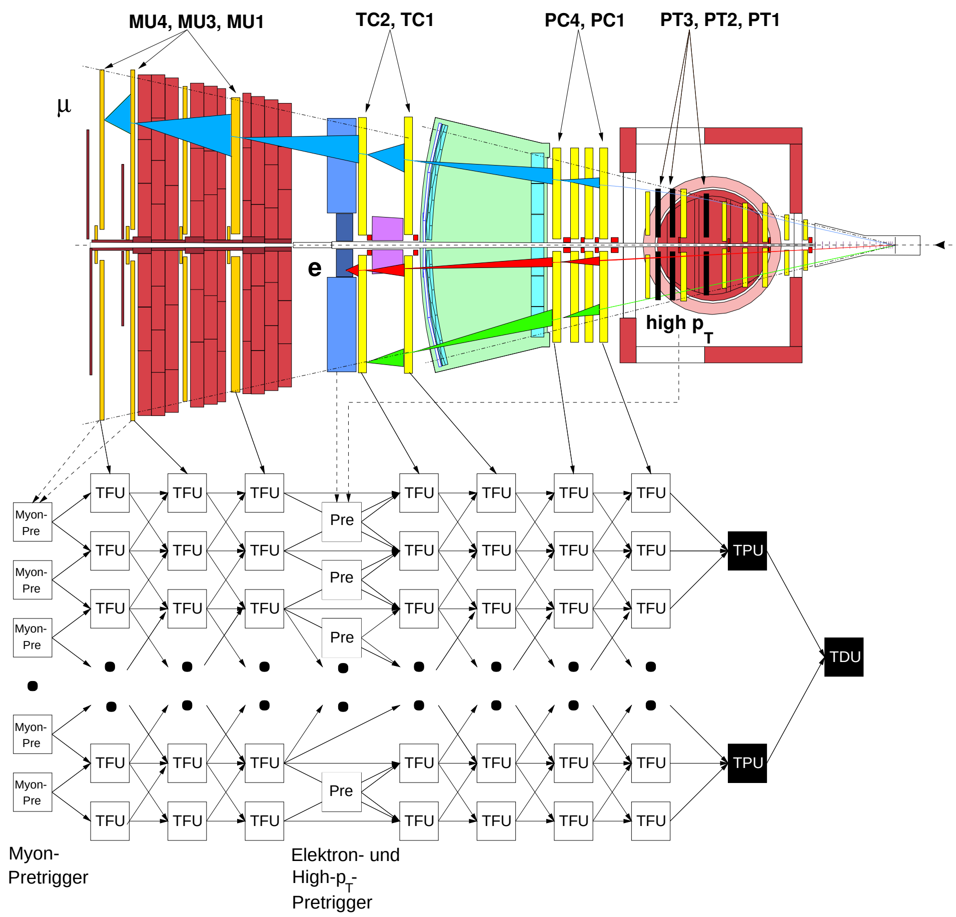

Abb. 2.10: Darstellung des Pretrigger- und FLT-Netzwerkes [Sch 00]. Der Suchalgorithmus zur Bestimmung von RoIs ist für Myon- (μ), Elektron- (e) und High-p_T-Spurkandidaten schematisch angedeutet. Der Datentransfer von den verwendeten Detektorlagen zu den Spurfindungs-Prozessoren TFU (Track Finding Unit) erfolgt synchron zum BX-Takt, der Datentransfer zwischen den TFUs und zu den Track Parameter Units (TPU) und zur Trigger Decision Unit (TDU) asynchron.

Treffern in einzelnen Detektorlagen innerhalb einer Superlage.

Abbildung 2.10 zeigt einen Überblick über das Pretrigger- und FLT-Netzwerk. Für die Spursuche des FLT werden die Detektorlagen MU4, MU3 und MU1 im Falle von Myon-Spurkandidaten und TC2, TC1, PC4 und PC1 für alle Spurkandidaten verwendet. Die Superlagen des Spurkammersystems werden dabei in der Folge immer mit den Bezeichnungen der Outer Tracker-Superlagen benannt. Die Bezeichnungen der zugehörigen Superlagen des Inner Tracker lauten MS15 (zu TC2), MS14 (zu TC1), MS13 (zu PC4) und MS10 (zu PC1).

Die iterative Spursuche erfolgt mit einem Netzwerk spezialisierter Prozessoren, sogenannter Track Finding Units (TFU). Jeder TFU steht die Information eines festgelegten Bereichs der jeweiligen Detektor-Superlage zur Verfügung. Diese Daten werden mittels

Trigger Link Boards (TLB) [Bru 98] synchron zum Takt des Bunch Crossings (BX) zu den TFUs übertragen. Die Detektorinformationen des zugeordneten Bereiches für die letzten 128 BX werden dort zur lokalen Prozessierung gespeichert, um den Datentransfer zu reduzieren. Jede TFU erhält von einer TFU der vorhergehenden Ebene oder einem Pretrigger-System die Informationen über eine RoI, die sich auf den der TFU zugeordneten Detektorbereich bezieht. In dem definierten Suchbereich werden die Detektorinformationen auf Koinzidenzen zwischen Treffern der drei Stereolagen untersucht. Im Fall der Superlagen MU4 und MU3 stehen nur Einzeltreffer zur Verfügung. Wenn eine oder mehrere Koinzidenzen innerhalb der RoI gefunden werden, wird eine verfeinerte RoI für die folgende Ebene berechnet und an eine oder mehrere TFUs dieser Ebene weitergegeben. Der Informationsfluß zwischen den TFU-Ebenen erfolgt ereignisgetrieben und damit asynchron zum BX-Takt. Insgesamt besteht das Netzwerk aus 73 TFUs, davon 17 für das Myon-System und 56 für das Spurkammersystem [Ger 00b].

Kann ein Spurkandidat bis einschließlich der TFU-Ebene zu PC1 erfolgreich verfolgt werden, wird zur Berechnung der Spurparameter eine Nachricht an eine von vier Track Parameter Units (TPU) [Fla 00] geschickt. Unter der Annahme, daß der Ursprung der Spur auf dem Target liegt, wird dort der Ablenkwinkel im Magnetfeld berechnet. Da auf dieser Stufe unbekannt ist, auf welchem Targetdraht die primäre Wechselwirkung stattgefunden hat, wird eine mittlere Targetposition angenommen. Obwohl zudem die Flugstrecke des B-Mesons bis zum Sekundärvertex vernachlässigt wird, können die Ladung und eine Abschätzung für den Impuls, die eine Abweichung von weniger als 5 % aufweist, bestimmt werden [Ful 98]. Zusätzlich gibt es auf der TPU die Möglichkeit, mehrfache Nachrichten, die zum selben Spurkandidaten gehören, auszusortieren.

Die Entscheidung über das Akzeptieren oder Verwerfen eines Ereignisses auf FLT-Niveau trifft die Trigger Decision Unit (TDU). Da die Durchgangszeit durch das ereignisgetriebene FLT-Netzwerk nicht von vornherein festgelegt ist, werden am Eingang der TDU zunächst die Spurkandidaten gesammelt, die zum selben Ereignis gehören. Als Basis für eine Triggerentscheidung wird die Zahl von Spuren, die über einer einstellbaren p_T-Schwelle liegen, nach Teilchenarten, d. h. Elektronen, Myonen, Hadronen und Photonen getrennt gezählt. Die Spuren werden zu Paaren gleicher Teilchenart und ungleichnamiger Ladung kombiniert, und ihre invariante Masse wird bestimmt. Auf Grundlage dieser Informationen kann abhängig vom Betriebsmodus der TDU eine Entscheidung gefällt werden, entweder im Paartrigger- oder im Zähltriggermodus: Im Paartrigger-Modus basiert sie auf den Eigenschaften der gefundenen Spurpaare, im Zähltrigger-Modus auf den Zahlen gefundener Spuren der verschiedenen Teilchensorten. Die individuellen Schwellen der Parameter können variiert werden. Zudem ist es möglich, für jede Triggerklasse individuelle Skalierungsfaktoren einzustellen, um die Ausgangsrate des FLT einstellen zu können.

Höhere Triggerstufen

Die relativ grobe Spurfindung in der ersten Triggerstufe wird vom SLT unter Benutzung zusätzlicher Detektorinformationen verfeinert und überprüft: Die Superlagen PC2 und PC3 werden hinzugenommen, sowie die Driftzeitinformationen des Spurkammersystems.

Als Startpunkt dieser Prozedur werden zur Verringerung des Rechenaufwandes die vom FLT gefundenen Spuren verwendet. Verifizierte Spuren werden anschließend durch das Magnetfeld in Richtung des Targets propagiert. Schließlich wird die Spur durch Verwendung von Informationen des VDS weiter in Richtung des Targets verfolgt. Gegebenenfalls kann verlangt werden, daß zwei Spuren einen gemeinsamen Vertex besitzen. Der SLT ist modular aus den Einzel-Algorithmen aufgebaut, wobei die einzelnen Programmpakete zu einem gemeinsamen Prozeß verbunden sind.

Dieser enthält auch die Programmpakete der dritten Triggerstufe: Ein einziger Prozeß, der Second Level Process, beinhaltet SLT, TLT und das Zusammensetzen der gesamten Detektorinformation für ein Ereignis, das Event Building. Wenn Algorithmen des SLT ausgeführt werden, wird der Prozeß dem SLT zugeordnet, wenn anschließend Berechnungen des TLT notwendig sind, da die Algorithmen des SLT nicht für die notwendige Reduktion der Ereignisrate ausreichen, wird der Prozeß zum TLT gezählt. Unter anderem für semileptonische Zerfälle, bei denen RoI-basierte Algorithmen nicht effizient genug sind, ist die Verwendung des TLT notwendig. Da hier erstmals die gesamte Detektorinformation zur Verfügung steht, kann seine Triggerentscheidung aufgrund der Topologie des Ereignisses gefällt werden [Sch 00]. Eine gemeinsame Farm aus 240 PCs dient zur Ausführung sowohl der SLT- wie auch der TLT-Algorithmen, wobei ein Prozeß immer genau einem Prozessor zugeordnet ist. Es wird erwartet, daß der TLT für die meisten Ereignisse nicht benötigt wird und deshalb zu einem festen Zeitpunkt weniger Prozessoren belegt als der SLT.

Die vierte Triggerstufe dient in erster Linie der Rekonstruktion der akzeptierten Ereignisse. Die dadurch neu gewonnenen Informationen können zu einer Klassifizierung der Ereignisse und einer weiteren Selektion verwendet werden. Zudem können Rückschlüsse auf die Kalibrierung der Detektorkomponenten gewonnen werden, die wiederum Auswirkungen auf die Rekonstruktion der Ereignisse haben. Die Prozesse des 4LT laufen auf einer eigenen PC-Farm mit 200 Prozessoren.

2.4 Das Datennahmesystem

Die Aufgabe des Datennahmesystems (Data Acquisition, DAQ) ist es, die etwa 540000 Detektorkanäle auszulesen und Untermengen der Daten für die einzelnen Triggerstufen zur Verfügung zu stellen. Im Falle einer positiven Triggerentscheidung einer Stufe müssen die Informationen über diese Entscheidung und die Daten des betreffenden Ereignisses an die folgende Stufe übermittelt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen ist die DAQ für das HERA – B Experiment modular aufgebaut. Die Architektur der DAQ ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Die Daten der Subdetektoren werden mittels spezifischer Ausleselektronik, der Front End-Elektronik, ausgelesen. Als Front End bezeichnet man das vordere Ende des Datennahmesystems, das sich am nächsten zum Detektor befindet. Im Falle des Myon-Detektors handelt es sich um die in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Ausleselektronik, die auf dem ASD-08-Baustein basiert.

Die ebenfalls detektorspezifischen Zwischenspeicher während der Entscheidung des

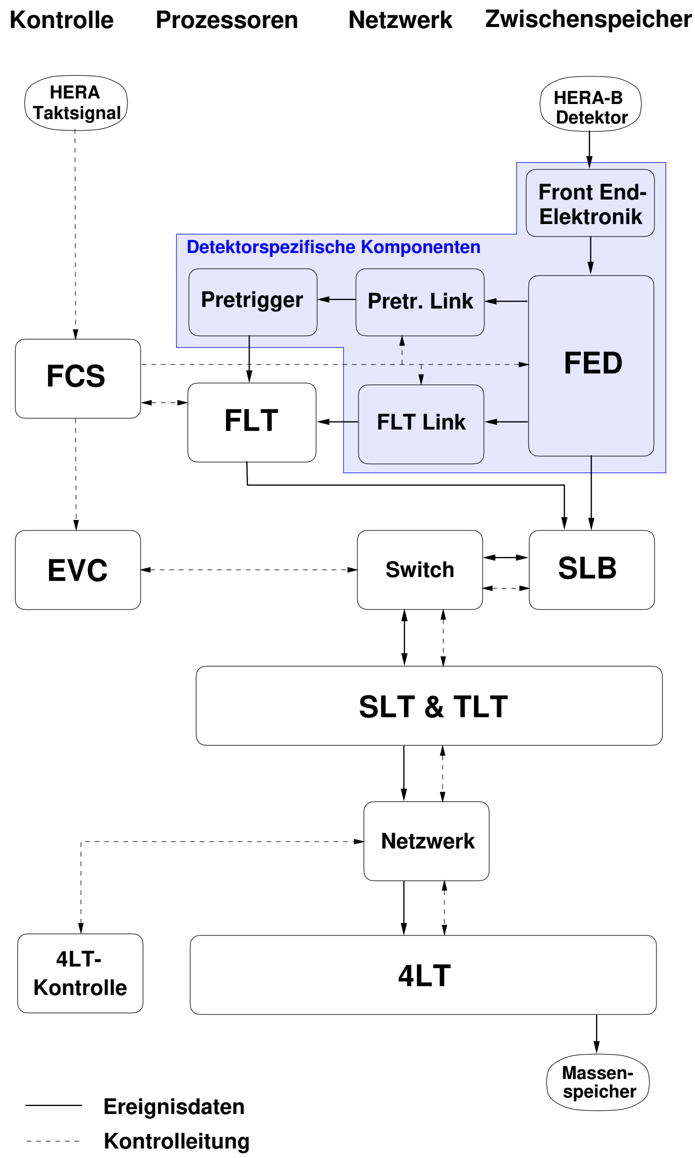

Abb. 2.11: Architektur des Datennahmesystems (nach [Ful 99a]). Der Datenfluß für Ereignis- und Kontrolldaten zwischen den Komponenten ist dargestellt. Die Funktion der Komponenten des Datennahmesystems läßt sich in Zwischenspeicher, Prozessoren, sie verbindende Netzwerke und Kontrolleinheiten unterteilen. Die Komponenten werden im Text näher erläutert.

FLT, die Front End Driver (FED), erfüllen mehrere Funktionen: Gegebenenfalls werden Driftzeit- und Analogsignale digitalisiert und für 128 BX-Takte gespeichert. Außerdem werden Kopien der benötigten Daten für die Pretrigger-Systeme und den FLT bereitgestellt, die über entsprechende Pretrigger- bzw. FLT-Links übertragen werden.

Die Synchronisierung innerhalb und zwischen verschiedenen Subdetektorsystemen wird vom Schnellen Kontrollsystem (Fast Control System, FCS) vorgenommen [Ful 99a]. Wegen der Unterschiede der Flugdauer der Teilchen im Detektor, der Latenzzeit der

Front End-Elektronik und von Kabellängen ist das FCS modular aufgebaut. So können die individuellen Verzögerungszeiten am besten angepaßt werden. Da es Zeitreferenz-Signale von HERA erhält, gibt es eine zentrale Komponente, das FCS-Muttermodul. Es führt zwei 8 Bits umfassende Zähler, die zur späteren Identifizierung der Ereignisse dienen und alle 96 ns inkrementiert werden: Die physikalische BX-Nummer wird alle 220 BX-Takte zurückgesetzt und kann somit den Protonpaketen im HERA-Speicherring eindeutig zugeordnet werden, während die FLT-BX-Nummer von 0 bis 255 läuft. Letztere wird über FCS-Tochtermodule zusammen mit dem BX-Takt an die FEDs und die Pretrigger- und FLT-Links verteilt. In der Folge wird diese FLT-BX-Nummer vereinfachend als BX-Nummer bezeichnet. Weiterhin kontrolliert das FCS anhand der aktuellen und der BX-Nummer des vom FLT akzeptierten Ereignisses, ob die Detektordaten rechtzeitig aus den FEDs ausgelesen werden können, bevor sie überschrieben werden. Die Latenzzeit des FLT inklusive der Pretrigger-Systeme ergibt sich folglich aus der Speichertiefe der FEDs und der Latenzzeit des FCS zu $(128 \cdot 96\,\mathrm{ns}) - 1{,}6\,\mu\mathrm{s} = 10{,}7\,\mu\mathrm{s}$ [Ger 00a]. Für akzeptierte FLT-Ereignisse wird eine 48 Bits umfassende Identifikationsnummer, mit der die Ereignisse innerhalb eines Jahres eindeutig bezeichnet werden können, an die Kontrolleinheit der zweiten und dritten Triggerstufe, die Event Control (EVC), weitergegeben. Zugleich werden die Daten des Ereignisses, mit derselben Identifikationsnummer versehen, aus den FEDs ausgelesen.

Von dort werden sie zu einem Speicherbereich des Second Level Buffer (SLB) transferiert. Die Verwaltung der Speicherbereiche und der Transfer über das Switch-Netzwerk zu einem freien Prozessor des SLT wird von der EVC durchgeführt. Sowohl EVC, SLB als auch das Switch-Netzwerk sind aus digitalen Signalprozessoren aufgebaut. Wenn ein Ereignis vom SLT verworfen wird, wird der entsprechende Speicherbereich des SLB freigegeben, ansonsten werden die Daten zu einem gesamten Ereignis zusammengesetzt und im lokalen Speicherbereich des Second Level Process gehalten. Derselbe Prozeß führt die Algorithmen des TLT durch, um unnötigen Datentransfer zu vermeiden.

Die Daten akzeptierter TLT-Ereignisse werden über ein schnelles Netzwerk zur 4LT-Farm übertragen. Ein PC übernimmt dabei die Funktion der 4LT-Kontrolle, die den Daten einen freien Prozessor zuweist. Vom 4LT selektierte Ereignisse werden temporär auf Festplatten und dauerhaft auf Magnetbändern gespeichert.

Kapitel 3

Realisierung des Myon-Pretrigger-Systems

Um bei einer Dateneingangsrate von etwa 10 GByte/s die Suche nach Koinzidenzen innerhalb einer Zeit von maximal $1\,\mu$s durchführen zu können, ist das Myon-Pretrigger-System modular aus speziell entwickelten Elektronik-Modulen aufgebaut. Der Koinzidenzalgorithmus gemäß Abbildung 2.9 kann aufgrund seiner einfachen Struktur in programmierbaren Elektronikbausteinen integriert werden. Die Verteilung der Datenströme innerhalb des Myon-Pretriggers stellt spezielle Anforderungen an die Entwicklung der Elektronik-Module, da für die Koinzidenzbildung Detektor- und Kontrollinformationen aus unterschiedlichen Quellen benötigt werden.

In diesem Kapitel werden die drei Hauptbestandteile des Myon-Pretrigger-Systems, das Pretrigger Link Board (PLB), die Pretrigger Coincidence Unit (PCU) und der Pretrigger Message Generator (PMG), beschrieben. Die Schnittstellen des Datenflusses sowohl vom als auch zum Myon-Pretrigger-System werden anschließend charakterisiert. Zur Emulation von Schnittstellen werden verschiedene Testmodule verwendet, mit denen Komponenten des Systems außerhalb des Datenflusses des HERA – B Experimentes betrieben werden können. Abschließend wird ein Überblick über den Datenfluß und die Zuordnung zwischen Detektorbereichen und Myon-Pretrigger-Modulen gegeben.

3.1 Die Einzelkomponenten

Das Myon-Pretrigger-System besteht aus drei verschiedenen Arten von speziell entwickelten Elektronik-Modulen, PLB, PCU und PMG, sowie einer optischen Verbindung zwischen PLB und PCU, dem Pretrigger Optical Link (POL). In Abbildung 3.1 sind diese Komponenten und ihre jeweils benötigte Anzahl für Pad- und Pixel-Pretrigger schematisch dargestellt. Die PLBs des Pad-Pretriggers erhalten ihre Eingangsdaten von Front End Driver-Karten (FED), im Pixel-System von Pixel Mapping Boards (PMB). Die erhaltenen Daten werden umgeformt und mit Informationen vom Fast Control System (FCS) versehen. Nach ihrer Serialisierung werden die Daten über den POL zu den PCUs übertragen, wo die Detektordaten parallelisiert und verteilt werden, so daß die Suche nach Koinzidenzen erfolgen kann. Informationen über gefundene Koinzidenzen

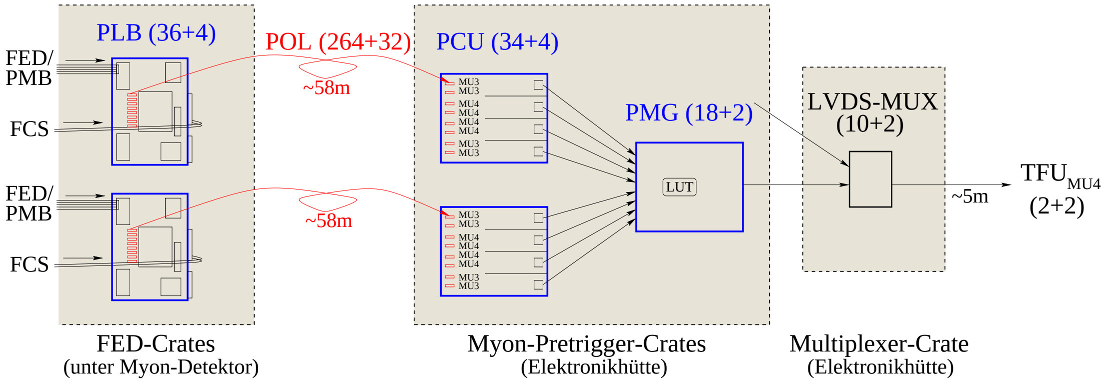

Abb. 3.1: Darstellung der Myon-Pretrigger-Komponenten mit ihrer jeweiligen Anzahl für Pad- und Pixel-System (in Klammern). Die Eingangsdaten für die PLBs stammen von Front End Driver-Karten (FED) für das Pad- und von Pixel Mapping Boards (PMB) für das Pixel-System; die PLBs erhalten Kontrollinformationen vom Fast Control System (FCS). Die Ausgangsdaten der PLBs werden über optische Verbindungen (POL) zu den PCUs übertragen. Je zwei PCUs geben ihre Koinzidenz-Informationen an einen PMG weiter. Von dort werden die Nachrichten für die erste Triggerstufe über LVDS-Multiplexer (LVDS-MUX) an Track Finding Units (TFU) gesendet.

werden an PMGs weitergegeben, die die Daten in das Format der Nachrichten für den First Level Trigger (FLT) übersetzen. Die Nachrichten werden über LVDS[1]-Multiplexer (LVDS-MUX) an diejenigen Track Finding Units (TFU) des FLT, die der Superlage MU4 zugeordnet sind, gesendet.

Die PLBs mit den POL-Sendern sind in denselben Crates (Einbaurahmen für Elektronik-Karten) unterhalb des Myon-Detektors installiert wie auch die FED-Karten. Alle anderen Komponenten des Myon-Pretriggers und der ersten Triggerstufe sind in Crates in der Elektronikhütte installiert und damit im Gegensatz zu den PLBs jederzeit zugänglich.

3.1.1 Pretrigger Link Board

Mit einer Rate von 10,4 MHz stehen an den Eingängen eines Pretrigger Link Boards (PLB) [Cru 98] die digitalisierten Detektorinformationen von maximal acht Spalten des Myon-Detektors an. Im Falle des Pad-Systems handelt es sich, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, für jede Spalte um die Informationen von 30 (MU3) bzw. 29 (MU4) Pads, ob sie einen Teilchendurchgang registriert haben (logische **1**) oder nicht (logische **0**). Für den Pixel-Pretrigger werden die entsprechenden Informationen von 16 (MU3) bzw. 18 (MU4) Pseudo-Pads pro Spalte gemäß Abbildung 2.8 auf dem PLB verarbeitet. Im Gegensatz zum Pad-System sind die Spalten hier durchgehend in y-Richtung, d. h. nicht bei $y = 0$ geteilt.

Abbildung 3.2 gibt einen Überblick über den Aufbau des PLBs. Die Schnittstellen zu

[1] Low Voltage Differential Signaling

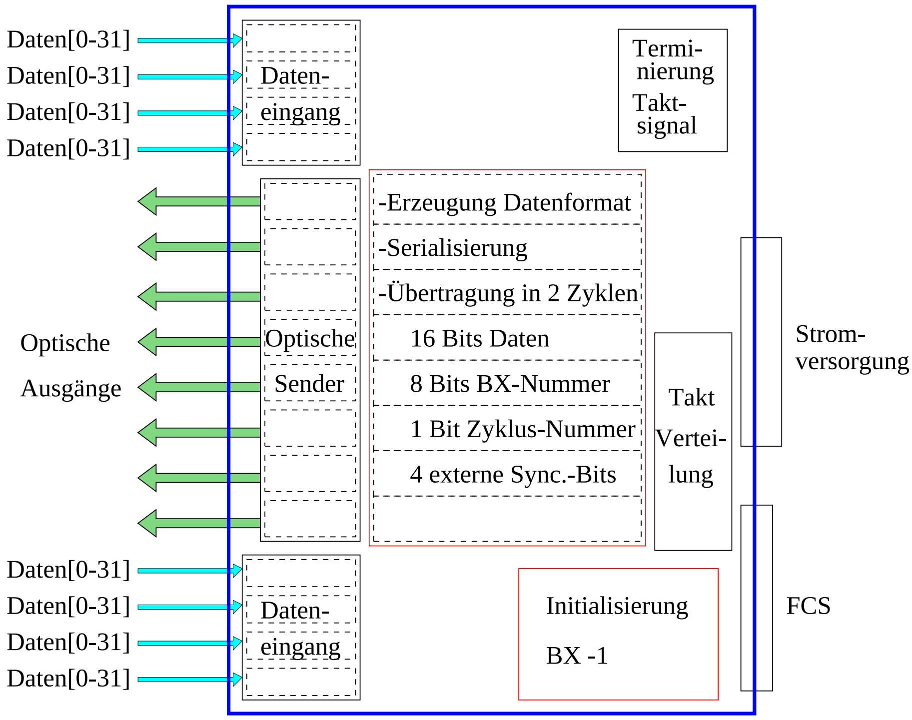

Abb. 3.2: Schematische Darstellung des PLBs, orientiert an der Plazierung der funktionalen Blöcke auf der Leiterplatte. Die anliegenden Daten werden mit Kontrollinformationen vom FCS versehen, in zwei Zyklen umgeformt, serialisiert und über POL-Sender optisch zu PCUs übertragen.

FED, PMB und FCS werden in Abschnitt 3.2 genauer beschrieben. Ein PLB läßt sich in acht Kanäle gliedern, die jeweils die Daten einer Spalte verarbeiten. Die Daten werden von den FED-Karten bzw. PMBs, die in demselben Crate wie das PLB installiert sind, über Flachbandkabel übertragen. Allgemeine Aufgaben für das gesamte PLB sind die Terminierung des internen Taktsignals von 100 MHz, die Initialisierung des PLBs und die Schnittstelle zum FCS, inklusive des Heruntersetzens der BX-Nummer des FCS um eins. Dadurch wird auf dem PLB die Latenzzeit der FED-Karten korrigiert.

Das BX-Taktsignal des FCS dient der synchronen Übernahme der Detektor-Eingangsdaten. Es wird über eine Backplane, d. h. eine Steckerleiste an der Rückseite des Crates, die die angeschlossenen Karten verbindet, zum PLB übertragen. Auf dieselbe Weise wird dem PLB die 8 Bits umfassende BX-Nummer zur Verfügung gestellt. Um die Daten nach der Entscheidung der ersten Triggerstufe den Detektorinformationen eines Ereignisses zuordnen zu können, muß die BX-Nummer den Pad-Trefferinformationen hinzugefügt werden.

In Abbildung 3.3 ist die auf jedem PLB-Kanal vorgenommene Umordnung der FED- und FCS-Daten dargestellt. Die Daten werden auf zwei je 32 Bits umfassende Zyklen aufgeteilt, die mit einer Taktrate von 25 MHz bearbeitet werden. Wegen der Eingangsdatenrate von 10,4 MHz treten Wartetakte auf, die zu einer mittleren Verarbeitungsrate des PLBs von 20,8 MHz führen. Durch die Verarbeitung der Daten mit der doppelten

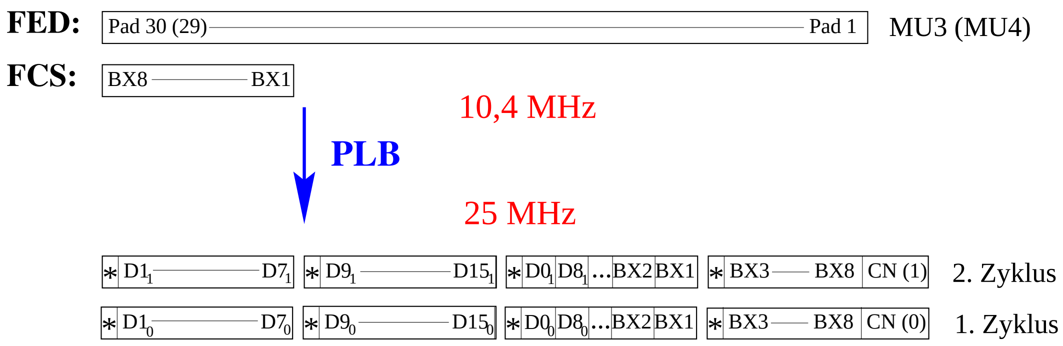

Abb. 3.3: Umordnung der FED- und FCS-Informationen auf einem PLB-Kanal. Die Daten werden in zwei Zyklen, die mit einer Zyklus-Nummer (CN) markiert werden, übertragen. Sie enthalten je 16 Datenbits ($D0_0 - D15_0, D0_1 - D15_1$), die BX-Nummer (BX1 – BX8), vier externe Synchronisations-Bits ($*$) und drei unbenutzte Bits ($\ldots$).

Eingangsrate wird die Zahl der Verbindungen auf den Leiterplatten PLB und PCU sowie die Größe der benötigten Logik-Bausteine reduziert. Zur Markierung des Zyklus wird eine Zyklus-Nummer (CN, für engl.: Cycle Number) erzeugt und den Daten hinzugefügt. Für den Pad-Pretrigger werden die MU3- und MU4-Detektordaten jeweils in zwei Blöcke zu 15 Pads aufgeteilt, wobei der zweite Block der MU4-Daten zunächst nur 14 Pads enthält. Zur Koinzidenzbildung werden jedoch innerhalb einer MU4-Spalte je zwei übereinanderliegende Pads benötigt, umgekehrt wird jedes Pad einer MU4-Spalte zweimal für die Koinzidenzbildung benötigt. Dies gilt auch für das letzte MU4-Pad des ersten Blockes, das deshalb als Kopie dem zweiten Block hinzugefügt wird. Die Blöcke der Daten von 15 Pads werden auf die Daten-Bits der beiden Zyklen, $D0_0 - D15_0$ bzw. $D0_1 - D15_1$ aufgeteilt.

Neben der BX-Nummer (BX1 – BX8) werden zudem vier externe Synchronisationsbits, jeweils zu Beginn jedes zu übertragenden Bytes, eingefügt. Diese besitzen die feste Abfolge '**1110**' und werden auf der PCU zur Überprüfung der optischen Datenübertragung verwendet.

Aufgrund der verschiedenen geometrischen Anordnung der Pseudo-Pads und des anderen Koinzidenzschemas wird für das Pixel-System eine angepaßte Verteilung der Daten gewählt, die es erlaubt, das PLB ohne Modifikationen auch für das Pixel-System verwenden zu können [Sch 99a].

Zur Serialisierung der Daten wird ein spezialisierter Baustein verwendet [Mot 87]. Er wandelt 32 Bits Daten mit einer Rate von 25 MHz in ein differentielles PECL-Signal (Positive Emitter Coupled Logic) mit einer effektiven Datenübertragungsrate von 800 MBit/s um. Die Daten eines PLB-Kanals werden mit Hilfe des POL [Glä 97], bestehend aus einem Sender, einer optischen Faser und einem Empfänger auf der PCU, über eine Entfernung von etwa 58 m übertragen. Der POL-Sender ist als Aufsteckkarte realisiert, die in einer Fassung auf dem PLB angebracht wird. Optische Signale einer Wellenlänge von 850 nm werden von einer VCSEL-Halbleiter-Laserdiode (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser) erzeugt, die das Laserlicht senkrecht zum p-n-Übergang emittiert.

Das PLB ist als 16-lagige Leiterplatte mit einer Größe von 9 Höheneinheiten × 280 mm realisiert, wobei 9 Höheneinheiten 366,8 mm entsprechen. Sie besitzt keinen Prozessor und keine Schnittstelle, über die ihre Funktion gesteuert werden kann. Deshalb muß automatisch nach Stromzufuhr die Initialisierung des PLBs erfolgen, die durch das Zurücksetzen aller Logikkomponenten in den Grundzustand gewährleistet wird. Der zuverlässige und korrekte Betrieb muß auch ohne Zugriffsmöglichkeit von außerhalb sichergestellt sein, da die Karten nicht jederzeit zugänglich im HERA – B Experiment installiert sind.

3.1.2 Pretrigger Coincidence Unit

Die Pretrigger Coincidence Unit (PCU) ist die Recheneinheit des Myon-Pretriggers, die den Koinzidenzalgorithmus auf die Daten anwendet [Kol 98]. Funktional kann sie in zwei Blöcke eingeteilt werden: die Verteilung der von den PLBs empfangenen Daten und die Anwendung des Koinzidenzalgorithmus mit der Übertragung der Daten an einen PMG. Die Verteilung der Daten sowie die Suche nach Koinzidenzen für zwei MU3-Spalten ist auf der Hauptkarte, die 9 Höheneinheiten × 400 mm groß ist und 12 Lagen umfaßt, implementiert. Für zwei weitere MU3-Spalten wird der Koinzidenzalgorithmus auf der Mezzanin-Karte ausgeführt, die 9 Höheneinheiten × 230 mm groß und ebenfalls aus 12 Lagen aufgebaut ist. Je eine Haupt- und eine Mezzanin-Karte, die mechanisch an der Hauptkarte befestigt ist und über Steckerleisten Daten von ihr empfängt, bilden eine PCU. Insgesamt wendet eine PCU den Koinzidenzalgorithmus auf die Daten von vier MU3-Spalten an und umfaßt somit vier sogenannte Koinzidenzkanäle. Die Initialisierung und Kontrolle der PCU erfolgt über eine Schnittstelle zum VME[2]-Bus [Ame 87]. Dabei handelt es sich um einen Standard für den Datenaustausch mit Elektronikkomponenten.

Datenverteilung

In Abbildung 3.4 ist der Aufbau der PCU-Hauptkarte schematisch dargestellt. Die optischen Signale von vier MU3-Spalten und den vier dazugehörigen MU4-Spalten werden von POL-Empfängern, die als Aufsteckkarten auf der PCU angebracht sind, in ein differentielles PECL-Signal umgewandelt. Die Offset-Spannungen der POL-Empfänger werden individiuell über Digital-Analog-Wandler (DAC, für engl: Digital to Analog Converter) eingestellt. Zur Parallelisierung der Daten dient der gleiche Baustein, mit dem die Daten auf dem PLB serialisiert werden [Mot 87]. Für jede optische Übertragung werden die auf den PLBs hinzugefügten externen Synchronisationsbits auf ihre Korrektheit hin überprüft; zudem werden Statussignale des Parallelisierungs-Bausteins abgefragt. Im Falle eines detektierten Fehlers werden der POL-Empfänger angehalten und die Prozessierung der Daten dieser Spalte unterbunden, um die Erzeugung von fehlerhaften Koinzidenzen aufgrund der falschen Datenübertragung zu verhindern. Handelt es sich um eine MU4-Spalte, fehlt sie als eine von drei Spalten des Koinzidenzkanals, handelt es sich um eine MU3-Spalte, können keine Koinzidenzen mehr prozessiert werden. Zudem

[2] VERSA Module Eurocard

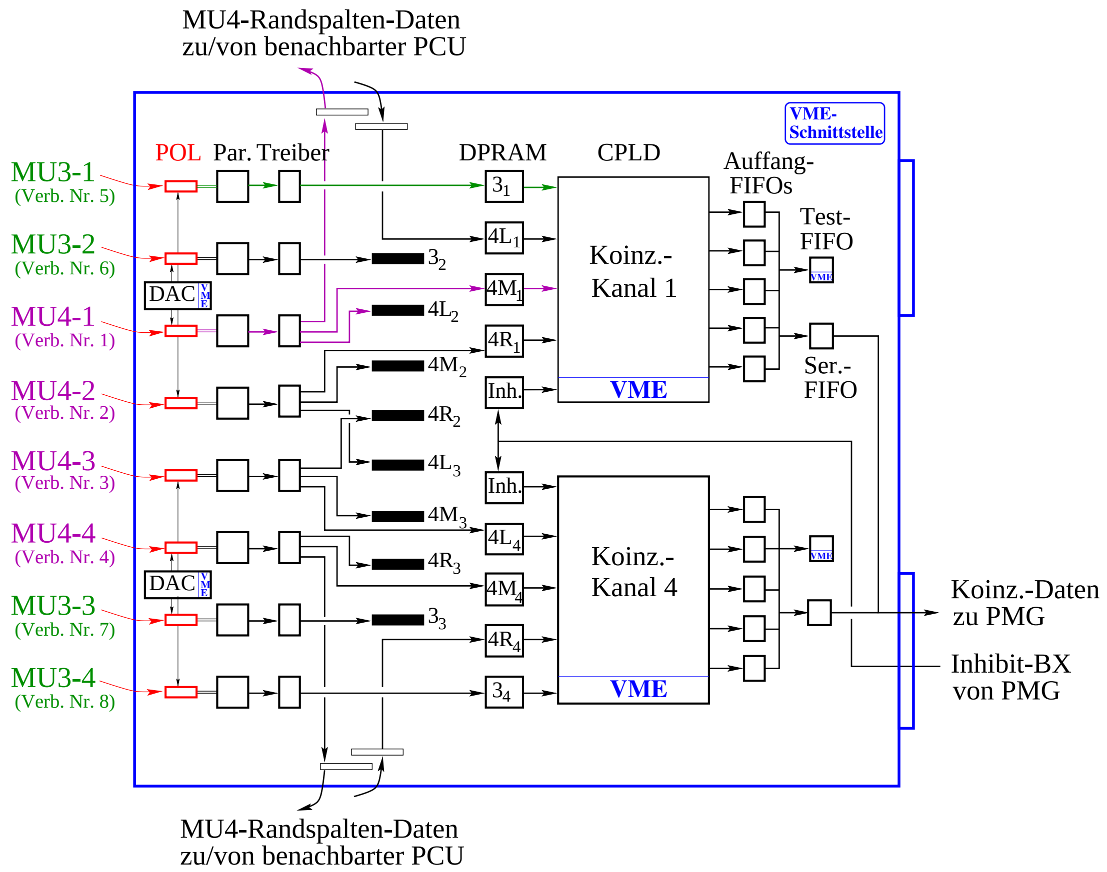

Abb. 3.4: Schematische Darstellung der PCU-Hauptkarte, orientiert an der Plazierung der funktionalen Blöcke auf der Leiterplatte. Die Daten von vier MU3- und vier MU4-Spalten werden vom POL-Empfänger umgewandelt, von Parallelisierungs-Bausteinen (Par.) parallelisiert und auf der Hauptkarte, auf die Mezzanin-Karte (ausgefüllte Rechtecke) und an benachbarte PCUs verteilt. DACs dienen der Einstellung der Offset-Spannung der POL-Empfänger. Die Daten werden zwischengespeichert (DPRAM), bevor in einem Logikbaustein (CPLD) die Koinzidenzsuche ausgeführt wird. Daten für gefundene Koinzidenzen werden über zwei Speicherstufen (FIFO) serialisiert und zum PMG übertragen. Vom PMG werden die Inhibit-BX-Signale empfangen und verarbeitet. Die Steuerung der PCU erfolgt mit Zugriffen auf eine VME-Schnittstelle.

wird ein Signal, das sogenannte LinkOK-Signal erzeugt, das über die VME-Schnittstelle abgefragt werden kann. Mittels eines VME-Zugriffes kann das Verhindern der Prozessierung abgeschaltet werden, so daß die LinkOK-Signale lesbar bleiben, aber nicht mehr intern ausgewertet werden.

Für jeden Koinzidenzkanal des Pad-Systems müssen die Daten von drei MU4-Spalten zur Verfügung stehen. Entsprechend müssen die Daten jeder MU4-Spalte dreimal zur Verfügung stehen. Die notwendige Verteilung dieser Daten innerhalb einer PCU und zu benachbarten PCUs ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die drei MU4-Spalten, deren

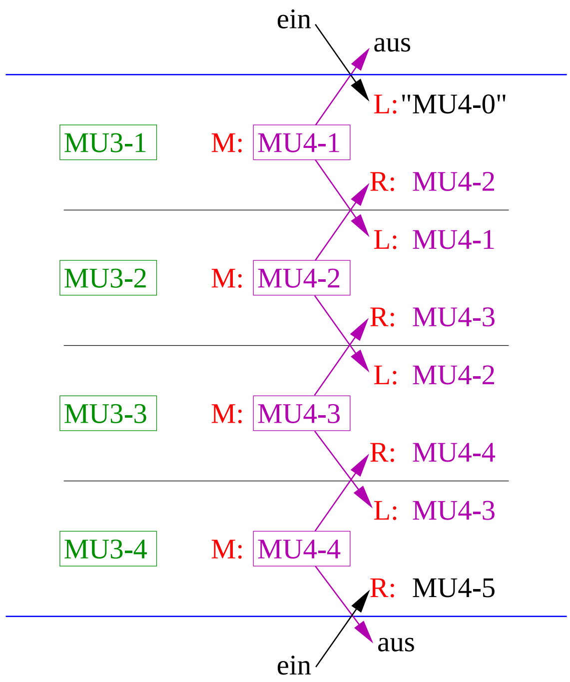

Abb. 3.5: Verteilung der Daten von MU3- und MU4-Spalten zu verschiedenen Koinzidenzkanälen innerhalb einer PCU sowie zu („aus“) und von benachbarten PCUs („ein“). Die Bezeichnung der zu einem Koinzidenzkanal gehörenden MU4-Spalten mit „L“, „M“ und „R“ entspricht der Bezeichnung des Koinzidenzmusters in Abbildung 2.9.

Daten für einen Koinzidenzkanal benötigt werden, sind gemäß Abbildung 2.9 mit „L“, „M“ und „R“ bezeichnet, wobei „L“ bei der Bestimmung des Koinzidenzmusters dem niedrigstwertigen Bit entspricht. Für die vier Koinzidenzkanäle einer PCU sind Daten von insgesamt sechs MU4-Spalten erforderlich, d. h. es ist eine Übertragung der Daten von jeweils einer MU4-Spalte von zwei benachbarten PCUs notwendig. Umgekehrt werden Daten zu zwei benachbarten PCUs übertragen. Da die Signallaufwege zwischen PCUs länger sind als innerhalb einer PCU, erfolgen diese Randspalten-Übertragungen immer nur zwischen Hauptkarten, ohne Beteilung von Mezzanin-Karten. Aus diesem Grund befinden sich die beiden äußeren Koinzidenzkanäle 1 und 4 auf der Hauptkarte und die Koinzidenzkanäle 2 und 3, für die keine Randspalten-Übertragungen notwendig sind, auf der Mezzanin-Karte. Die Mezzanin-Karte ist über Steckverbindungen, die in den Abbildungen 3.4 und 3.6 durch ausgefüllte Rechtecke symbolisiert sind, mit der Hauptkarte verbunden.

In Abbildung 3.6 ist der Aufbau der Mezzanin-Karte dargestellt, der von der DPRAM-Speicherstufe (Dual Ported Random Access Memory) an identisch mit dem der Hauptkarte ist. Ein DPRAM ist ein Speicherbaustein, auf den im Gegensatz zu einem RAM unabhängig von zwei Seiten schreibend bzw. lesend zugegriffen werden kann. Mit dem Taktsignal der jeweiligen optischen Verbindung werden die Daten unabhängig voneinander in ein DPRAM geschrieben. Alle Daten des Koinzidenzkanals werden drei

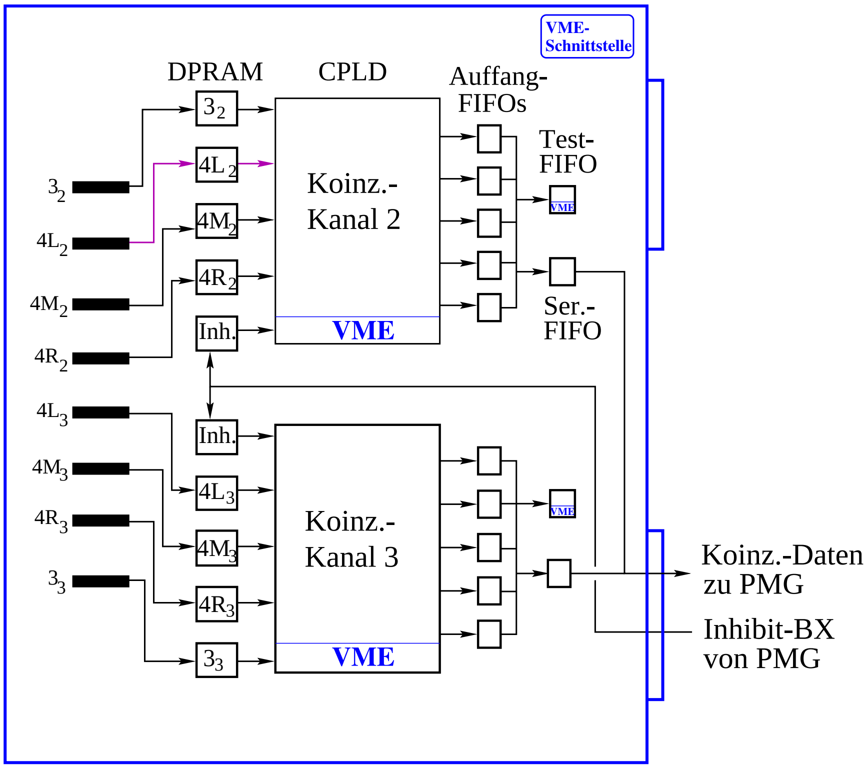

Abb. 3.6: Schematische Darstellung der PCU-Mezzanin-Karte, orientiert an der Plazierung der funktionalen Blöcke auf der Leiterplatte. Die Daten für zwei Koinzidenkanäle werden über Steckerleisten von der Hauptkarte empfangen und zwischengespeichert (DPRAM). Von dieser Stufe an ist der Aufbau identisch mit der Hauptkarte in Abbildung 3.4.

Zyklen, d. h. 144 ns, nach dem Schreiben in das DPRAM für die MU3-Daten parallel ausgelesen und in die Eingangs-Register des Logik-Bausteins übernommen, in dem der Koinzidenzalgorithmus implementiert ist. Der Zeitausgleich für die MU3- und MU4-Daten desselben Koinzidenzkanals ist notwendig, da Zeitunterschiede unter anderem von unterschiedlichen Kabellängen zwischen der Ausleseelektronik des Detektors und den FED-Karten herrühren können, vom unabhängigen Betrieb der einzelnen PLB-Kanäle und von unterschiedlich langen optischen Fasern. Die Verzögerungsstufe ist mit einem Logikbaustein realisiert, so daß durch Umprogrammieren eine Veränderung der Zahl der Zyklen, um die die Auslese verzögert wird, möglich ist. Erfahrungen im Betrieb haben gezeigt, daß drei Zyklen ausreichend sind. Die Adresse, unter der bei der Suche nach Koinzidenzen auf die Daten zugegriffen wird, besteht aus neun Bits, die sich aus der BX-Nummer und der Zyklus-Nummer als niedrigstwertigem Bit zusammensetzen. Dagegen werden für die Schreib- und Lesezugriffe auf die DPRAMs nur die unteren fünf Bits der BX-Nummer und die Zyklus-Nummer verwendet, da sie eine Speichertiefe von 64 Worten besitzen.

Koinzidenzalgorithmus

Der Koinzidenzalgorithmus ist für jeden Koinzidenzkanal in einem komplexen Logikbaustein (CPLD, Complex Programmable Logic Device) [ALT 00] implementiert. Abbildung 3.7 zeigt schematisch die interne Verarbeitung der Daten in Form einer Pipeline, deren Schritte mit einer nominellen Taktrate von 25 MHz bzw. einer durchschnittlichen Taktrate von 20,8 MHz bearbeitet werden. Parallel zu jedem dargestellten Pipeline-Schritt werden die BX- und die Zyklus-Nummer mitgeführt.

- Zunächst werden die Daten der MU3- und MU4-Spalten in Eingangs-Register übernommen.
- Im zweiten Schritt kann jeder Datenkanal individuell ausmaskiert werden, wenn er „heiß“ ist, d. h. wenn er fehlerhaft eine viel zu große Rate von Treffern anzeigt. Dies kann z. B. durch Pads verursacht werden, die unabhängig von Teilchendurchgängen sehr häufig ansprechen. Der Inhalt der Masken-Register, in denen gespeichert wird, welche Datenkanäle ausmaskiert werden, kann beliebig häufig verändert werden, da sie über die VME-Schnittstelle zugänglich sind.
- Der dritte Pipeline-Schritt enthält die eigentliche Koinzidenzbildung. Zunächst werden die MU4-Daten jeder Spalte paarweise verodert, d. h. einem logischen ODER unterzogen. Damit ist für jedes Pad in MU3 die Information über Treffer im zugeordneten Bereich von MU4 in drei anstatt sechs Bits kodiert. Anschließend werden für alle 15 MU3-Pads des Zyklus Koinzidenzen gesucht. Das Ergebnis der Koinzidenzbildung wird durch acht Bits pro Pad beschrieben: ein Bit, das eine erfolgreiche oder erfolglose Koinzidenzsuche anzeigt, vier Bits für die Koinzidenzadresse, d. h. die Position des MU3-Pads innerhalb des Zyklus, und drei Bits für

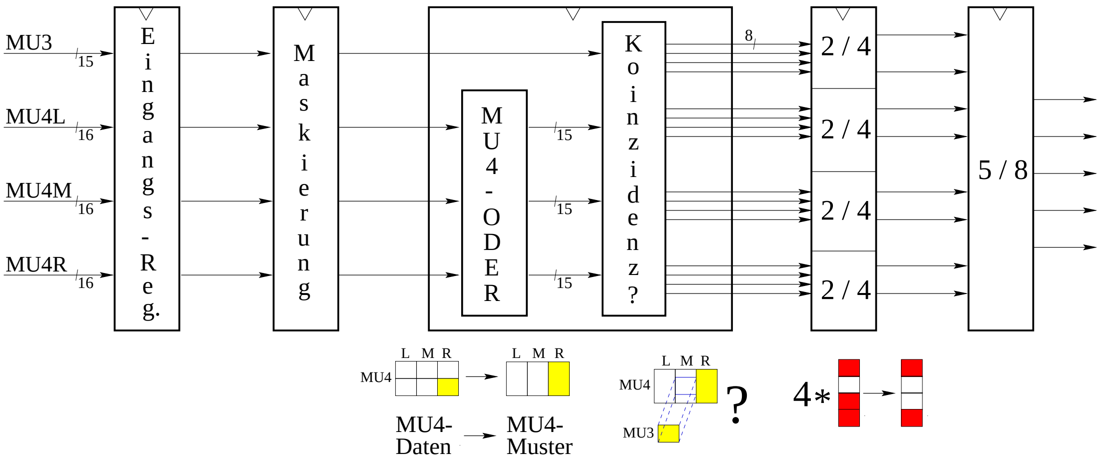

Abb. 3.7: Pipelinestruktur des Koinzidenz-CPLDs der PCU für das Pad-System. Im ersten Schritt werden die Daten in Eingangs-Register übernommen, dann erfolgt die Maskierung. Im dritten Schritt erfolgen die Veroderung der MU4-Daten und die Koinzidenzbildung. Die beiden Selektionen „2/4“ und „5/8“ erfolgen in den letzten beiden Schritten.

das Koinzidenzmuster der MU4-Daten.

- Aufgrund von Beschränkungen durch die Anzahl der Verbindungen des CPLDs und seiner internen Logikresourcen können nicht alle der 15 möglichen Koinzidenzen eines Zyklus weiterverarbeitet werden. In einem ersten Selektionsschritt („2/4“) werden deshalb aus jeder Vierergruppe von in y-Richtung benachbarten Pads zwei Koinzidenzen ausgewählt, wenn drei oder vier auftreten. Die Wahl fällt auf die beiden Koinzidenzen, die am weitesten voneinander entfernt sind. Laut Untersuchungen, die auf Monte Carlo-Simulationen beruhen, ist ein Verlust von etwa 0,3 % der Koinzidenzen bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz zu erwarten [Ada 99], was in aller Regel zu keinem Verlust physikalisch interessanter Spurkandidaten führt, da benachbarte Koinzidenzen mit hoher Wahrscheinlichkeit zur selben FLT-Spur führen.
- In einem zweiten Selektionsschritt („5/8“) werden, falls mehr als fünf Koinzidenzen verbleiben, die fünf ausgewählt, die am nächsten zum Protonstrahlrohr liegen. Laut Simulationsrechnungen ist hier selbst bei einer Wechselwirkungsrate von 40 MHz kein Verlust von Koinzidenzen [Ada 99] zu erwarten.

Bis zur letzten Pipeline-Stufe des Koinzidenz-CPLDs ist die Datenverarbeitung des Myon-Pretriggers zwar nicht synchron zum BX-Takt, aber in einem voraussagbaren zeitlichen Zusammenhang. Anschließend ist jede weitere Prozessierung ereignisgetrieben, d. h. abhängig von der Zahl und Verteilung gefundener Koinzidenzen.

Die Informationen über gefundene Koinzidenzen werden zunächst in Auffang-FIFOs (engl.: First in First out; Speicherbaustein mit unabhänger Schreib- und Ausleseseite, wobei die zeitliche Reihenfolge der Daten erhalten bleibt) geschrieben, wobei die Koinzidenzen nach ihrer Koinzidenzadresse sortiert auf die fünf FIFOs verteilt werden. Die Daten der Koinzidenz, die am nächsten zum Protonstrahlrohr liegt, werden in den ersten FIFO geschrieben, die zur nächsten Koinzidenz in den zweiten, etc. Außerdem findet an dieser Stelle eine sogenannte Nullunterdrückung statt, da für Zyklen, in denen keine Koinzidenzen auftreten, keine Daten in die Auffang-FIFOs geschrieben werden. Zur Serialisierung der Daten werden, gesteuert von Logikbausteinen, genau so viele Auffang-FIFOs ausgelesen, wie Koinzidenzen in einem Zyklus auftreten, und Koinzidenzdaten im Serialisierungs-FIFO zwischengespeichert. Zugleich werden dieselben Daten in einen Test-FIFO kopiert, der eine Speichertiefe von 4096 Worten besitzt und über die VME-Schnittstelle ausgelesen werden kann. Das Format der Koinzidenzdaten ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Je zwei PCUs geben ihre Daten an einen PMG weiter, der die Nachrichten für den FLT erzeugt. Sowohl Daten als auch Schnittstellen-Signale werden über eine spezielle Backplane zwischen den drei beteiligten Karten ausgetauscht. Dazu signalisiert jeder Koinzidenzkanal der beiden PCUs, ob gültige Koinzidenzdaten im Serialisierungs-FIFO enthalten sind. Auf Grundlage dieser Informationen werden die Daten der Koinzidenzkanäle nacheinander vom PMG angefordert und übertragen.

Die beiden verbundenen PCUs erhalten vom PMG Signale, mit denen die Verarbeitung von Ereignissen mit hoher Multiplizität unterdrückt werden kann. Solche Ereignisse sind in der Regel physikalisch nicht interessant und können zu einer Blockierung

Tab. 3.1: Format der Koinzidenzdaten am Ausgang der PCU für Pad- und Pixel-Pretrigger.

Bit	Daten (Pad)	Daten (Pixel)
0	Zyklus-Nummer	Zyklus-Nummer
8 – 1	BX-Nummer	BX-Nummer
11 – 9	Koinzidenzmuster (MU4)	Koinzidenzadresse (MU3)
15 – 12	Koinzidenzadresse (MU3)	Koinzidenzmuster (MU4)

des Triggersystems und damit zu Totzeit führen. Die Inhibit-BX-Signale werden von der ECAL Energy Inhibit Card erzeugt, wenn die Energiesumme im inneren Bereich des elektromagnetischen Kalorimeters (ECAL) eine einstellbare Schwelle überschreitet. Die Signale bestehen aus der BX-Nummer und einem Bit zur Anzeige, ob die Schwelle überschritten wurde oder nicht. Auf der PCU werden diese Information benutzt, um für die so markierten Ereignisse das Herausschreiben etwa gefundener Koinzidenzen in die Auffang-FIFOs zu verhindern.

Um die PCU sowohl für das Pad- als auch das Pixel-System verwenden zu können, müssen einige Anpassungen für das Pixel-System vorgenommen werden. Da für die Koinzidenzbildung im Pixel-System zu jeder MU3-Spalte nur zwei MU4-Spalten zugeordnet sind, ist eine spezielle Zuordnung der Spalten zu PCU-Eingängen erforderlich [Sch 99d]. Damit beschränken sich die notwendigen Änderungen auf eine modifizierte Programmierung des Koinzidenz-CPLDs: Die BX-Nummer wird um eins erniedrigt, um die zusätzliche Latenzzeit des Pixel Mapping Boards (PMB) zu korrigieren. Da nur drei Bits für die Kodierung der Koinzidenzadresse innerhalb eines Zyklus benötigt werden, bleiben für das Koinzidenzmuster vier Bits, so daß es genau kodiert werden kann. Wie in Abbildung 3.8 veranschaulicht, bleibt die Information über die getroffenen MU4-Pseudo-Pads in y-Richtung im Gegensatz zum Pad-System vollständig erhalten.

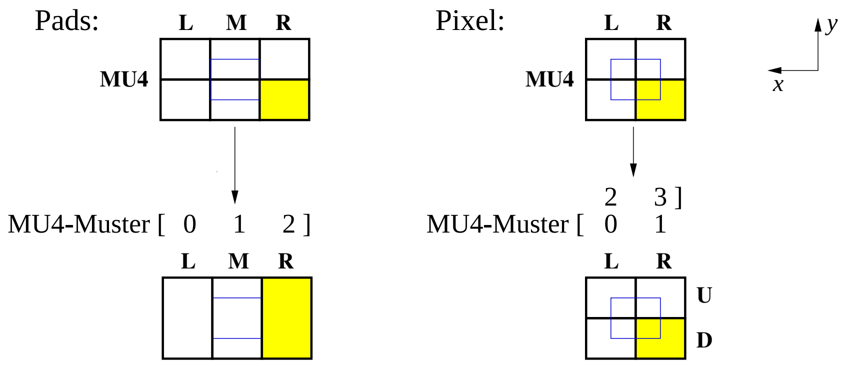

Abb. 3.8: Kodierung der Koinzidenzmuster für Pad- und Pixel-Pretrigger mit drei bzw. vier Bits. Im Pixel-System wird auch die y-Information als oben (U für engl.: up) und unten (D für engl.: down) kodiert.

VME-Schnittstelle

Die Initialisierung, Steuerung und Überwachung der Funktion der PCU werden mit Zugriffen über eine Schnittstelle zum VME-Bus durchgeführt. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Funktionen gegegeben werden, eine detaillierte Beschreibung der VME-Schnittstelle findet sich in [Kol 00], eine Auflistung aller verfügbaren VME-Zugriffe in Anhang A.

Die VME-Zugriffe sind getrennt für jeden einzelnen Koinzidenzkanal. Es gibt drei verschiedene Arten von Zugriffen: Zugriffe auf den DAC, auf den Test-FIFO und auf den Koinzidenz-CPLD. Auf den DAC kann nur schreibend zugegriffen werden, um den Offset-Wert eines der vier angeschlossenen POL-Empfänger einzustellen. Aus dem Test-FIFO können für Tests oder das Monitoring Koinzidenzdaten ausgelesen werden. Eine Auslese der Daten in den DPRAMs ist in beschränktem Umfang möglich, d. h. nur wenn die PCU angehalten wird und die Daten in die CPLD-Eingangsregister kopiert werden, von wo sie ausgelesen werden können.

Zum aktiven Eingriff in die Funktion der PCU stehen im Koinzidenz-CPLD drei Kommando-Register zur Verfügung, das Board-Kommando-Register, das FLEX-Kommando-Register und das Modus-Register. Im Board-Kommando-Register stehen Funktionen zur globalen Steuerung des Koinzidenz-CPLDs und des PCU-Koinzidenzkanals insgesamt zur Verfügung. Diese enthalten unter anderem Funktionen für das Zurücksetzen und Löschen des CPLDs, das Zurücksetzen der Logikbausteine zur Steuerung der Serialisierung und der Schnittstelle zum PMG, das individuelle Zurücksetzen beider FIFO-Stufen und die Erzeugung eines Taktsignals unabhängig vom POL-Empfänger. Letzteres erlaubt einen Testbetrieb der PCU auch ohne Anschluß der POL-Empfänger. Auf der PCU-Hauptkarte können außerdem vier POL-Empfänger individuell zurückgesetzt werden.

Mit Hilfe des FLEX-Kommando-Registers wird die interne Funktion des Koinzidenz-CPLDs gesteuert. Die Auswertung der Inhibit-BX-Signale kann ein- oder ausgeschaltet werden; dies wird als Inhibit-Modus bezeichnet. Zudem kann die Auswertung der Signale, die den Zustand der optischen Datenübertragungen anzeigen, aktiviert oder deaktiviert werden. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, mit Hilfe des sogenannten Reduzier-Modus eine Vorskalierung der Koinzidenzdaten vorzunehmen, so daß je nach Einstellung nur für jede zweite bis 64. BX-Nummer (in Zweierpotenzen von 2^1 bis 2^6) Koinzidenzen prozessiert werden oder nur zu einer bestimmten wählbaren BX-Nummer. Um eine Abschätzung der Koinzidenzraten zu ermöglichen, enthält jeder CPLD zwei 16 Bits tiefe Zähler, einen Koinzidenz- und einen Zykluszähler. Der Koinzidenzzähler zählt die Anzahl von Schreibzugriffen auf die Auffang-FIFO-Stufe und somit die Zahl der Zyklen mit mindestens einer Koinzidenz. Mehrere Koinzidenzen innerhalb eines Zyklus werden nicht registriert. Der Zykluszähler zählt die bearbeiteten Zyklen und dient damit der Normierung. Beide Zähler können mittels des FLEX-Kommando-Registers gestartet, gestoppt und zurückgesetzt werden. Weiterhin können Testmuster erzeugt werden und die Zähler abhängig vom Füllstand des Test-FIFOs gesteuert werden.

Das Modus-Register dient zur Speicherung von Vergleichswerten, z. B. der BX-Nummer für den Reduzier-Modus 7, bei dem nur die Daten zu einer BX-Nummer ausgewertet werden.

Aus dem Flag-Register können die Signale der optischen Verbindungen, die LinkOK-Signale, sowie Informationen über die Füllstände der FIFO-Stufen und über den Zustand des Koinzidenz-CPLDs ausgelesen werden.

Die Masken-Register zur Ausmaskierung von Pads können sowohl beschrieben als auch gelesen werden. Schließlich gibt es noch für jede optische Verbindung ein Register im Koinzidenz-CPLD, in dem die Werte gespeichert werden, die auf den entsprechenden DAC-Kanal geschrieben werden. Da die Werte der DACs nicht lesbar sind, können an ihrer Stelle diese Register ausgelesen werden.

3.1.3 Pretrigger Message Generator

Der Pretrigger Message Generator (PMG) übersetzt die Koinzidenzdaten der PCU in Nachrichten an die erste Triggerstufe, die als Startpunkte für die Myon-Spursuche dienen. Die Nachrichten enthalten Parameter, die die Region of Interest (RoI) definieren, eine Impulsabschätzung und die BX-Nummer [Ger 98].

An dieser Stelle soll ein Überblick über die Funktion des PMGs und seine VME-Schnittstelle gegeben werden, eine detaillierte Beschreibung findet sich in [Rie 00]. Der PMG ist als 4-lagige Leiterplatte mit einer Größe von 9 Höheneinheiten $\times$ 340 mm realisiert. Er kann durch Umprogrammieren einiger CPLDs auch für das High-p_T-Pretrigger-System verwendet werden.

In Abbildung 3.9 ist der Aufbau des PMGs schematisch dargestellt. Die Signale der acht angeschlossenen Koinzidenzkanäle auf zwei PCUs, die angeben, ob Koinzidenzen zur Verfügung stehen, werden in einem CPLD ausgewertet. Dieser sendet Signale über die Backplane-Verbindung, die einen PCU-Kanal freischalten, so daß die Koinzidenzdaten übertragen und in ein Eingangsregister geschrieben werden können. Dabei muß gewährleistet sein, daß zu jedem Zeitpunkt nur ein Koinzidenzkanal freigeschaltet ist, da es ansonsten zu einem Kurzschluß käme. Angepaßt an die Taktrate der Datenverarbeitung auf der PCU und dem PMG beträgt die nominelle Transferrate der Schnittstelle 25 MHz bei gleichmäßiger Belegung der PCU-Kanäle. Da die Koinzidenzdaten gemäß Tabelle 3.1 keine Information über die x-Koordinate der Koinzidenz enthalten, werden drei Bits zur Kodierung des PCU-Kanals hinzugefügt, von dem die Daten stammen.

Da die BX-Nummer unverändert in die Nachricht an den FLT übernommen wird, wird sie nicht auf die Adreßeingänge des RAMs angelegt, das die Look-up Table (LUT, engl. für Nachschlagetabelle) enthält. Für jede Kombination der verbleibenden elf Bits beinhaltet sie die korrekte, 80 Bits umfassende Nachricht an den FLT. Die Vielfachstreuung führt zu großen RoIs und aufgrund von Besonderheiten der Kodierung der Position in y-Richtung zur Erzeugung von bis zu vier Nachrichten für eine Koinzidenz. Dazu werden der LUT-Adresse zwei Bits hinzugefügt, die als Zähler verwendet werden. Die Information, wie viele Nachrichten für eine Koinzidenz generiert werden müssen, ist in der LUT enthalten. Der Inhalt der LUT jedes PMGs ist unterschiedlich, da die Information, welchen Detektorspalten die acht PCU-Kanäle entsprechen, darin kodiert ist.

Die 80 Bits umfassende Nachricht, die in einer FIFO-Stufe zwischengespeichert wird,

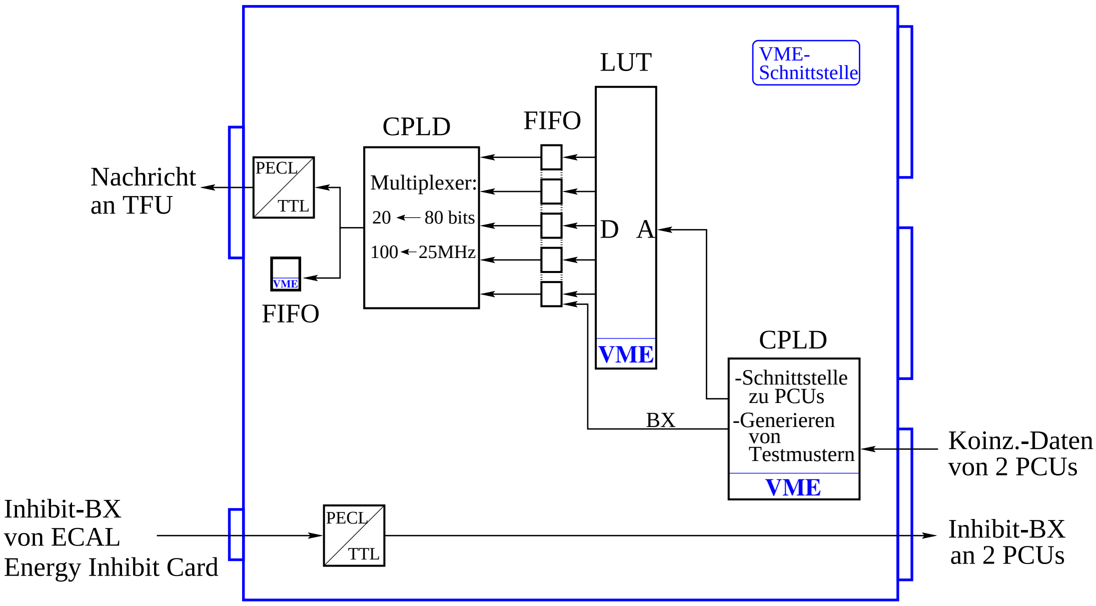

Abb. 3.9: Schematische Darstellung des PMGs, orientiert an der Plazierung der funktionalen Blöcke auf der Leiterplatte. Der Schnittstellen-CPLD steuert die Kommunikation mit den angeschlossenen PCUs und kann zur Erzeugung von Testmustern verwendet werden. Die Koinzidenzdaten werden mit einer Look-up Table (LUT) in die Nachrichten für den FLT übersetzt. In einer nachfolgenden FIFO-Stufe wird die BX-Nummer hinzugefügt, anschließend werden die Daten in vier Teilen in PECL-Signale transformiert und zur TFU übertragen. Die Inhibit-BX-Signale werden empfangen, transformiert und an die beiden PCUs weitergeleitet. Die Steuerung des PMGs erfolgt mit Zugriffen auf eine VME-Schnittstelle.

setzt sich aus 57 Bits Daten von der LUT zusammen, acht Bits BX-Nummer und 15 weitere Bits, die nur für den Elektron-Pretrigger benötigt werden. Ein CPLD dient als Multiplexer, der die Nachricht in vier Teile trennt, die mit einer Frequenz von 100 MHz übertragen werden [Glä 98]. Für Koinzidenzen, bei denen mehr als ein Bit im Muster der MU4-Daten gesetzt ist, werden zwei Nachrichten an den FLT gesendet. Zusammen mit der zuvor beschriebenen Erzeugung von bis zu vier Nachrichten pro Koinzidenz wegen der Kodierung der y-Position kann eine Koinzidenz also zu maximal acht FLT-Nachrichten führen. Für die Übertragung wird das logische Niveau der Signale von TTL- (Transistor-Transistor Logic) in PECL-Niveau konvertiert. Gleichzeitig wird eine Kopie der Nachrichten in einen Test-FIFO geschrieben, der eine Speichertiefe von 512 20-Bit-Worten besitzt und somit 128 Nachrichten aufnehmen kann.

Von der ECAL Energy Inhibit Card werden über ein Verteilersystem [Rie 98] die Inhibit-BX-Signale empfangen, von PECL- in TTL-Niveau transformiert und an die beiden verbundenen PCUs verteilt.

VME-Schnittstelle

Die Initialisierung und Steuerung des PMGs erfolgt über eine VME-Schnittstelle, insbesondere auch das Laden des Inhalts der LUT. Zudem kann die Funktion des PMGs mit definierten Testmustern überprüft werden. Alle verfügbaren VME-Zugriffe des PMGs sind in Anhang A aufgelistet, die wichtigsten werden im folgenden kurz beschrieben.

Ein Status-Register enthält Informationen über den Füllstand des Test-FIFOs und über Schnittstellenfehler für alle acht angeschlossenen PCU-Kanäle. Diese werden angezeigt, wenn das Protokoll zwischen PCU und PMG nicht eingehalten wird. Eine solche Verletzung des Protokolls kann zum Senden eines asynchronen Signals auf dem VME-Bus, eines sogenannten Interrupts, führen, wenn entsprechende Einstellungen im Kommando-Register vorgenommen sind.

Dieses Kommando-Register steuert die Funktion des PMGs. Die Prozessierung von Daten kann ein- und ausgeschaltet werden, um die LUT zu laden oder Änderungen der Konfiguration durchzuführen. Es steht weiter ein Testmodus zum internen Test des PMGs zur Verfügung: Zwei Register können mit Werten für die Koinzidenzdaten und für die PCU-Kanäle, von denen diese stammen, beschrieben werden. Bei Aktivieren des Testmodus werden diese Daten prozessiert. Im Kommando-Register kann die Verdoppelung der Nachrichten an den FLT aufgrund des Koinzidenz-Musters abgeschaltet werden. Außerdem können Einstellungen bezüglich der Interrupt-Bedingung vorgenommen werden. Durch ein allgemeines Rücksetz-Kommando werden alle Einstellungen des Kommando-Registers gelöscht und alle CPLDs des PMGs zurückgesetzt.

Der Inhalt der LUT wird über die VME-Schnittstelle geladen und kann zurückgelesen werden. Ein weiterer VME-Zugriff ermöglicht das Zurücksetzen des gesamten PMGs in einen definierten Ausgangszustand.

3.2 Die Schnittstellen zu anderen Systemen

Das Myon-Pretrigger-System besitzt Schnittstellen für den Transfer von detektor- oder triggerrelevanten Größen mit vier Systemen: dem Front End Driver-System (FED) und dem Pixel Mapping Board (PMB) zum Austausch von vorverarbeiteten Detektordaten, dem Fast Control System (FCS) für Informationen zur Zeitreferenz und der ersten Triggerstufe zum Transfer der gefundenen Myon-Spurkandidaten. Schnittstellen zum Austausch von Kontrollinformation für den Myon-Pretrigger, etwa mit der HERA – B Run Control, werden in Abschnitt 4.2.5 beschrieben.

Dateneingangs-Schnittstelle

In Abbildung 3.10 ist die Steckplatzbelegung eines FED-Crates im Pad-System gezeigt. Die FED-Tochterkarten [MSC 98a] erhalten die Detektordaten von der Ausleseelektronik und speichern sie für 128 BX-Takte. Zudem stellen sie Kopien dieser Daten einen BX-Takt nach dem Empfang über einen separaten Ausgang zur Verfügung. Von diesem Ausgang erhält ein PLB über Flachkabelverbindungen die digitalisierten Detektordaten von einer Spalte von MU3 oder MU4. Eine FED-Tochterkarte kann die Daten von

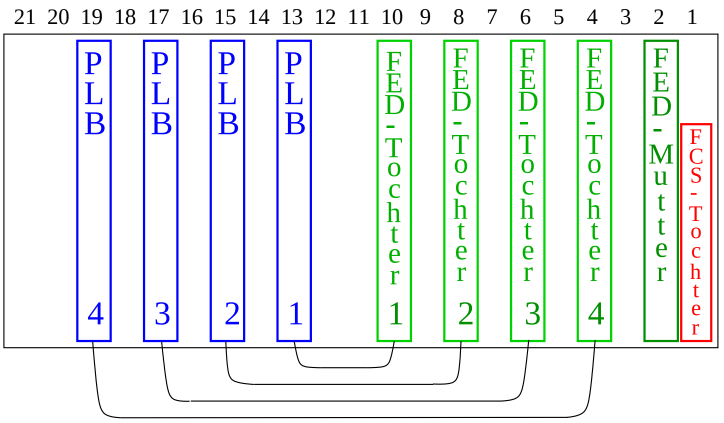

Abb. 3.10: Steckplatzbelegung eines FED-Crates für das Pad-System. Die PLBs erhalten die Detektordaten von FED-Tochterkarten. Die BX-Informationen werden von einer FCS-Tochterkarte im ganzen FED-Crate verteilt. Die FED-Mutterkarte dient dem Transfer FLT-akzeptierter Ereignisdaten zum Second Level Buffer (SLB).

bis zu acht Detektorspalten verarbeiten. Die FED-Mutterkarte [MSC 98b] sammelt die Daten der vom FLT akzeptierten Ereignisse von den bis zu vier verbundenen FED-Tochterkarten und sendet sie an den Second Level Buffer (SLB).

Für das Pixel-System werden die Ausgänge der FED-Tochterkarten an PMBs [Har 99] weitergeleitet, die die Auslesekanäle des Pixel-Detektors zu Pseudo-Pads kombinieren, wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurde. Das PMB ist so konzipiert, daß es eine Latenzzeit von genau einem BX-Takt aufweist. Da die zusätzliche Latenzzeit nicht auf dem PLB korrigiert werden kann, geschieht dies auf der PCU. Außerdem führt das PMB eine Umordnung der Pixel-Auslesekanäle für den FLT durch.

Die Zeitreferenz und Steuersignale werden vom FCS [Ful 99a] bereitgestellt. Es besteht aus einer Mutterkarte, die als Schnittstelle zu anderen Systemen wie der HERA-Zeitreferenz oder dem FLT fungiert. Sie verteilt relevante Daten an FCS-Tochterkarten, die in allen FED-Crates die lokale Steuerung vornehmen. Die FCS-Tochterkarte stellt u. a. den BX-Takt und die BX-Nummer über eine spezielle Backplane zur Verfügung. Außerhalb der regulären Datennahme können Testmuster auf den Ausgängen der FED-Tochterkarten erzeugt werden. Das Setzen jedes zweiten Bits (gerade oder ungerade) oder aller Bits wird über Signale von der FCS-Tochterkarte gesteuert: Zunächst wird die Art des Testmusters eingestellt, dann wird ein weiteres Signal gesendet, das die Erzeugung der Daten für die Dauer eines BX-Taktes auslöst. Für den Myon-Pretrigger ist ein spezieller Modus implementiert worden, der es erlaubt, diese Testmuster regelmäßig bei jeder durch 32 teilbaren BX-Nummer zu generieren [Ful 99b]. Dies erlaubt es, Daten der DPRAMs auszulesen, deren Adressen mit nur fünf Bits der BX-Nummer kodiert sind. Deshalb kann nicht zwischen BX-Nummern modulo 32 unterschieden werden.

Datenausgangs-Schnittstelle

Die Schnittstelle zur Übermittlung der Nachrichten an die erste Triggerstufe bilden die LVDS-Multiplexer (LVDS-MUX). Sie nehmen die Daten von je zwei PMGs auf, konvertieren die Signale von PECL- in LVDS-Niveau und übertragen die Daten an die TFUs, die der Superlage MU4 zugeordnet sind. Die Umwandlung der Signale ist notwendig geworden, da das ursprünglich auf TTL- und PECL-Signalen basierende Nachrichten-Netzwerk der ersten Triggerstufe [Glä 98] auf LVDS-Signale umgestellt worden ist [Glä 00]. Als Empfänger der Daten dienen TFU Message Boards, die den Nachrichtentransfer von und zu den TFUs übernehmen.

3.2.1 Testmodule

Um die Module des Myon-Pretriggers einzeln oder in der gesamten logischen Kette – auch außerhalb des Experimentes und detaillierter als dies im Experiment möglich ist – testen zu können, sind spezielle Elektronik-Module entwickelt worden, um die Schnittstellen des Myon-Pretriggers wo notwendig nachzubilden.

Die entwickelten Testmodule sind in Abbildung 3.11 ebenso dargestellt wie weitere Testmöglichkeiten unter Verwendung von VME-Zugriffen. Da das PLB keine Schnittstelle zu seiner Steuerung besitzt, sind zwei Testmodule entwickelt worden, die Dateneingänge bzw. -ausgänge emulieren. Mit dem Pretrigger FED Simulation Board (PFEDS) [Kol 99] können die Signale von 11 Kanälen von FED-Tochterkarten und die zugehörigen BX-Takt- und BX-Nummer-Signale einer FCS-Tochterkarte erzeugt werden. Die Daten für die FED-Kanäle können über eine VME-Schnittstelle geladen werden. Die Prozessierung der Daten erfolgt dann mit einer Frequenz von 10,4 MHz, d. h. unter realistischen Bedingungen. Zur Vergrößerung der Zahl emulierter FED-Kanäle können mehrere PFEDS parallel synchronisiert betrieben werden.

Um die optisch übertragenen Ausgangssignale des PLB überprüfen zu können, ist ein weiteres Testmodul entwickelt worden, das PLB Test Board (PLB-T). Mit ihm können

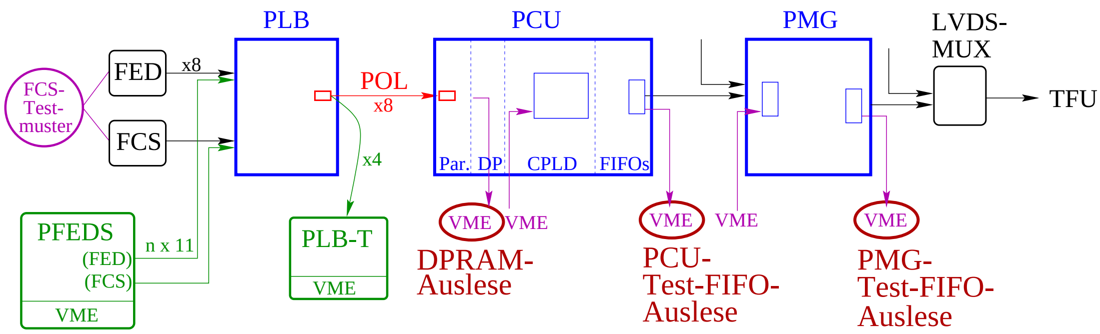

Abb. 3.11: Darstellung der Myon-Pretrigger-Kette und ihrer Testmöglichkeiten. Das Pretrigger FED Simulation Board (PFEDS) emuliert die Daten der FED- und FCS-Systeme. Mit dem PLB Test Board (PLB-T) können die Ausgangsdaten des PLBs ausgelesen werden. Für alle weiteren Tests können VME-Zugriffe auf die PCU oder den PMG benutzt werden.

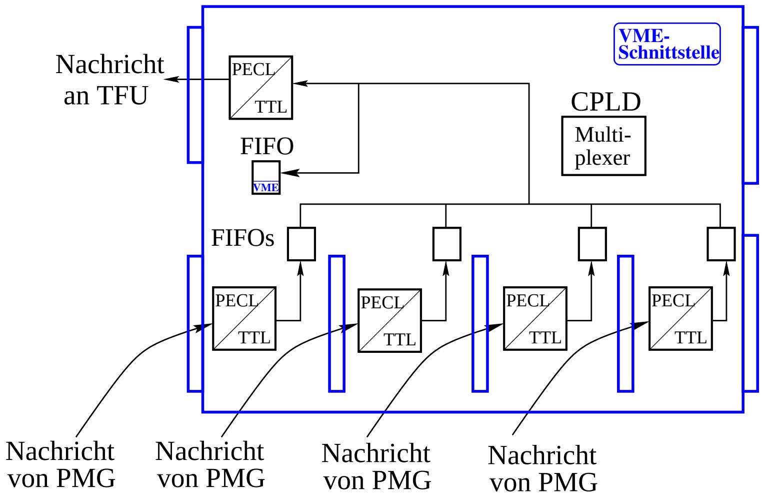

Abb. 3.12: Schematische Darstellung des PMMs. Er besitzt vier Eingänge für Nachrichten von PMGs und einen Ausgang. Das Multiplexen wird von einem CPLD gesteuert. Die Funktion des PMM und die Auslese des Test-FIFOs wird mit Hilfe von VME-Zugriffen vorgenommen.

die Daten von vier PLB-Kanälen empfangen und über eine VME-Schnittstelle ausgelesen werden.

Alle weiteren Tests können durch die Erzeugung bzw. Auslese von Daten über die VME-Schnittstellen der PCU und des PMGs durchgeführt werden.

- Indirekt lassen sich die DPRAMs der PCU auslesen; dies wird in Abschnitt 4.1.3 ausführlich dargestellt.
- Durch eine spezielle Konfiguration der Kommando- und Masken-Register des Koinzidenz-CPLDs können auf der PCU Testmuster erzeugt werden.
- Auch am Eingang des PMGs besteht die Möglichkeit, Testmuster zu generieren.
- Sowohl auf der PCU als auch dem PMG können die Daten von Test-FIFOs ausgelesen werden.

Durch eine Kombination der oben dargestellten Testmodule und VME-Zugriffe kann jedes Modul des Myon-Pretrigger-Systems individuell und jeder Teil der logischen Kette getestet werden.

Zusätzliche Testmöglichkeiten bieten sich durch die Verwendung des Pretrigger Message Multiplexers (PMM) [Rie 99]. Diese Karte ist ursprünglich für die Schnittstelle zwischen PMG und TFU im Pad-System entwickelt worden, für einen auf TTL- und PECL-Signalen basierenden Nachrichtentransfer [Sch 99b]. Wegen der Umstellung auf Signale mit LVDS-Niveau ist der PMM durch den LVDS-Multiplexer ersetzt worden, kann aber zu Testzwecken verwendet werden. Wie in Abbildung 3.12 gezeigt, besitzt der PMM vier Eingänge für Nachrichten von PMGs, die in TTL-Signale konvertiert werden und in FIFOs zwischengespeichert werden. Mit einem CPLD wird die Auslese der FIFOs gesteuert. Die Signale werden – in PECL-Format umgeformt – auf den Ausgang des PMMs gegeben und eine Kopie der Daten wird in einen Test-FIFO geschrieben. Mittels VME-Zugriffen kann der maximal 128 Nachrichten enthaltende Test-FIFO ausgelesen werden, die Funktion des PMMs gesteuert und überprüft werden. Die Karte kann gestartet oder zurückgesetzt werden, und für jeden Eingangskanal kann konfiguriert werden, ob er mit einem PMG-Ausgang verbunden ist. Signale über die Füllstände der FIFOs und des Test-FIFOs können abgefragt werden. Die Möglichkeit, unter Verwendung des PMM-Test-FIFOs die Ausgänge des PMGs, dabei insbesondere die Funktion der TTL/PECL-Treiber, und sogar die Ausgangssignale des Elektron-Pretriggers testen zu können, ist während der Inbetriebnahme des Systems sehr hilfreich gewesen.

3.3 Das Gesamtsystem

Der Datenfluß durch das Myon-Pretrigger-System ist, getrennt für Pad- und Pixel-Pretrigger, in Abbildung 3.13 dargestellt. Die Vergrößerung der Datenrate am Ausgang der PLBs verglichen mit der Eingangsrate kommt durch das Hinzufügen der BX-Informationen vom FCS zu allen übertragenen Daten zustande. Die Datenrate der übertragenen Koinzidenzdaten von den PCUs an die PMGs basiert für das Pad-System auf der Annahme einer Koinzidenz pro BX. Der Anstieg der Datenrate am Ausgang des PMGs um einen Faktor 15 im Pad-System hat zwei Ursachen: Die Nachrichten an den FLT enthalten zusätzliche Informationen und umfassen deshalb 80 Bits, verglichen mit 16 Bits am Ausgang der PCU. Außerdem werden in der Regel drei Nachrichten für eine Koinzidenz im Pad-System erzeugt. Die Verhältnisse der Datenraten im Pixel-System unterscheiden sich vom Pad-System, da nur 0,5 Koinzidenzen pro BX erwartet werden

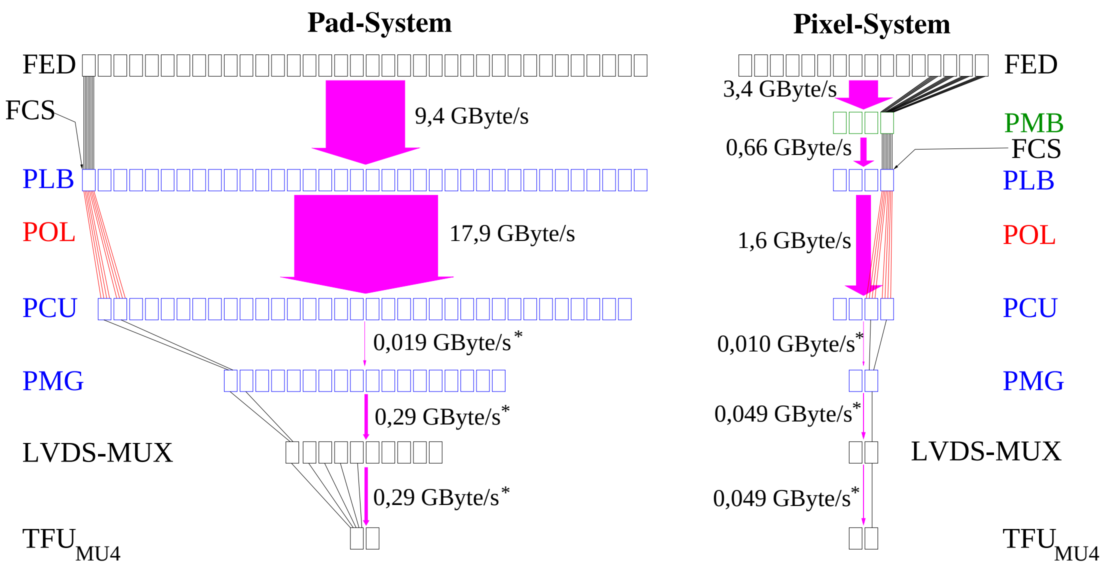

Abb. 3.13: Datenfluß durch den Pad- und Pixel-Pretrigger. Die mit * gekennzeichneten Datenraten nach den PCUs basieren auf der Annahme von 1 (Pad) bzw. 0,5 (Pixel) Koinzidenzen pro BX. Für die Datenraten nach den PMGs werden 3 (Pad) bzw. 1 (Pixel) Nachricht pro Koinzidenz angesetzt.

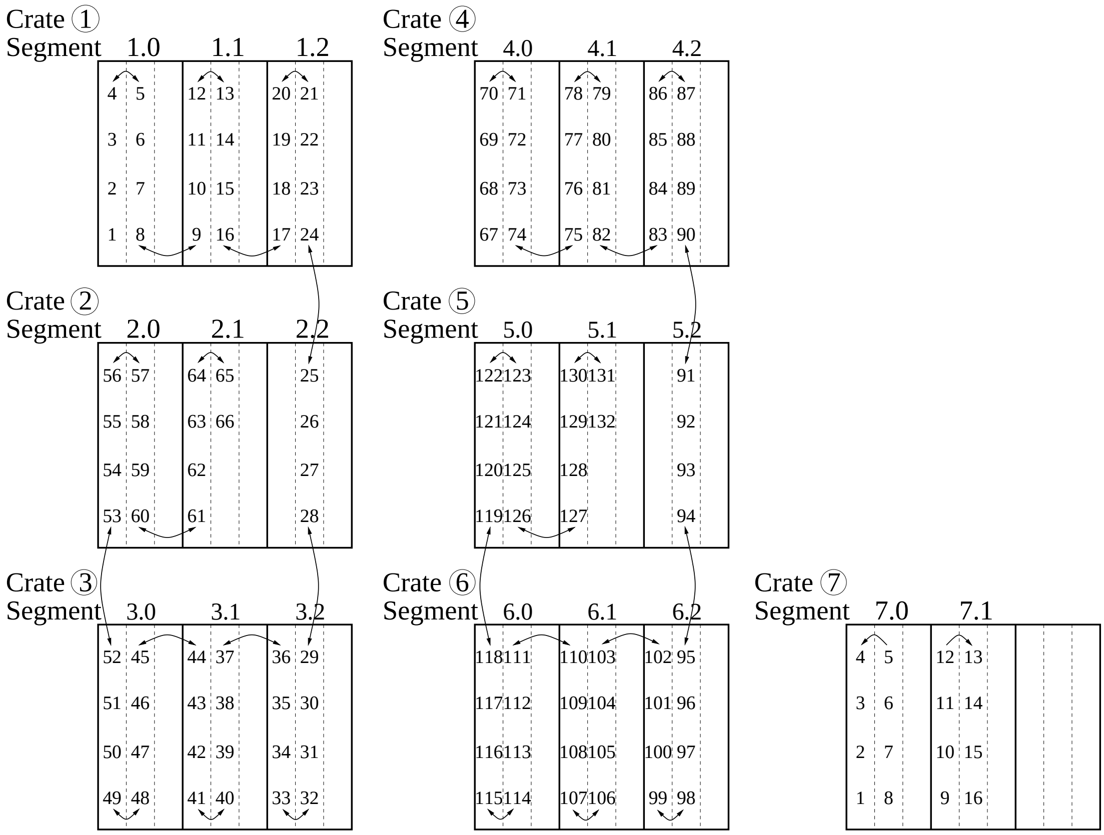

Abb. 3.14: Verteilung der PCU- und PMG-Module auf sieben VME-Crates und Zuordnung der PCU-Koinzidenzkanäle zu MU3-Detektorspalten [Sch 99d]. Die mit Zahlen versehenen Rechtecke stehen für PCUs und die ihnen zugeordneten Detektorspalten, leere Rechtecke für PMGs und Pfeile für PCU-Randspaltenverbindungen. Je zwei PCUs und ein PMG werden in Form von Segmenten numeriert, von 0 bis 2 innerhalb eines Crates. Die Crates 1 bis 6 decken das Pad-System ab, in Crate 7 ist der Pixel-Pretrigger untergebracht.

und nur eine Nachricht pro Koinzidenz erzeugt wird.

Die Verteilung der PCUs und PMGs auf sieben VME-Crates in der HERA – B Elektronikhütte und die Zuordnung der PCU-Koinzidenzkanäle zu Pad- bzw. Pseudo-Pad-Spalten von MU3 ist in Abbildung 3.14 dargestellt [Sch 99d]. Je zwei PCUs und ein PMG bilden einen logisch abgeschlossenen Block, ein sogenanntes Segment. Entsprechend der Anzahl vorhandener Steckplätze können pro Crate drei Segmente installiert werden. Die gemäß der Abbildungen 2.6 und 2.8 numerierten Detektorspalten sind den PCU-Koinzidenzkanälen so zugeordnet worden, daß die notwendigen Verbindungen für die MU4-Randspalten-Übertragungen möglichst kurz sind. Von den Modulen in den Crates 1 bis 3 wird die $+y$-Hälfte des Pad-Detektors abgedeckt, von den Modulen in den Crates 4 bis 6 die $-y$-Hälfte. In den Segmenten 7.1 und 7.2 sind die Module für die $-x$- bzw. $+x$-Hälfte des Pixel-Systems installiert.

Kapitel 4

Software für den Betrieb des Myon-Pretriggers

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Elektronik-Module bilden die Grundlage des Myon-Pretrigger-Systems. Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Entwicklung von Software, um die Elektronik-Module für Tests und zur Datennahme im HERA – B Experiment betreiben zu können. Dabei gilt es, für zwei grundlegend verschiedene Aufgaben Programme zu entwickeln. Bei ersten Tests der Elektronik-Module, der späteren Massenproduktion und von Teilen der logischen Kette des Myon-Pretriggers werden wenige Komponenten außerhalb des HERA – B Experimentes von Benutzern betrieben, die zugleich Experten sind. Im Gegensatz dazu besteht das gesamte Myon-Pretrigger-System aus etwa 100 Elektronik-Modulen, die, in die Trigger- und Datennahmeumgebung des HERA – B Experimentes integriert, von Nicht-Experten bedient werden müssen.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die Software beschrieben, die entwickelt worden ist, um einzelne Komponenten des Myon-Pretriggers und Minimalsysteme zu betreiben. Als Minimalsysteme werden Konfigurationen mit wenigen Komponenten bezeichnet, die Teile der logischen Kette des Gesamtsystems umfassen. Zuerst werden die Anforderungen geschildert, dann ihre Umsetzung in Form von Treiberfunktionen, Systemtestfunktionen und einer Benutzerschnittstelle. Die Treiberfunktionen machen alle VME[1]-Zugriffe auf die Komponenten verfügbar, Systemtestfunktionen erlauben flexible automatisierte Tests über längere Zeiträume. Zur Verwendung dieser Funktionen stehen dem Benutzer Auswahlmenüs und Steuerskripte zur Verfügung. Die Online-Software, die den Betrieb des Myon-Pretriggers auch ohne Experten ermöglicht, wird im zweiten Teil dieses Kapitels dargestellt. Nach den an sie gestellten Anforderungen wird ihre Struktur beschrieben, ihr Aufbau aus verschiedenen Prozessen und die Kommunikation zwischen diesen. Es folgt eine Darstellung der Benutzerschnittstelle für Expertenzugriffe und der Datenbank für den Myon-Pretrigger. In Abbildung 4.1 ist der Zusammenhang zwischen den Teilen der Software, die in den beiden Teilen dieses Kapitels beschrieben werden, dargestellt. Wie das Gesamtsystem auf den Einzelkomponenten basiert, baut die Online-Software zur Steuerung des Gesamtsystems auf der Software für Einzelkomponenten und Minimalsysteme auf.

[1]VERSA Module Eurocard

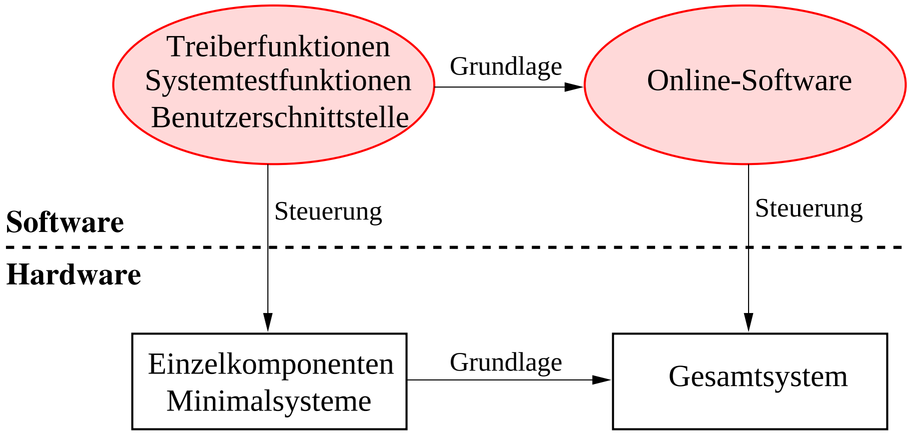

Abb. 4.1: Struktur der Software für den Betrieb des Myon-Pretriggers. Treiber-, Systemtestfunktionen und eine Benutzerschnittstelle dienen zur Steuerung von Einzelkomponenten und Minimalsystemen, die Online-Software zur Steuerung des Gesamtsystems. So wie das Gesamtsystem auf den Einzelkomponenten basiert, liegen die Grundlagen der Online-Software in den Programmen zum Betrieb der Einzelkomponenten und Minimalsysteme.

4.1 Betrieb von Einzelkomponenten und Minimalsystemen

Der Betrieb von Komponenten des Myon-Pretriggers außerhalb der Datennahme im HERA – B Experiment dient verschiedenen Zwecken. Zunächst müssen Prototypen der Hardware-Module einzeln getestet werden, dann ihre Schnittstellen mit anderen Modulen, um festzustellen, ob sie die erforderliche Funktionalität erfüllen. An diese Tests schließen sich Systemtests an, die die ganze logische Kette des Myon-Pretriggers oder Teile davon umfassen und im Gegensatz zu den ersten Tests über einen längeren Zeitraum erfolgen. Mit diesen Tests von Minimalsystemen können auch Fehler aufgedeckt werden, die selten auftreten. Nach der Massenproduktion der Hardware-Module müssen diese in großer Stückzahl getestet werden, um bei der Produktion aufgetretene Fehler entdecken und beheben zu können.

4.1.1 Anforderungen

Die geschilderten unterschiedlichen Aufgaben stellen folgende Anforderungen an die zu entwickelnden Programme:

- Jeder mögliche VME-Zugriff auf eine Hardware-Komponente muß von der Software unterstützt werden.
- Die Auswahl der Hardware-Einheiten, auf die die VME-Zugriffe angewendet werden, muß für den Benutzer einfach ausführbar sein.

- Komplexe Funktionen, die über einzelne VME-Zugriffe hinausgehen, müssen in der Software implementiert werden, da auf den Elektronik-Modulen des Myon-Pretriggers keine programmierbaren Prozessoren vorhanden sind.
- Funktionen zur Durchführung von automatisierten Tests von Minimalsystemen, auch über längere Zeiträume, müssen zur Verfügung gestellt werden.
- Es muß eine menügesteuerte Benutzerschnittstelle für Experten geben.
- Abfolgen von Zugriffen müssen reproduzierbar wiederholt werden können, und häufig wiederkehrende Abläufe von Zugriffen müssen vereinfacht werden. Dazu wird eine Benutzerschnittstelle mittels sogenannter Steuerskripte implementiert.

Im Hinblick auf die spätere Entwicklung der Online-Software für den Betrieb des Myon-Pretriggers im HERA – B Experiment ergeben sich weitere Anforderungen:

- Mit einem modularen Aufbau der Software wird gewährleistet, daß ein großer Teil der Funktionen mit geringen Modifikationen als Grundlage der Online-Software verwendet werden kann.
- Es ist die gleiche VME-Umgebung zu benutzen, die im HERA – B Experiment ausschließlich verwendet wird.

In den folgenden Abschnitten werden die Entwicklungsumgebung und die Implementierung der Software für den Betrieb von Einzelkomponenten und Minimalsystemen, mit der die gestellten Anforderungen erfüllt werden, vorgestellt.

4.1.2 Die Software-Entwicklungsumgebung

In Abbildung 4.2 sind die logischen Ebenen bei Zugriffen auf die Myon-Pretrigger-Komponenten dargestellt. Jede Hardware-Funktion, die von außen zugänglich sein soll, muß mit der VME-Schnittstelle der betreffenden Komponente verbunden sein. Die VME-Zugriffe für die Module innerhalb eines Crates werden von einer VME-CPU[2] ausgeführt. Als Betriebssystem für die VME-CPU dient ein Echtzeit-Betriebssystem. Darunter wird ein Betriebssystem verstanden, in dem die Antwortzeiten auf gestellte Anforderungen festgelegt sind und bei ihrem Nicht-Einhalten schwerwiegende Fehlfunktionen auftreten (z. B. nach [Lap 97]). Die VME-Zugriffe können mit Hilfe von Bibliotheksfunktionen in Programmen verwendet werden, wie dies in den Treiberfunktionen für die Myon-Pretrigger-Hardware getan wird. Mit Hilfe der Benutzerschnittstelle, die prinzipiell sowohl auf der VME-CPU als auch unabhängig von ihr implementiert sein kann, können diese Funktionen ausgeführt werden.

Die in Abbildung 4.2 als kommerzielle Produkte markierten Blöcke sind im HERA – B Experiment für alle Subsysteme einheitlich festgelegt. Sie werden auch für die Softwareentwicklung außerhalb des HERA – B Experimentes benutzt, um Programme mit möglichst geringen Modifikationen als Grundlage der Online-Software verwenden zu können.

[2]zentrale Recheneinheit, für engl. Central Processing Unit

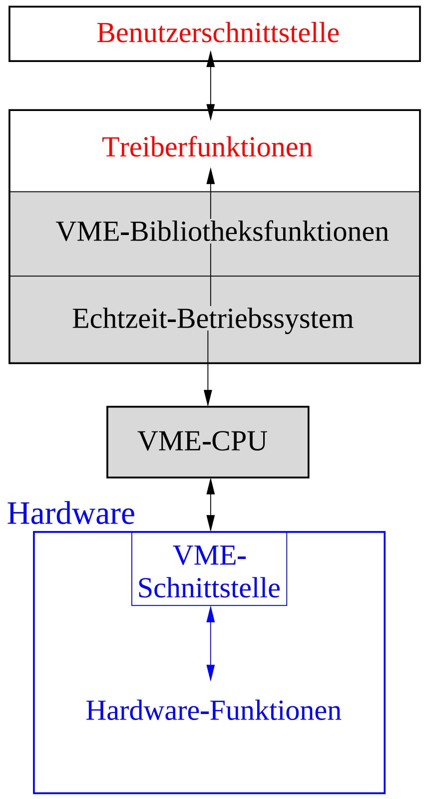

Abb. 4.2: Schematische Darstellung der logischen Ebenen bei Zugriffen auf die Myon-Pretrigger-Hardware. Bei den grau unterlegten Blöcken handelt es sich um kommerzielle Produkte.

Als VME-CPUs werden Einzel-Board-Computer verwendet [CET 00], die – abgesehen von einer Festplatte – alle Komponenten eines PCs (Personal Computer) enthalten und zusätzlich den VME-Bus steuern. Deshalb sind sie als 6 Höheneinheiten große VME-Einschübe realisiert, die in jedem Crate eingebaut sind. Die VME-CPUs dienen, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, zum Kompilieren und Ausführen der Programme, die auf die Myon-Pretrigger-Hardware zugreifen. Als Echtzeit-Betriebssystem wird LynxOS [Lyn 98] verwendet und als sogenanntes Wirts-Betriebssystem Linux, d. h. auf einem PC mit dem Betriebssystem Linux werden die notwendigen Daten gespeichert, um die VME-CPUs unter LynxOS betreiben zu können. Das Dateisystem von LynxOS ist im Linux-Dateisystem enthalten. Zu ihrer Konfiguration sendet die VME-CPU bei ihrem Start mit dem Netzwerkprotokoll BOOTP (Bootstrap Protocol) eine Anforderung, die von dem PC beantwortet wird, der das LynxOS-Betriebssystem enthält. Dieser antwortet, indem er über das Netzwerk mittels TFTP (Trivial File Transfer Protocol) die Daten für das LynxOS-Betriebssystem transferiert, die die VME-CPU in ihren internen Speicher lädt. Da die VME-CPU keine Festplatte besitzt, wird auf externe Dateien mittels NFS (Network File System) zugegriffen.

Die verwendeten VME-Bibliotheksfunktionen sind einheitlich für das gesamte HERA – B Experiment gewählt [MIZ 97]. Sie erlauben einen hardwareunabhängigen und

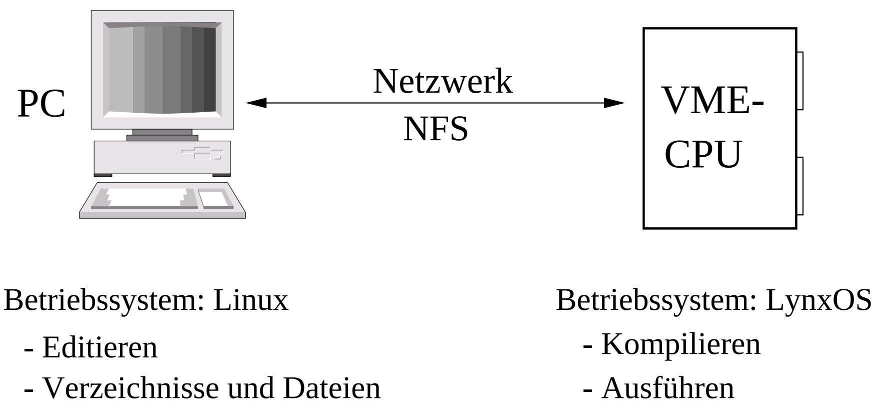

Abb. 4.3: Software-Entwicklungsumgebung. Programme werden auf einem PC, der die Verzeichnisstruktur enthält, unter dem Betriebssystem Linux editiert. Kompiliert und ausgeführt werden die Programme unter LynxOS auf der VME-CPU.

einheitlichen VME-Zugriff aus Programmen, die in der Programmiersprache C geschrieben sind. Wegen der allgemeinen Verwendung der VME-Bibliotheksfunktionen ist eine gute Portierbarkeit der entwickelten Programme innerhalb des HERA – B Experimentes gewährleistet.

4.1.3 Treiberfunktionen für die Myon-Pretrigger-Hardware

Die Treiberfunktionen für die Myon-Pretrigger-Hardware stellen die Schnittstelle zwischen den Funktionen der Hardware-Module und jeglicher Software dar, die zum Betrieb des Myon-Pretriggers entwickelt wird. Eine Übersicht aller Treiberfunktionen mit einer kurzen Beschreibung ihrer Funktion findet sich in Anhang B, eine ausführliche Dokumentation wird in [Sch 99c] gegeben.

In den meisten Fällen reichen zur Ausführung einer Hardware-Funktion einzelne Schreib- und Lesezugriffe auf Register aus – teilweise nur auf einzelne Bits, zum Teil auch auf mehrere Register. Bei allen Treiberfunktionen, die schreibende Zugriffe beinhalten, gibt es eine Option, diese Zugriffe zu überprüfen. Dann werden mit Hilfe von Lesezugriffen die zuvor geschriebenen Werte überprüft, und bei Abweichungen wird die Funktion abgebrochen und eine Fehlermeldung erzeugt.

Bei Zugriffen auf einzelne Bits eines Registers stehen in der Regel zwei Treiberfunktionen zur Auswahl, eine stärker am Aufbau der Hardware orientierte und eine an der auszuführenden Funktion. Diese sind aus Gründen der einfacheren Benutzung und besseren Verständlichkeit implementiert worden. Zum Starten der Prozessierung des Koinzidenz-CPLDs (Complex Programmable Logic Device) auf einer PCU ist es z. B. notwendig, Bit 15 im Board-Kommando-Register auf `1` zu setzen. Dies kann mit Hilfe der hardware-nahen Treiberfunktion `pcu_WriteBoardComReg` mit den Argumenten 15 und 1 durchgeführt werden oder mit der Funktion `pcu_EnableFLEXPipe` und Argument 1. In letzterem Fall ist die ausgeführte Funktion für Experten deutlicher zu erkennen.

Im folgenden werden einige komplexe Treiberfunktionen, die auch für die Online-Software von großer Bedeutung sind, ausführlicher beschrieben.

Zugriffe auf die optischen Verbindungen der PCU

Um eine hohe Qualität der optischen Datenübertragung zwischen Pretrigger Link Board (PLB) und Pretrigger Coincidence Unit (PCU) zu erreichen, müssen auf der Empfängerseite Einstellungen vorgenommen werden. Die Sender des Pretrigger Optical Links (POL) können nicht dynamisch verändert werden, da hierfür keine Schnittstelle vorgesehen ist. Die Offset-Spannungen für jeden POL-Empfänger müssen individuell eingestellt werden, da die Spannungswerte sowohl vom sendenden PLB-Kanal, vom POL-Sender auf dem PLB als auch vom POL-Empfänger auf der PCU abhängen. Aus diesem Grund werden zur Einstellung der Offset-Spannung Digital-Analog-Wandler (DAC, für engl: Digital to Analog Converter) verwendet, die eine weitestgehende Automatisierung des Vorgangs erlauben.

Je ein DAC besitzt vier analoge Ausgänge, weshalb für die acht POL-Empfänger der PCU zwei DACs benötigt werden. In Abbildung 4.4 ist dargestellt, welche VME-Zugriffe benötigt werden, um die Offset-Spannungen für eine PCU zu bestimmen und einzustellen. Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, werden zur Überprüfung der Qualität der optischen Verbindungen für jede Übertragung die externen Synchronisationsbits und Statussignale des Parallelisierungs-Bausteins kontrolliert. Ein in einem CPLD implementierter Zustandsautomat wertet die Signale aus und erzeugt für jede angeschlossene Verbindung das LinkOK-Signal, das über die VME-Schnittstelle auslesbar ist und angibt, ob die Verbindung fehlerfrei funktioniert oder nicht.

Die VME-Zugriffe der PCU sind für die einzelnen Koinzidenzkanäle getrennt. Aufgrund der Verteilung von je drei MU4-Spalten zu einem Koinzidenzkanal lassen sich die optischen Verbindungen der MU4-Spalten nicht eindeutig zu Koinzidenzkanälen zuordnen. Wie aus Abbildung 4.4 ersichtlich ist, sind die VME-Zugriffe auf die DACs und die DAC-Register sowie für das Zurücksetzen aller POL-Empfänger den beiden Koinzidenzkanälen der Hauptkarte zugeordnet. Entsprechend dem Numerierungsschema der POL-Empfänger, definiert in Abbildung 3.4, sind dies die Zugriffe für je zwei MU3-Spalten (5 und 6 bzw. 7 und 8) und zwei MU4-Spalten (1 und 2 bzw. 3 und 4). Für die Auswertung der LinkOK-Signale ist die Zuordnung komplizierter, da für die MU3-Spalten, die den POL-Empfängern 6 und 7 entsprechen, die LinkOK-Signale auf den beiden Koinzidenzkanälen der Mezzanin-Karte ausgewertet werden. Deshalb werden alle Zugriffe, die die optischen Verbindungen betreffen, in den entsprechenden Treiberfunktionen für eine ganze PCU zusammengefaßt. Mit einer Bitmaske wird ausgewählt, welche optischen Verbindungen angesprochen werden sollen, und die Verteilung der VME-Zugriffe auf die vier Koinzidenzkanäle der PCU erfolgen intern in der Treiberfunktion. Mit der Bitmaske 9f (hexadezimal) = 1001 1111 werden z. B. alle Verbindungen außer Nummer 6 und 7 selektiert, also alle Verbindungen für den Betrieb der Hauptkarte ohne die Mezzanin-Karte.

Die Bestimmung der Werte der Offset-Spannung für die einzelnen POL-Empfänger wird mit Hilfe der Treiberfunktion `pcu_OffsetRange` vorgenommen, die die ermittelten Werte in einer Datei ablegt. Zunächst wird die Auswertung der LinkOK-Signale für alle betroffenen Koinzidenzkanäle eingeschaltet (① in Abbildung 4.4). Für jede ausgewählte optische Verbindung wird folgende Programmschleife durchlaufen:

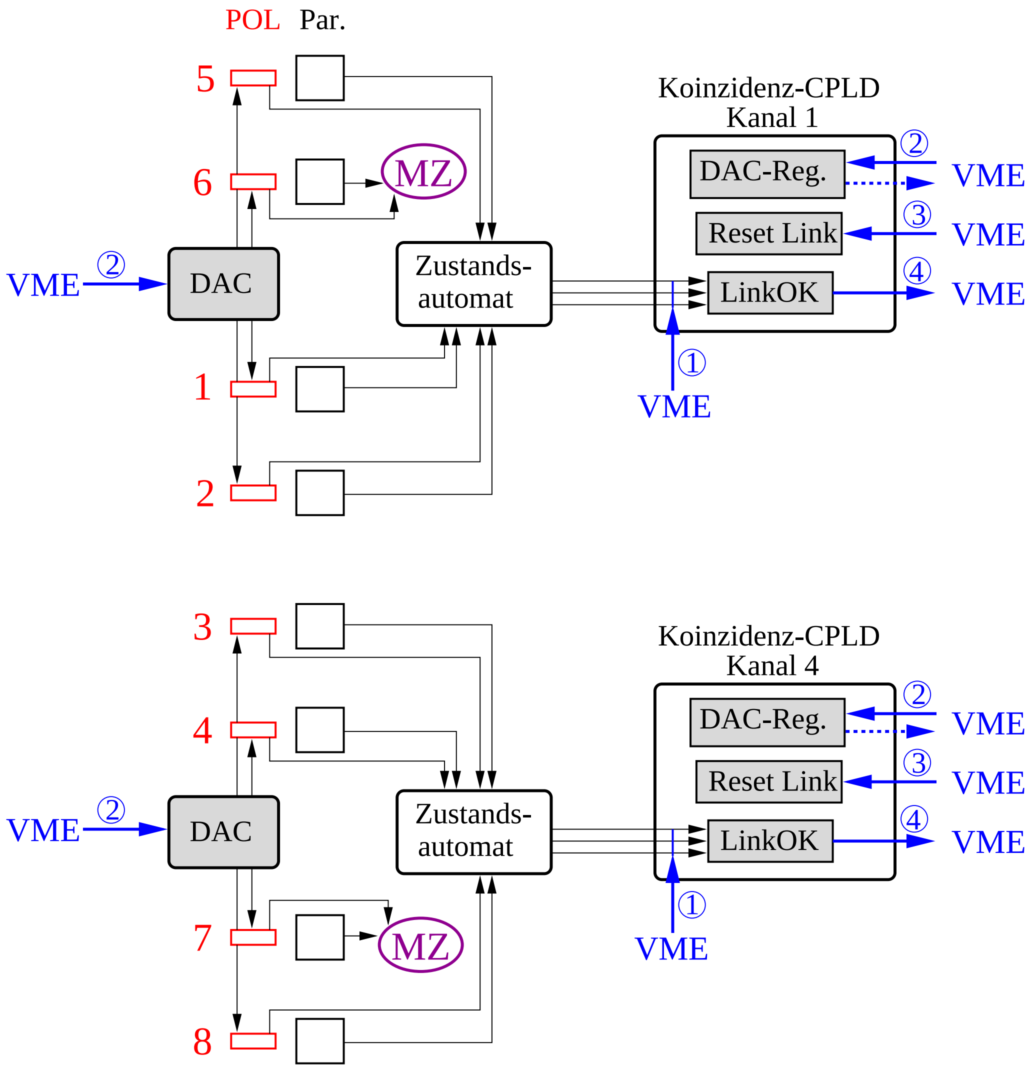

Abb. 4.4: Darstellung der Bestimmung von Offset-Spannungen für die acht POL-Empfänger einer PCU mit Hilfe von DACs. Ein Zustandsautomat wertet die Signal von POL-Empfängern und Parallelisierungs-Bausteinen (Par.) aus und generiert ein Signal für jede Verbindung (LinkOK). Die Verarbeitung dieses Signals kann abgeschaltet werden. Für Verbindung 6 und 7 werden die Signale auf der Mezzanin-Karte ausgewertet. Das Zurücksetzen der POL-Empfänger wird über Registerwerte im Koinzidenz-CPLD vorgenommen (Reset Link).

- Der Wert des DACs wird eingestellt und gleichzeitig in das DAC-Register geschrieben, da der DAC selbst nicht ausgelesen werden kann (②). Der Wertebereich des DACs umfaßt 256 Schritte. Der nächste einzustellende Wert ergibt sich aus der Schrittweite, die ein Parameter des Aufrufs von `pcu_OffsetRange` ist. In der Regel wird eine Schrittweite von 5 gewählt.

- Nach dem Einstellen des DAC-Wertes und damit einer neuen Offset-Spannung wird der POL-Empfänger zurückgesetzt (③).

- Nach einer Wartezeit wird das LinkOK-Signal abgefragt, um festzustellen, ob die optische Übertragung funktioniert (④). Ein typischer Wert für die Wartezeit beträgt 0,1 s.

Nach Beenden der Schleife wird der größte zusammenhängende Wertebereich bestimmt, in dem die LinkOK-Signale ein Funktionieren der optischen Verbindung angezeigt haben. Der Mittelwert dieses Bereiches wird durch einen Zugriff auf den DAC und das DAC-Register eingestellt, und sowohl der Mittelwert als auch die Größe des Bereiches werden für jede PCU in einer Datei abgelegt.

Da die Wartezeit nach Zurücksetzen des POL-Empfängers von 0,1 s viel länger ist als die typische Dauer eines VME-Zugriffes von weniger als 1 μs, kann die Zeitdauer für die Bestimmung der Offset-Spannungen für ein vollständig belegtes Crate mit sechs PCUs, d. h. 48 POL-Empfängern, mit etwa 250 s abgeschätzt werden. Erste Untersuchungen der Einstellungen für drei PCUs haben gezeigt, daß für Wartezeiten zwischen 0,1 ms bis 1 s keine signifikanten Unterschiede der bestimmten Mittelwerte und der Größe der Bereiche festzustellen sind. Eine systematische Studie mit einer größeren Zahl von PCUs ist aus Zeitgründen noch nicht durchgeführt worden. Bis dahin ist, aufgrund der Bedeutung dieser Datenübertragung zwischen PLB und PCU, dem konservativen Wert von 0,1 s der Vorzug gegeben worden. Außerdem haben Erfahrungen im Betrieb gezeigt, daß die Offset-Spannungen in der Regel nur nach Austausch von Hardware-Komponenten neu bestimmt werden müssen. Ansonsten können mit der Treiberfunktion `pcu_InitLink` die zuvor bestimmten Spannungswerte aus der jeweiligen Datei für die PCU ausgelesen und eingestellt werden.

Auslese der Dual Ported RAMs der PCU

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wurde, ist kein direkter Zugriff auf die Daten der Dual Ported RAM (DPRAM) Speicherstufe der PCU möglich. Da die DPRAMs die einzige Stelle im Myon-Pretrigger-System sind, an der Trefferinformationen der Pads vor der Koinzidenzbildung zugänglich sind, ist eine indirekte Art des Zugriffs auf die DPRAMs implementiert worden. Bei der Auslese muß jedoch die Prozessierung von Koinzidenzdaten auf der PCU unterbrochen werden.

Abbildung 4.5 gibt einen Überblick über das Auslesen der DPRAMs mit Hilfe von VME-Zugriffen, die in der Treiberfunktion `pcu_ReadDPR` zusammengefaßt sind. Zunächst wird der Schreibzugriff auf die DPRAMs unterbunden, indem das WEN-Signal (Write Enable) inaktiv geschaltet wird (① in Abbildung 4.5). Damit bleiben die gerade gespeicherten Daten in den DPRAMs erhalten. Gleichzeitig wird bei diesem Zugriff die Benutzung eines Zählers ermöglicht, der sich in dem CPLD befindet, der die Verzögerungsstufe zwischen Beschreiben und Auslesen der DPRAMs im regulären Betrieb enthält. Dieser Zähler umfaßt sechs Bits, die der Leseadresse aus den DPRAMs entsprechen: Sie setzen sich aus den untersten fünf Bits der BX-Nummer (Bunch Crossing) und der Zyklus-Nummer als niedrigstwertigem Bit zusammen. Mit einem weiteren VME-Zugriff wird die Erzeugung eines internen Taktsignals von 25 MHz gestartet, das das Taktsignal vom POL-Empfänger der MU3-Spalte ersetzt (②). Es bewirkt das Starten des Zählers, die Auslese der DPRAMs und das Einlesen der Daten in die Register am Eingang des Ko-

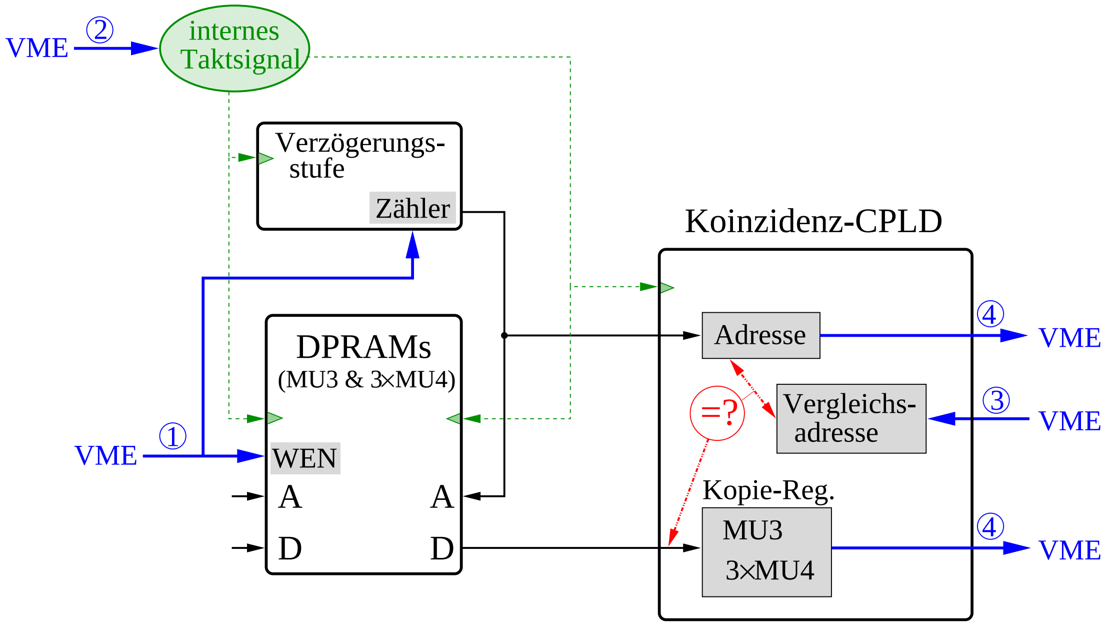

Abb. 4.5: Darstellung des Auslesens der DPRAMs auf der PCU. Mit VME-Zugriffen wird das Schreiben in die DPRAMs (WEN) unterdrückt, ein Zähler im Logikbaustein, der die Verzögerungsstufe enthält, und die Erzeugung eines internen Taktsignals gestartet. Wenn die Adresse zur Auslese der DPRAMs mit einer Vergleichsadresse im Koinzidenz-CPLD übereinstimmt, können die Daten der MU3- und MU4-Spalten ausgelesen werden. Vereinfachend sind die vier Register für MU3-, MU4L-, MU4M- und MU4R-Daten als eines dargestellt.

inzidenz-CPLDs. Das Taktsignal liegt zwar auch am Schreibeingang der DPRAMs an, ist dort aber wirkungslos, da die Schreibzugriffe zuvor unterbunden worden sind. Der Koinzidenz-CPLD enthält ein Register für eine Vergleichsadresse, mit der die Adresse zum Auslesen der DPRAMs verglichen wird. Zur Aktivierung des Vergleichsmodus wird das Register mit einem Wert ungleich 0 beschrieben (③). Zur Auslese des Inhalts der DPRAMs wird in einer Schleife

- zunächst die Vergleichsadresse auf einen Wert von 0 beim ersten Schritt und um eins erhöht bei jedem weiteren Schritt eingestellt (③). Bei jedem Beschreiben des Registers für die Vergleichsadresse wird gleichzeitig der Inhalt der Kopie-Register überschrieben. Diese Register enthalten Kopien der Daten der Eingangsregister des Koinzidenz-CPLDs, sind aber im Gegensatz zu diesen mit der VME-Schnittstelle verbunden. Im Koinzidenz-CPLD wird die ausgelesene Adresse der DPRAMs mit der Vergleichsadresse verglichen, und bei ihrer Übereinstimmung wird jeder weitere Schreibzugriff auf die Kopie-Register unterbunden. So werden die Daten zu der gewählten Ausleseadresse gespeichert, bis eine neue Vergleichsadresse eingestellt wird.

- Nach dem Setzen der Vergleichsadresse wird eine Wartezeit von 10 μs eingehalten, um sicherzustellen, daß die Kopie-Register die korrekten Daten enthalten.

- Dann werden die Kopie-Register und die Adresse ausgelesen (④).

Nach dem Auslesen aller 64 Adressen werden die Schreibzugriffe auf die DPRAMs wieder erlaubt, und gleichzeitig wird der Zähler angehalten (①). Außerdem wird die Erzeugung des internen Taktsignals gestoppt (②).

Die ausgelesenen Daten werden entweder in Dateien oder auf dem Bildschirm ausgegeben. Die Funktion `pcu_ReadDPR` erlaubt es, beliebig viele Auslesezyklen der DPRAMs nacheinander auszuführen. Die Zeitdauer eines Zyklus wird im wesentlichen durch die Wartezeit nach dem Setzen der Vergleichsadresse bestimmt und kann deshalb mit etwa $640\,\mu$s abgeschätzt werden.

Auslese von Test-FIFOs

Am Ausgang der PCU – parallel zum Serialisierungs-FIFO (First in First out-Datenspeicher) – sowie am Ausgang von Pretrigger Message Generator (PMG) und Pretrigger Message Multiplexer (PMM) – parallel zu den Ausgangstreibern – gibt es Test-FIFOs, die mit der VME-Schnittstelle verbunden sind. Sie sind an den Datenfluß des jeweiligen Hardware-Moduls angekoppelt und erhalten Kopien der Daten, die seit dem letzten Zurücksetzen des FIFOs, bis dieser vollständig gefüllt ist, prozessiert worden sind. Damit enthalten die Test-FIFOs Informationen, die ausgelesen werden können, ohne die Prozessierung zu unterbrechen. Für Tests und als Grundlage des in die Online-Software implementierten Monitorings spielen besonders PCU- und PMG-Test-FIFOs eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zu den DPRAMs enthalten sie bereits verarbeitete Daten, d. h. Koinzidenzdaten im Fall der PCU und Nachrichten für den First Level Trigger (FLT) im Fall von PMG und PMM.

Allen Test-FIFOs ist gemeinsam, daß es vier Arten von VME-Zugriffen gibt, die in Abbildung 4.6 dargestellt sind. Neben dem Zugriff zum Auslesen kann der Inhalt des FIFOs durch Zurücksetzen gelöscht werden, und es können Informationen über den Füllstand abgefragt werden. Bei jedem Schreibzugriff für Kopien prozessierter Daten wird das Full-Flag (FF) aktualisiert, das anzeigt, ob der FIFO voll ist. In diesem Fall können keine weiteren Daten hineingeschrieben werden. Das Empty-Flag (EF) zeigt an, ob der FIFO leer ist; es wird bei den Lesezugriffen über die VME-Schnittstelle aktualisiert.

Die Treiberfunktionen `pxx_ReadTestFifo` (`pxx` = `pcu`, `pmg` oder `pmm`) können in zwei verschiedenen Auslesemodi betrieben werden, die eine unterschiedliche Reihenfolge der VME-Zugriffe erforderlich machen:

1. Der Test-FIFO wird nur ausgelesen, wenn er voll ist. Dazu wird zunächst das Full-Flag überprüft. Ist es inaktiv, der FIFO also nicht voll, wird die Abfrage bis zu 1.000.000 Mal wiederholt. Sollte der FIFO auch danach nicht voll sein, wird die Treiberfunktion mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Andernfalls werden alle Worte des FIFOs ausgelesen, d. h. 4096 Worte für die PCU und 512 Worte für den PMG und den PMM. Anschließend wird der FIFO zurückgesetzt.

2. Alternativ kann der Test-FIFO ausgelesen werden, bis er leer ist. Da das Empty-Flag nur bei einem Lesezugriff aktualisiert wird, wird zuerst ein Wort aus dem

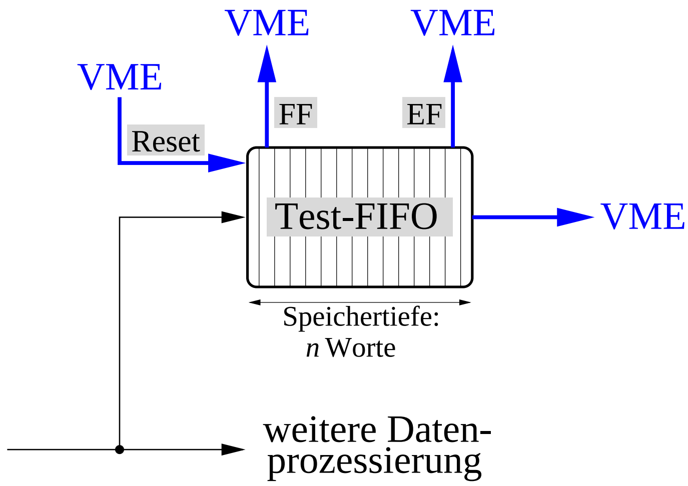

Abb. 4.6: Darstellung des Auslesens eines Test-FIFOs auf PCU, PMG oder PMM. Die Auslese der Daten und das Zurücksetzen (Reset) des FIFOs können über die VME-Schnittstelle ausgeführt werden, ohne die Datenprozessierung zu stören. Der Füllstand des FIFOs wird von zwei Signalen angezeigt: EF (Empty-Flag) und FF (Full-Flag). Die Speichertiefe der Test-FIFOs beträgt $n = 4096$ (PCU) bzw. $n = 512$ Worte (PMG und PMM).

FIFO ausgelesen, bevor das Empty-Flag überprüft wird. Bis dieses anzeigt, daß der FIFO leer ist, werden die Zugriffe in dieser Reihenfolge – Auslese eines Wortes, Abfrage des Empty-Flags – wiederholt. Nach der Auslese so vieler Worte, wie der Speichertiefe des FIFOs entsprechen, wird die Funktion mit dem Zurücksetzen des FIFOs beendet, um eine Endlosschleife zu verhindern.

Das Zurücksetzen des Test-FIFOs nach Beenden der Auslese ist wichtig, da während der Auslese Daten in den FIFO geschrieben werden können, wenn er nicht voll ist. Damit ist nicht mehr sichergestellt, daß die bei der nächsten Auslese entnommenen Daten direkt nacheinander prozessiert worden sind. Nach dem Zurücksetzen des FIFOs ist die konsistente Abfolge der dann geschriebenen Daten garantiert.

Die ausgelesenen Daten werden ihrer Bedeutung nach zusammengefaßt, d. h. für den PCU-Test-FIFO in die Parameter gemäß Tabelle 3.1 unterteilt. Für den PMG- und den PMM-Test-FIFO werden die FLT-Nachrichten in die einzelnen Parameter unterteilt. Anschließend werden die Daten entweder in Dateien oder auf den Bildschirm ausgegeben. Wie bei den DPRAMs kann eine beliebige Zahl von Auslesezyklen nacheinander ausgeführt werden. Auch ein kontinuierliches Auslesen, das vom Benutzer zu beliebiger Zeit beendet werden kann, ist implementiert.

Neben der oben erwähnten unterschiedlichen Speichertiefe gibt es zwischen der Auslese der Test-FIFOs auf PCU einerseits und auf PMG oder PMM andererseits weitere Unterschiede. Der PCU-Test-FIFO kann die 16 Bits der Koinzidenzdaten in einem Wort speichern, wohingegegen die 80 Bits umfassenden FLT-Nachrichten in vier Worten mit je 20 Bits gespeichert werden müssen. In den Test-FIFOs des PMGs und des PMMs können deshalb maximal 128 FLT-Nachrichten aufgenommen werden. Ein zusätzliches

Bit markiert das erste Wort einer Nachricht, da es bei gleichzeitigem Schreiben in den Test-FIFO und seinem Zurücksetzen vorkommen kann, daß einzelne Worte der ersten Nachricht verloren gehen. Deshalb werden beim Auslesen nur Worte mit der korrekten Abfolge des zusätzlichen Bits zu einer Nachricht kombiniert. Zwei weitere Bits werden auf dem PMM hinzugefügt, um den Eingangskanal – und damit den PMG – zu bezeichnen, von dem die Nachricht stammt. Da mit einem VME-Zugriff nur 16 Bits Daten transferiert werden können, sind zur Auslese eines Wortes aus PMG- oder PMM-Test-FIFO zwei Zugriffe nötig, deren Resultate in den Treiberfunktionen kombiniert werden.

Erzeugung von Testmustern und unabhängige Tests des PMGs

Um die Funktion des PMGs ohne seine Schnittstellen testen zu können, lassen sich an seinem Eingang Testmuster erzeugen. Durch Auslesen der prozessierten FLT-Nachrichten aus dem Test-FIFO am Ausgang des PMGs kann ihre Korrektheit überprüft werden. Dieses Vorgehen dient zudem als Grundlage der Verbindungstests zwischen PMG und FLT, die in Abschnitt 4.2.5 beschrieben werden.

In der Treiberfunktion `pmg_InternalTest` werden für jede Iteration der Erzeugung von Testmustern folgende Schritte durchgeführt, die in Abbildung 4.7 veranschaulicht sind:

- Die Prozessierung des PMGs wird angehalten, indem das Signal „Run" im CPLD, der für die Kontrolle des PMGs verantwortlich ist, auf den Wert 0 gesetzt wird (① in Abbildung 4.7). Dann ist es möglich, die Test-Register zu beschreiben.
- Das DAV-Test-Register (Data Available) im CPLD, der das Protokoll der Schnittstelle zu den PCUs steuert, wird mit einem acht Bits umfassenden Wort beschrieben (②). Jedes Bit entspricht dabei einem PCU-Koinzidenzkanal, der gültige Daten an den PMG weiterzugeben hat und für den die Testmuster einer Koinzidenz erzeugt wird.
- Das Daten-Test-Register im Schnittstellen-CPLD wird mit den 16 Bits beschrieben, die den zu prozessierenden Koinzidenzdaten entsprechen (③).
- Anschließend wird der Test-FIFO zurückgesetzt, um sicherzustellen, daß nach dem Prozessieren der Testmuster ausschließlich die erzeugten FLT-Nachrichten enthalten sein werden (④).
- Um als Datenquelle des PMGs die beiden Test-Register anstatt der angeschlossenen PCUs auszuwählen, wird im Kontroll-CPLD der Test-Modus eingeschaltet (⑤).
- Die Prozessierung der Testmuster wird mit dem Setzen des „Run"-Signals auf den Wert 1 gestartet (①).
- Anschließend wird der Test-FIFO, wie zuvor ausführlich beschrieben, ausgelesen, bis er leer ist (⑥ und ⑦).

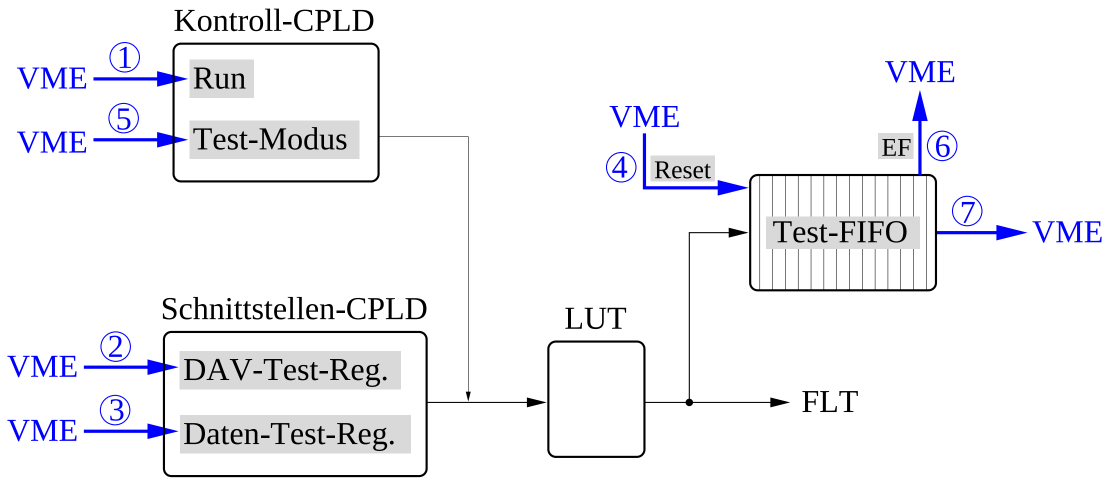

Abb. 4.7: Darstellung der unabhängigen Tests des PMGs, die auf der lokalen Erzeugung von Testmustern beruhen. Die Testmuster werden mit Hilfes des DAV- und des Daten-Test-Registers erzeugt. Die Steuerung der Funktion des PMGs erfolgt mit Hilfe der beiden Signale „Run“ und „Test-Modus“. Nach der Prozessierung der Daten, angedeutet durch die Look-up Table (LUT), können die FLT-Nachrichten aus dem Test-FIFO ausgelesen werden.

Die in FLT-Nachrichten konvertierten Daten des Test-FIFOs können auf den Bildschirm oder in eine Datei ausgegeben werden. Wenn nur Testmuster erzeugt werden sollen, ohne sie mit dem PMG-Test-FIFO zu überprüfen, kann die Ausgabe vollständig unterdrückt werden. Damit kann die Rate erzeugter Nachrichten erhöht werden, die für Tests der Verbindungen zum FLT bedeutsam ist. Sowohl eine bestimmte Anzahl von Wiederholung dieses unabhängigen Tests als auch ein kontinuierlicher Betrieb können mit der Treiberfunktion durchgeführt werden.

Zugriffe auf die Look-up Table des PMGs

Die zentrale Aufgabe des PMGs besteht aus der Übersetzung der Koinzidenzdaten in Nachrichten an den FLT. Dazu dient die Look-up Table, zu deren Adressierung 18 Bits benötigt werden und deren Datenausgang 64 Bits umfaßt. Sie besitzt also ein Speichervolumen von 2 MByte, die über VME-Zugriffe geladen werden. Für jeden PMG sind die LUT-Daten in jeweils einer Datei abgelegt.

Mit der Treiberfunktion `pmg_LoadLUT` können die Daten für bis zu drei PMGs, d. h. für die in einem Crate installierte maximale Zahl von PMGs, aus den Dateien in die LUTs geladen werden. Dafür wird zunächst die Prozessierung der PMG angehalten, indem das „Run“-Signal auf 0 gesetzt wird, und der interne Adreßzähler für die LUT wird zurückgesetzt. Die Dateien werden zeilenweise ausgelesen, wobei eine Zeile 32 Bits Daten enthält. Diese werden in zwei aufeinanderfolgenden Zugriffen in die LUT des PMGs geladen. Nach jedem Zugriff auf die obersten 16 Datenbits erhöht sich der interne Adreßzähler automatisch um eins, so daß die Daten der nächsthöheren Adresse geladen werden können. Nach dem Laden der Daten zur höchsten Adresse der LUT werden die Anzahl der aus der Datei gelesenen Zeilen und der Stand des Adreßzählers überprüft, um sicherzustellen, daß alle Daten geladen sind. Der gesamte Vorgang dauert für eine LUT etwa 25 s. Bei etwas mehr als 1.000.000 VME-Zugriffen und einer typischen Dauer von weniger als 1 μs pro VME-Zugriff dauert das Laden folglich mindestens einen Faktor 25 länger, als zu erwarten wäre. Dafür gibt es im wesentlichen zwei Ursachen, das Konvertieren der Daten von ASCII[3]-Zeichen in binäre Daten für die VME-Zugriffe und der Zugriff von der VME-CPU auf die Datei über NFS. ASCII-Zeichen sind bislang trotz der Nachteile bei der Konvertierung zum Speichern der LUT-Daten verwendet worden, da die Kompatibilität der Binärformate für verschiedene Betriebssysteme, wie Linux und LynxOS, nicht prinzipiell sichergestellt ist. Wenn dies gewährleistet werden kann, ist hier ein erster Ansatzpunkt für eine mögliche Verkürzung der Zeitdauer.

Die in der Treiberfunktion `pmg_ReadLUT` zusammengefaßten Lesezugriffe auf die LUT funktionieren analog zu den Schreibzugriffen. Das Auslesen kann auf zwei Arten erfolgen, in einem Kopier- oder einem Vergleichsmodus. Im Kopiermodus werden die Daten der LUT in Gruppen von 32 Bits zusammengefaßt und herausgeschrieben, im Vergleichsmodus werden die Daten der LUT mit einer Datei verglichen. In diesem Fall gibt `pmg_ReadLUT` die Anzahl der nicht übereinstimmenden 16-Bit-Worte zurück. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, daß die Daten der LUT korrekt geladen sind. Diese Testmöglichkeit ist wichtig, da fehlerhafte Daten zu einer falschen Bestimmung der Parameter in der FLT-Nachricht und damit letztlich zu einer Ineffizienz der FLT-Spursuche führen würden. Durchgeführte Kontrollen der LUT-Inhalte haben immer ergeben, daß sie korrekt waren.

4.1.4 Systemtestfunktionen

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Treiberfunktionen sind geeignet, die grundsätzliche Funktion einzelner Myon-Pretrigger-Module und von Minimalsystemen zu überprüfen. Bei diesen Tests können Daten mit Hilfe des Pretrigger FED Simulation Boards (PFEDS), im Koinzidenz-CPLD der PCU oder am Eingang des PMGs erzeugt werden. Zur Auslese der prozessierten Daten können die DPRAMs am Eingang der PCU, der Test-FIFO am Ausgang der PCU oder der Test-FIFO am Ausgang des PMGs ausgelesen werden. Um Fehlerraten in der Größenordung von 10 % bis 100 % detektieren zu können, ist die Darstellung der Daten aus den DPRAMs oder den Test-FIFOs auf dem Bildschirm ausreichend. Mit diesem Verfahren kann jedoch die Funktion der Hardware nicht bis zu Fehlerraten von 0,1 % oder weniger überprüft werden. Andererseits entspricht bei einer typischen Prozessierungsrate von 25 MHz eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,1 % einer Rate von 25 kHz. Fehler in dieser Größenordnung sind also nicht vernachlässigbar.

Deshalb sind Systemtestfunktionen entwickelt worden, mit denen auf der Basis der Daten der PCU- und PMG-Test-FIFOs automatisierte Tests mit hoher Statistik durchgeführt werden können. Da es verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung von Testdaten gibt und für spezielle Tests besondere Testdaten notwendig sind, sind die Systemtestfunktion davon unabhängig und basieren auf sogenannten Referenzdateien. In diesen wird das korrekte Ergebnis der Prozessierung festgehalten, wie es im PCU- oder PMG-

[3] American Standard Code for Information Interchange

Test-FIFO enthalten sein soll. Referenzdateien werden mit einem als korrekt funktionierend bekannten System, einem sogenannten Referenzsystem, erzeugt und sind unabhängig davon, welche Hardware-Module in welcher Konfiguration verwendet werden.

Erzeugen von Referenzdateien

Die grundlegende Bedingung bezüglich der Datenerzeugung bei Systemtests liegt darin, daß zu einer bestimmten BX-Nummer immer dieselben Daten generiert werden müssen. Bei einem verfügbaren Bereich von 256 BX-Nummern und bis zu fünf Koinzidenzen pro Zyklus, d. h. zehn Koinzidenzen pro BX-Nummer, bleiben dennoch ausreichend große Variationsmöglichkeiten für spezifische Tests der Hardware. Da die Systemtests auf der sich wiederholenden eindeutigen Abfolge von Daten beruhen, kann in der Regel nur ein Koinzidenzkanal betrieben werden. Bei mehreren Kanälen kann es zu kleinen Zeitdifferenzen bei der Prozessierung der Daten kommen, so daß die Abfolge nicht eindeutig bestimmt ist. Wird durch eine geeignete Erzeugung von Testdaten sichergestellt, daß es zwischen den Daten verschiedener Koinzidenkanäle einen ausreichend großen zeitlichen Abstand gibt, kann auch mehr als ein Kanal verwendet werden.

Da nur geringe Einschränkungen bezüglich der Erzeugung von Testdaten und der Konfiguration der verwendeten Hardware-Module gemacht werden, müssen für das Erstellen von Referenzdateien viele Möglichkeiten berücksichtigt werden, und es ist sehr aufwendig. Es basiert auf der Grundidee, ein Referenzsystem zu betreiben und damit aus dem Inhalt des PCU- bzw. PMG-Test-FIFOs die für das Testsystem korrekte Abfolge von Koinzidenzen bzw. FLT-Nachrichten zu ermitteln. Die maximale Periode für PCU-Systemtests beträgt 2560 Koinzidenzdaten, da pro BX-Nummer maximal zehn Koinzidenzen auftreten können. Da die Speichertiefe des PCU-Test-FIFOs 4096 Worte umfaßt, muß bei einer Auslese immer die gesamte Abfolge von Koinzidenzdaten enthalten sein.

Anhand des Flußdiagramms in Abbildung 4.8 wird im folgenden die Erzeugung der Referenzdatei für PCU-Systemtests mit der Funktion `pcu_GenerateRefFile` erläutert. Um einen definierten Startzustand herzustellen, wird der Test-FIFO zurückgesetzt. Nach einer kurzen Wartezeit wird er ausgelesen, wenn er vollständig gefüllt ist. Sollte er auch nach $n = 1.000.000$ Abfragen nicht voll sein, wird die Funktion mit einer Fehlermeldung beendet. Wegen des asynchronen Zurücksetzens des Test-FIFOs kann es bei einem kontinuierlichen Beschreiben unter Umständen zu einem fehlerhaften Wert des ersten Wortes kommen [Bec 01]. Deshalb wird vorläufig das erste Wort des PCU-Test-FIFOs ignoriert, bis eine systematische Untersuchung dieses Effektes vorliegt. Die ausgelesenen Daten werden gemäß ihrer Bedeutung umgeformt, und der Test-FIFO wird zurückgesetzt, um neue Daten aufnehmen zu können.

In den ausgelesenen Informationen wird nach einem Übergang zwischen aufeinanderfolgenden Koinzidenzdaten gesucht, bei dem die BX-Nummer abnimmt. Dies kann nur an der Stelle vorkommen, an der eine Periode endet und die nächste beginnt. An allen anderen Stellen ist die BX-Nummer konstant oder nimmt zu. Wenn ein solcher Übergang nicht gefunden wird, muß es sich um Daten handeln, bei denen nur eine BX-Nummer auftritt. Hier werden zwei Fälle unterschieden:

- Wenn zwei aufeinanderfolgende Worte des Test-FIFOs identisch sind, sind alle

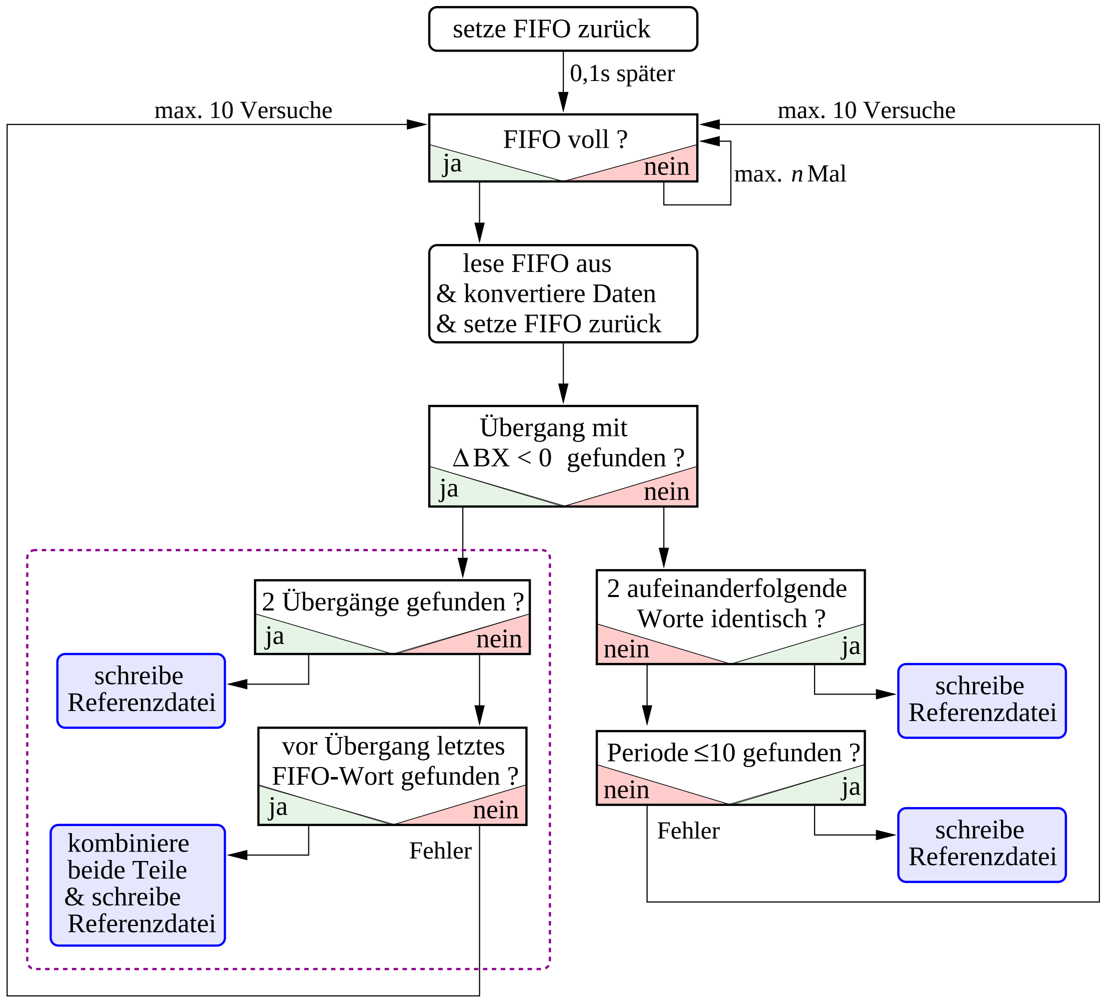

Abb. 4.8: Flußdiagramm für die Erzeugung von Referenzdateien auf Grundlage des PCU-Test-FIFOs. Aus den Daten des Test-FIFOs wird die korrekte Abfolge durch Suche nach aufeinanderfolgenden Daten mit abnehmender BX-Nummer ermittelt. Wenn der Test-FIFO auch nach $n = 1.000.000$ Abfragen nicht voll ist, wird die Funktion abgebrochen. Der eingerahmte Bereich unterscheidet sich für die Referenzdateien aus den Daten des PMG-Test-FIFOs und wird in Abbildung 4.10 dargestellt.

Koinzidenzdaten identisch. In diesem Fall besteht die Referenzdatei aus nur einer Zeile.

- Andernfalls wird nach einer Periode der Daten von höchstens 10 Worten gesucht, da dies die Maximalzahl von Koinzidenzen zu einer BX-Nummer ist. Trifft dies zu, wird die Referenzdatei erzeugt, ansonsten muß ein Fehler aufgetreten sein. Dann wird bis zu zehnmal von neuem mit der Auslese des Test-FIFOs begonnen.

Ist ein Übergang mit negativer Differenz der BX-Nummern gefunden worden, gibt es zwei Möglichkeiten, wie die Daten im Test-FIFO angeordnet sind. Dies ist in Abbildung 4.9

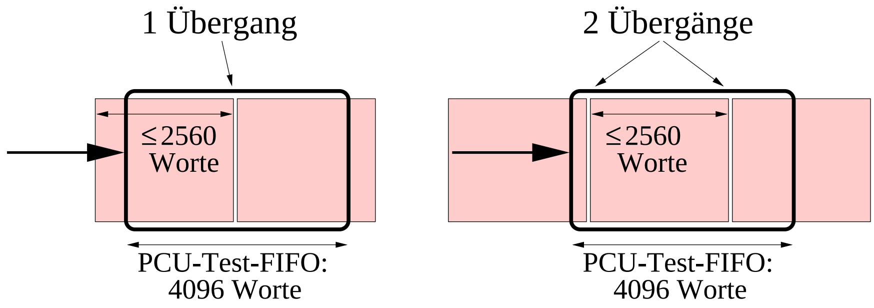

Abb. 4.9: Verhältnis zwischen Speichertiefe des PCU-Test-FIFOs und der Periode bei Systemtests. Bei einer Periode von mindestens 2048 Worten können sowohl einer als auch zwei Übergänge zwischen aufeinanderfolgenden Blöcken vorkommen.

dargestellt.

- Wird noch ein zweiter solcher Übergang gefunden, kann die Referenzdatei aus den dazwischenliegenden Daten erzeugt werden. Werden Daten mit einer Periode von weniger als der halben Speichertiefe des Test-FIFOs, d. h. von 2048 Worten, erzeugt, tritt immer ein zweiter Übergang auf.
- Bei nur einem Übergang werden zunächst die Daten vom Übergang bis zum letzten Wort des Test-FIFOs gespeichert. Dieses letzte Wort muß auch im Bereich vor dem Übergang genau einmal auftreten, da die maximale Periode von 2560 kleiner ist als die Speichertiefe von 4096 Worten. Der Bereich von diesem gefundenen Wort bis zum Übergang wird mit dem ersten Teil kombiniert und in die Referenzdatei geschrieben. Wird das Wort nicht gefunden, liegt ein Fehler vor, und die Funktion beginnt erneut mit dem Auslesen des Test-FIFOs.

Im Fall der Systemtests auf Basis von Daten des PMG-Test-FIFOs ist das prinzipielle Vorgehen, um eine Referenzdatei zu erzeugen, dasselbe. Einige Randbedingungen sind jedoch verschieden. Deshalb ist die Funktion `pmg_GenerateRefFile` komplexer als die analoge Funktion für die PCU. Da für jede Koinzidenz bis zu acht FLT-Nachrichten vom PMG erzeugt werden können, beträgt die maximal mögliche Periode bei PMG-Systemtests 20480 Nachrichten bei einer Speichertiefe des Test-FIFOs von nur 128 Nachrichten. Folglich wären mindestens 160 Auslesen des Test-FIFOs notwendig, um die Referenzdatei zu erzeugen. Hier ist eine Einschränkung der Funktionalität vorgenommen worden, die höchstens zehn Auslesen erlaubt.

Der logische Ablauf des Erzeugens einer Referenzdatei entspricht im wesentlichen dem in Abbildung 4.8 dargestellten und oben erläuterten Ablauf für die PCU. Unterschiede liegen im Zusamensetzen von je vier Worten des Test-FIFOs zu einer Nachricht und dem darauf basierenden Vergleich von Nachrichten anstelle von Koinzidenzdaten. Wenn unterschiedliche Nachrichten ausschließlich zu einer BX-Nummer auftreten, wird nach einer Periode bis zu 80 Nachrichten statt 10 Worten gesucht, da auf dem PMG pro Koinzidenz bis zu acht Nachrichten generiert werden können.

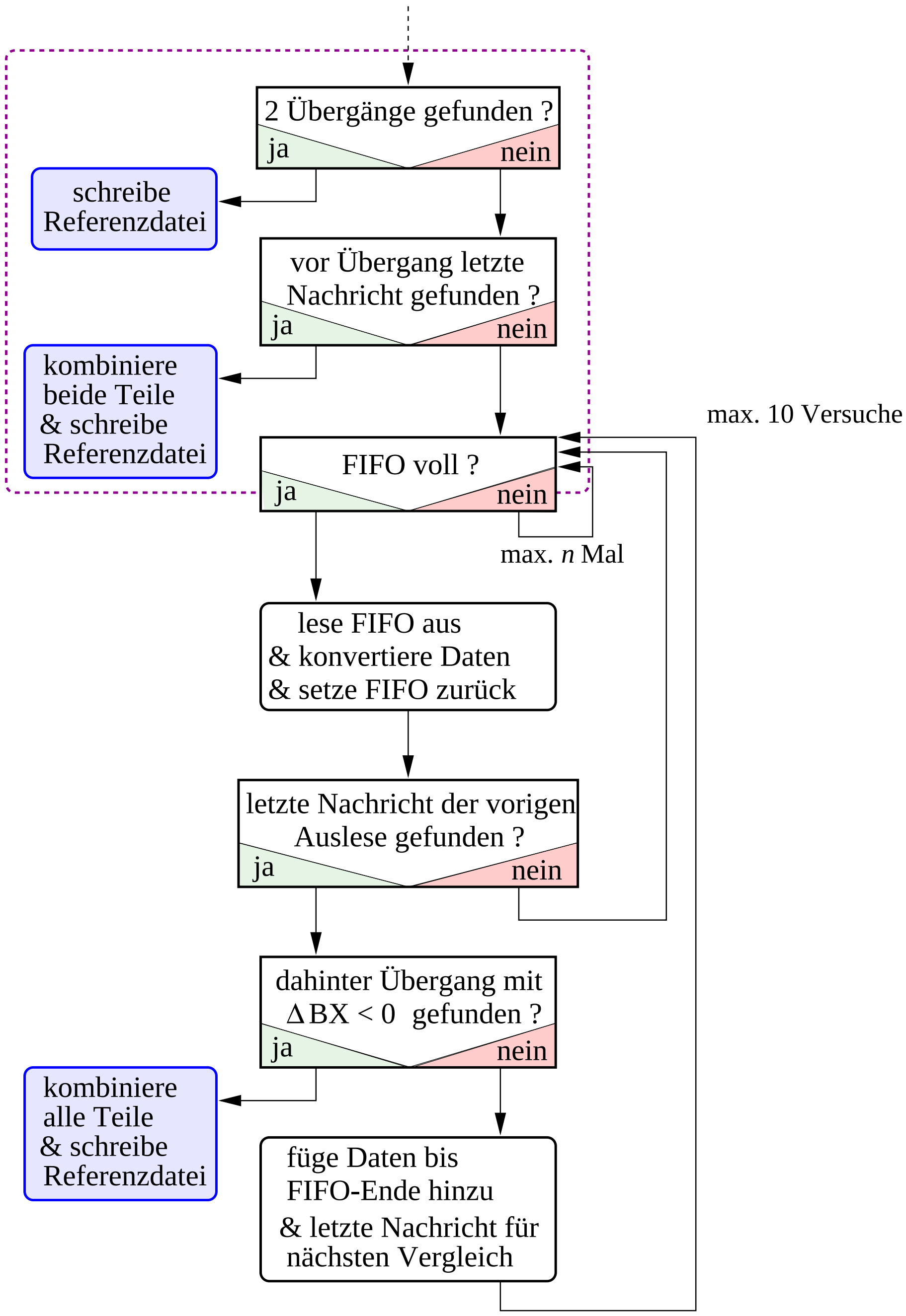

Abb. 4.10: An Abbildung 4.8 anschließendes Flußdiagramm für die Erzeugung von Referenzdateien auf Grundlage des PMG-Test-FIFOs. Der Ablauf entspricht im Prinzip dem Flußdiagramm in Abbildung 4.8. Nur der dort eingerahmte Bereich ist grundsätzlich verschieden und deshalb hier dargestellt. Im Falle eines Übergangs mit abnehmender BX-Nummer müssen weitere FIFO-Auslesen hinzugefügt und kombiniert werden, bis ein weiterer Übergang mit abnehmender BX-Nummer gefunden wird. Auch hier wird die Funktion nach $n = 1.000.000$ erfolglosen Abfragen, ob der Test-FIFO voll ist, abgebrochen.

In Abbildung 4.10 ist deshalb nur der Teil des Flußdiagramms dargestellt, der sich grundsätzlich von dem in Abbildung 4.8 unterscheidet und dort eingerahmt ist. Wenn zwei Übergänge mit abnehmender BX-Nummer gefunden werden oder bei nur einem Übergang die letzte Nachricht im FIFO vor dem Übergang gefunden wird, ist die gesamte Sequenz im Test-FIFO enthalten, und die Referenzdatei kann erstellt werden. Tritt die letzte Nachricht jedoch nicht vor dem Übergang auf, werden die Daten bis zur letzten Nachricht gespeichert und der Test-FIFO wird ein weiteres Mal ausgelesen. In den konvertierten Daten wird zuerst nach der letzten Nachricht der vorherigen Auslese gesucht. Wird sie nicht gefunden, muß der Test-FIFO erneut ausgelesen werden. Ansonsten wird im Bereich nach dieser Nachricht ein Übergang mit abnehmender BX-Nummer gesucht. Wenn dieser auftritt, werden die beiden Teile zur gesamten Sequenz kombiniert und die Referenzdatei erzeugt. Wird kein solcher Übergang gefunden, werden die Nachrichten bis zum Ende des Test-FIFOs den gespeicherten hinzugefügt, und es wird in den nächsten ausgelesenen Daten mit der Suche nach der neuen letzten Nachricht fortgefahren. Dieser Vorgang wird höchstens zehnmal wiederholt.

Ein konzeptioneller Nachteil der Durchführung von Systemtests auf der Grundlage von Referenzdateien liegt in der Voraussetzung, daß die Referenzdatei keinen Fehler enthält. Wäre dies der Fall, könnten einerseits Fehler verdeckt werden und andererseits eine korrekte Prozessierung als Fehler gewertet werden. Deshalb liegt es in der Verantwortung des Anwenders, erstellte Referenzdateien auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Die Worte in den Referenzdateien sind in hexadezimaler Form so gespeichert, wie sie im jeweiligen Test-FIFO stehen. Da die Daten in diesem Format schwer interpretierbar sind, stehen die beiden Funktionen `pxx_TranslateRefFile` (`pxx` = `pcu` oder `pmg`) zur Übersetzung dieser Daten in eine verständliche Form zur Verfügung, die somit eine Überprüfung der Richtigkeit der Referenzdateien erlauben.

Durchführen von Systemtests

Nach Erstellen der Referenzdatei kann der Systemtest durchgeführt werden, der den ausgewählten Test-FIFO wiederholt ausliest und die Daten mit der Referenzdatei vergleicht. In Abbildung 4.11 wird der genaue Ablauf für PCU-Systemtest mit einem Flußdiagramm veranschaulicht. Für PMG-Systemtests ist in der Abbildung wie in der folgenden Beschreibung nur der Begriff „Wort“ durch „Nachricht“ zu ersetzen. Nach Einlesen der Referenzdaten wird das erste gültige Wort aus dem Test-FIFO ausgelesen, sobald er vollständig gefüllt ist. Wie bereits bei der Erzeugung der Referenzdateien beschrieben, wird das erste Wort des PCU-TestFIFOs ignoriert und beim zweiten begonnen. Nach dem ausgelesenen Wort wird in der Referenzdatei gesucht. Wenn dieses Wort, etwa weil es fehlerhaft ist, nicht in der Referenzdatei gefunden wird, wird ein Zähler für nicht gefundene Startpunkte erhöht und der FIFO zurückgesetzt. Andernfalls wird der restliche Inhalt des Test-FIFOs ausgelesen.

Alle Worte werden mit der Sequenz der Referenzdatei verglichen. Bei einem Fehler können die Daten des fehlerhaften Wortes sowie des vorhergehenden und des nachfolgenden Wortes angezeigt werden. Dies erlaubt eine detaillierte Analyse der möglichen Fehlfunktion. Zudem werden die Fehler und die durchgeführten Vergleiche gezählt, um

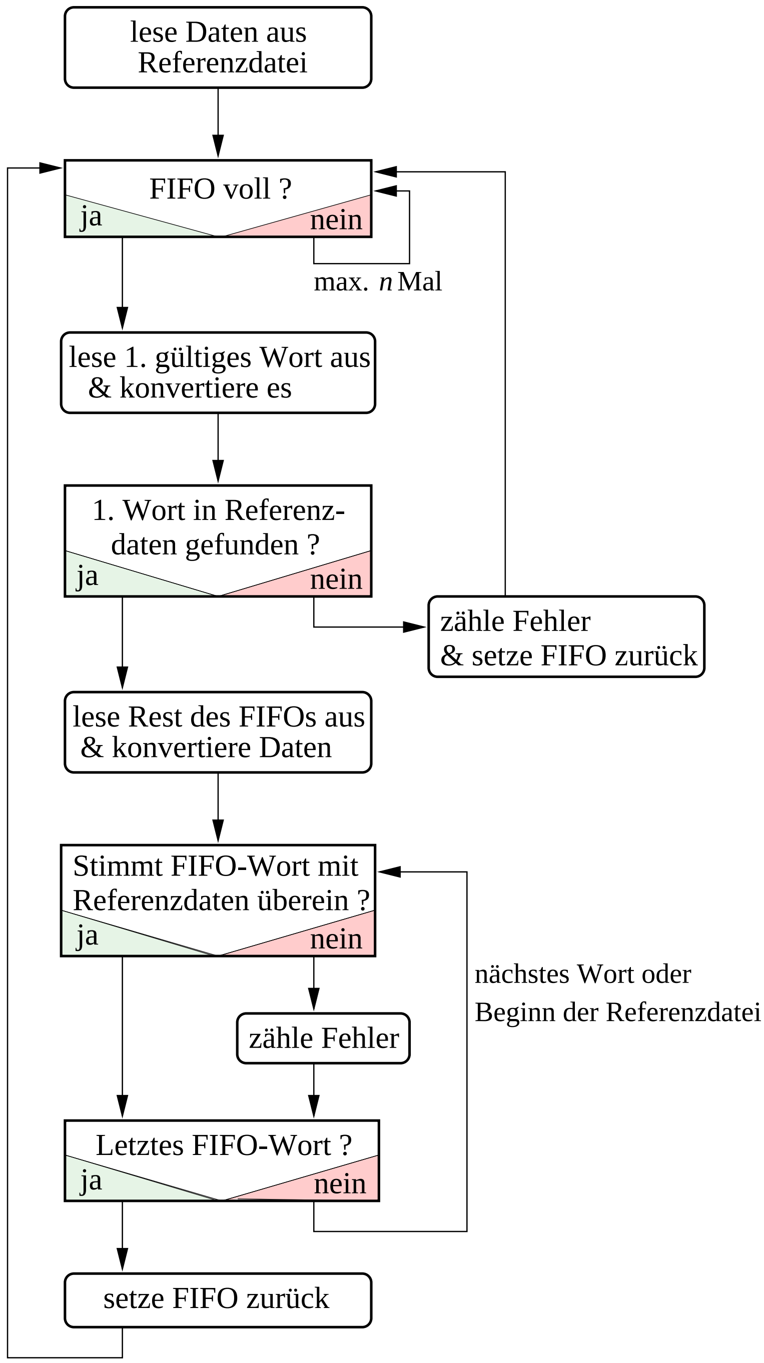

Abb. 4.11: Flußdiagramm für das Durchführen von PCU- und PMG-Systemtests. Für letztere muß der Begriff „Wort“ durch „Nachricht“ ersetzt werden. Zunächst wird das erste gültige Wort aus dem Test-FIFO in der Referenzdatei gesucht und, wenn es gefunden wird, alle weiteren Worte. Wenn der Test-FIFO auch nach $n = 1.000.000$ Abfragen nicht voll ist, wird die Funktion abgebrochen. Bei Fehlern kann der Vergleich beim folgenden Wort fortgesetzt werden oder alternativ beim Beginn der Referenzdatei.

während des Tests und am Ende statistische Angaben über die Fehlerrate machen zu können. Durch einen Parameter kann beim Aufruf von `pcu_SystemTest` bestimmt werden, ob nach einem Fehler beim folgenden Wort des Test-FIFOs fortzufahren ist oder beim ersten Wort der Referenzdaten. Wenn fehlerhaft ein zusätzliches Wort im Test-FIFO steht oder ein Wort fehlt, werden alle weiteren Worte im ersten Fall als Fehler gezählt. Dies wird verhindert, wenn – wie im zweiten Fall – an einem definierten Startpunkt fortgefahren wird.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Systemtestfunktionen haben sich für die Tests der einzelnen Hardware-Module, sowohl für Prototypen als auch für Module aus der Massenproduktion, ebenso bewährt wie für Tests von Minimalsystemen. Dank der flexiblen Implementierung konnten verschiedene Fehler in der Produktion, wie z. B. instabile Lötstellen oder defekte Bauteile, entdeckt werden. Die Systemtestfunktionen erlauben es, auch selten auftretende Fehler von der Größenordnung von 0,1 % oder kleiner zu erkennen. Somit konnte die grundsätzlich korrekte Funktionsweise der Myon-Pretrigger-Hardware bis zu Fehlerraten von kleiner etwa 10^{-7} nachgewiesen werden, wobei die Grenze aus der verfügbaren Meßzeit resultiert.

4.1.5 Die Benutzerschnittstelle `mpcon`

Die in den vorigen Abschnitten beschriebenen Treiber- und Systemtestfunktionen können mit Hilfe der Benutzerschnittstelle `mpcon` ausgeführt werden. Der Zugriff auf die Treiber- und Systemtestfunktionen, die auf der VME-CPU ausgeführt werden, erfolgt am einfachsten mit Funktionsaufrufen, wenn die Benutzerschnittstelle ebenfalls auf der VME-CPU betrieben wird. Daraus ergibt sich zwingend, daß nur die Hardware-Komponenten, die in einem Crate installiert sind, angesprochen werden können. Für Einzelkomponenten ist dies natürlich gegeben, und auch für Minimalsysteme bedeutet dies keine wesentliche Einschränkung. Auf die Entwicklung einer graphischen Oberfläche ist verzichtet worden, da `mpcon` auf der VME-CPU ausgeführt wird und deshalb möglichst wenig Rechenzeit verbrauchen soll. Zudem wird `mpcon` ausschließlich für Benutzer mit Expertenwissen über das Myon-Pretrigger-System benötigt.

Die Struktur der Benutzerschnittstelle `mpcon` [Sch 99c] ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Sie ist in Menüs für alle Hardware-Komponenten unterteilt. Innerhalb eines solchen Menüs können durch Eingaben von Ziffern alle Treiberfunktionen der jeweiligen Hardware-Komponenten ausgewählt werden. Die Parameter für den Aufruf einer Treiberfunktion werden in spezifischen Untermenüs abgefragt. Die kleinste Einheit der Hardware, auf die eine Funktion angewendet werden kann, ist entweder ein PCU-Koinzidenzkanal oder ein PFEDS, ein PMG oder ein PMM als ganzes. Die Auswahl der Einheiten erfolgt bei der PCU mit der in Abschnitt 3.3 definierten Segmentnummer (0, 1 oder 2) und dem Koinzidenzkanal (1 bis 8), beim PMG nur über die Segmentnummer, da höchstens ein PMG pro Segment installiert ist. Die Testmodule PFEDS (1 bis 3) und PMM (1 oder 2) werden numeriert. Für jede Treiberfunktion können beliebig viele Einheiten innerhalb eines Crates ausgewählt werden. Dann erfolgen die Hardware-Zugriffe auf alle Einheiten nacheinander.

Für die Ausführung weniger Zugriffe ist die Menüsteuerung gut geeignet. Bei sich oft

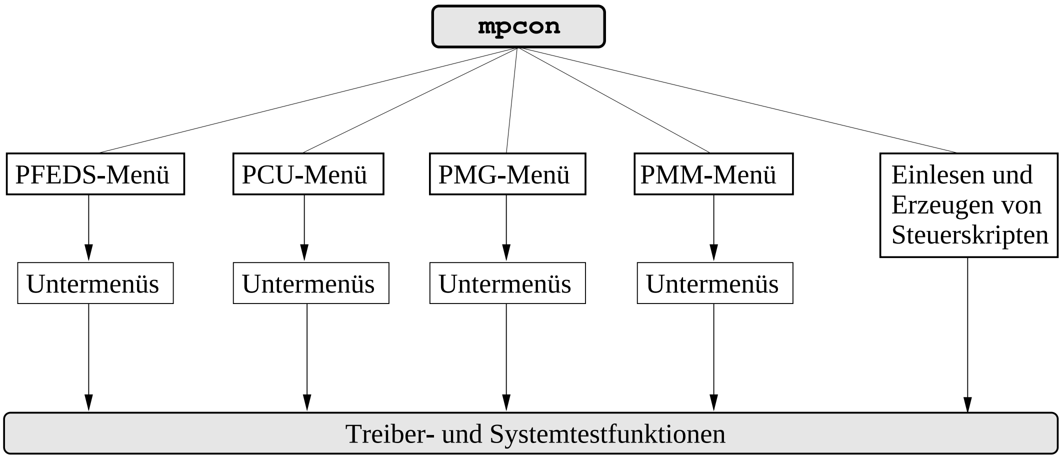

Abb. 4.12: Die Struktur der Benutzerschnittstelle `mpcon`. Sie umfaßt Menüs für jede Hardware-Komponente, die jeweils Untermenüs zur Auswahl von Parametern für die Hardware-Zugriffe besitzen. Zudem können Steuerskripte eingelesen werden oder anhand der ausgeführten Zugriffe erzeugt werden. Für die Hardware-Zugriffe werden die entsprechenden Treiber- oder Systemtestfunktionen aufgerufen.

wiederholenden längeren Abfolgen von Zugriffen wird ihre Benutzung jedoch umständlich und zeitaufwendig. Deshalb können von `mpcon` auch sogenannte Steuerskripte eingelesen und ausgeführt werden, d. h. Dateien, die auszuführende Sequenzen von Zugriffen enthalten. Dies erlaubt auch, Abfolgen von Zugriffen reproduzierbar zu wiederholen, so daß Irrtümer bei der Eingabe als Fehlerquellen ausgeschlossen werden können. Die Steuerskripte können sowohl vom Benutzer als auch automatisch beim menügesteuerten Betrieb erstellt werden. Letzteres erlaubt zudem die Buchführung über die ausgeführten Funktionen bei Verwendung der Menüs.

Bei einem Steuerskript wird die erste Zeile als Kommentar interpretiert und enthält, wenn sie von `mpcon` erzeugt worden ist, den Dateinamen, den Benutzernamen des Anwenders und das Erstellungsdatum. Die allgemeine Form eines Zugriffe gliedert sich gemäß

```
'Name der Funktion' {'Einheiten'} 'Parameter' ;
```

in drei Teile, den Namen der Treiber- oder Systemtestfunktion, die betroffenen Einheiten der Hardware und die Parameter für den Funktionsaufruf. Der Zugriff mittels

```
pcu_ReadTestFifo {s0 1 4 5 8} 1 10 pcutff_042.dat ;
```

dient etwa dazu, die PCU-Test-FIFOs von zwei in Segment 0 installierten Hauptkarten je zehnmal auszulesen und die Daten in die Datei 'pcutff_042.dat' auszugeben. Weitere syntaktische Elemente von Steuerskripten sind Pausen, in denen die Sequenz der Zugriffe unterbrochen wird, bis der Benutzer eine Eingabe tätigt, und Schleifen. Die Zugriffe innerhalb einer Schleife können beliebig oft wiederholt werden, wobei nur eine Hierarchieebene unterstützt wird. Dies reicht für die vorgesehenen Anwendungen aus.

Als Kommentare, die zur Dokumentation der Funktionalität eines Steuerskriptes dienen, werden alle Zeichen nach einem Semikolon innerhalb einer Zeile interpretiert.

Mit der geschilderten Implementierung der Benutzerschnittstelle `mpcon` für Expertenzugriffe auf die Myon-Pretrigger-Komponenten können die gestellten Anforderungen erfüllt werden. Für den Betrieb und die Tests von Einzelkomponenten und Minimalsystemen sind keine Erweiterungen der Menüsteuerung und der Steuerskripte notwendig.

4.1.6 Anpassungen für erste Datennahmen mit dem Myon-Pretrigger

Um bereits vor Erstellen der Online-Software Teile des Myon-Pretrigger-Systems im HERA – B Experiment für kurze Datennahmezeiträume zwischen Oktober und Dezember 1999 betreiben zu können, sind Anpassungen von `mpcon` und einigen Treiberfunktionen vorgenommen worden. Da die installierten Hardware-Module auf zwei Crates verteilt waren, ist eine Auswahl des Crates in der Menüsteuerung hinzugefügt worden. Um zusätzliche Informationen über den Zustand des Systems zu erhalten, können die Inhalte von Status-Registern von PCU und PMG zusätzlich zu den ausgelesenen DPRAM- und Test-FIFO-Daten ausgegeben werden. Zur Reduktion der Datenmenge ausgegebener Daten sind die DPRAM- und Test-FIFO-Daten in einem komprimierten Format herausgeschrieben worden. Aus den Auswertungen dieser Testmessungen [Hus 00, Kla 00] sind wichtige Aufschlüsse über die Funktion der Myon-Pretrigger-Hardware gewonnen worden.

Zudem haben sich aus den Schwierigkeiten, die trotz der Anpassungen der Software beim Betreiben des nur teilweise installierten Myon-Pretrigger-Systems aufgetreten sind, wichtige Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Online-Software ergeben. Die Handhabung der Steuerskripte für die Initialisierung des Systems und die Auslese von DPRAM- und Test-FIFO-Daten war umständlich und fehleranfällig. Die Offset-Werte der POL-Empfänger wurden für jede PCU in einer Datei gespeichert und die Zugriffe zu ihrer Bestimmung anschließend vom Benutzer auskommentiert, so daß diese zeitaufwendige Prozedur nur einmal und nicht bei jeder Initialisierung durchgeführt werden mußte. Bei der Maskierung problematischer Detektorbereiche mußten die Informationen über heiße Pads in das Format der PCU-Masken übersetzt werden, was insbesondere für MU4-Pads, die zu drei Koinzidenzkanälen beitragen, schwierig ist. Zudem mußten verschiedene Quellen für die Maskierung berücksichtigt werden, wie z. B. nicht installierte MU4-Randspaltenverbindungen und fehlerhafte optische Verbindungen. Bei dieser Kombination verschiedener Informationen ist es häufig zu Irrtümern gekommen. Schließlich gab es keine direkt zugänglichen Informationen über die korrekte Funktion des Systems, so daß erst nach der Datennahme eine Aussage über die Qualität der Daten möglich war. Diese Probleme sind mit der Verwendung der im folgenden beschriebenen Online-Software gelöst worden.

4.2 Die Online-Software

Viele Teile der Software zum Betrieb von Einzelkomponenten und Minimalsystemen dienen als Grundlage der Online-Software. Dies ist durch die Verwendung der gleichen Art von VME-CPUs und der Bibliotheksfunktionen für VME-Zugriffe möglich. Andererseits unterscheiden sich die Anforderungen und Randbedingungen jedoch zu einem großen Teil. So muß von der Online-Software ein System aus etwa 60 Hardware-Modulen ohne Eingriffe von Experten initialisiert und überwacht werden. Zudem tauscht das Myon-Pretrigger-System über Schnittstellen mit anderen Systemen des HERA – B Experimentes Informationen aus. Die technische Umsetzung der Schnittstellen nach außen wie auch innerhalb der Online-Software erfordert die Verwendung spezifischer Protokolle, die die Struktur der Software beeinflussen.

4.2.1 Anforderungen

Aus ihrer Aufgabenstellung ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Online-Software:

- Die Initialisierung und Steuerung von 38 PCUs und 20 PMGs muß zuverlässig und schnell durchgeführt werden, denn große Verzögerungen oder Fehler würden zu einer geringeren Effizienz der Datennahme führen.
- Die in sieben Crates installierten – und damit von sieben verschiedenen VME-CPUs gesteuerten – Hardware-Module müssen koordiniert betrieben werden.
- Die Funktion der Hardware-Module muß kontinuierlich und ohne Beeinträchtigung der Datennahme überwacht werden. Zu diesem Bereich des Monitorings gehört die Aufbereitung von Informationen sowohl für Experten wie auch Nicht-Experten, z. B. die Schichtbesatzung des HERA – B Experimentes.
- Informationen über das Myon-Pretrigger-System müssen dauerhaft in nachvollziehbarer Form gespeichert werden, um den Zustand des Systems während der Datennahme und für spätere Analysen der aufgezeichneten Daten zu jedem Zeitpunkt beurteilen zu können. Dazu werden geeignete Informationen in einer Datenbank und in Logdateien festgehalten.
- Schnittstellen zum Austausch von Informationen mit anderen Systemen müssen implementiert werden. Dabei handelt es sich um Kontrollinformationen von der Datennahmeumgebung DAQ (Data Acquisition) und vom FLT, sowie Daten, die zur Maskierung von nicht korrekt funktionierenden Datenkanälen verwendet werden.

Zur Integration in die Datennahmeumgebung des HERA – B Experimentes ist es notwendig, die für das HERA – B Experiment spezifischen Protokolle zur Kommunikation zwischen Prozessen zu verwenden. Um das Myon-Pretrigger-System innerhalb von nur etwa neun Monaten soweit integrieren zu können, daß es zuverlässig für die Datennahme verwendet werden kann, müssen zudem die bereits entwickelten Treiberfunktionen für Zugriffe auf die Hardware soweit wie möglich als Grundlage verwendet werden.

Im folgenden Abschnitt wird die Implementierung der Online-Software beschrieben [Bec 99], mit der die gestellten Anforderungen erfüllt werden.

4.2.2 Die Struktur der Online-Software

Die Struktur der Online-Software wird anhand der inhaltlichen – und auch zeitlichen – Entwicklung ihres Aufbaus dargestellt, ausgehend von der Software für Einzelkomponenten. In Abbildung 4.13 sind sieben Entwicklungsstufen bis zur aktuellen Struktur der Online-Software und die wesentlichen Veränderungen von einer Stufe zur nächsten dargestellt.

❶ Zunächst wird die Benutzerschnittstelle `mpcon`, die auf der VME-CPU ausgeführt wird, verwendet, um über Aufrufe von Treiberfunktionen auf die Hardware-Module des entsprechenden Crates zuzugreifen. In dieser Konfiguration sind, wie in Abschnitt 4.1.6 dargestellt, die ersten Datennahmen mit einem Teil des Myon-Pre-

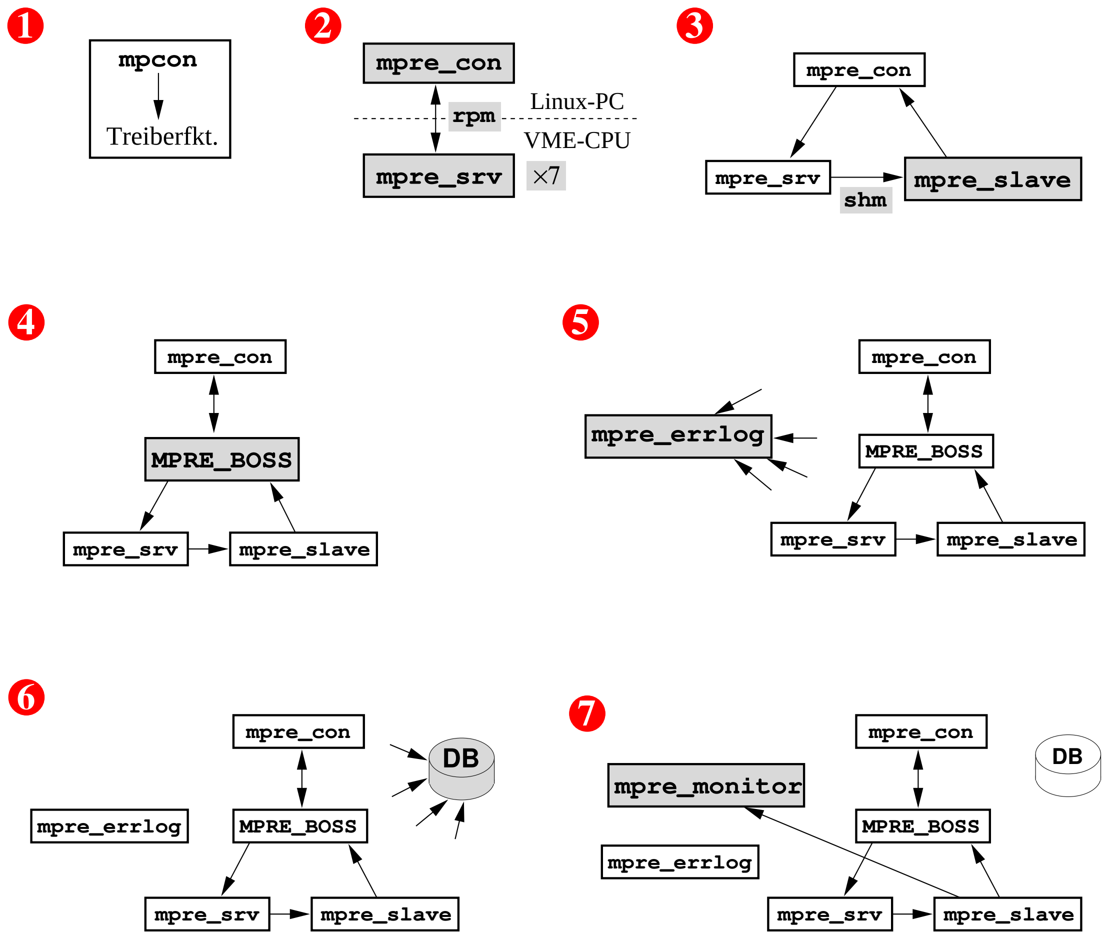

Abb. 4.13: Entwicklungsschritte des Aufbaus der Online-Software. Ausgehend von der Software für Einzelkomponenten (❶) werden neue Prozesse und die Datenbank (DB) eingeführt und die Kommunikation zwischen den Prozessen erweitert, bis zur aktuellen Struktur der Online-Software (❼). Die Erweiterungen von einer Stufe zur nächsten sind dunkel unterlegt. In dieser Darstellung sind Schnittstellen mit Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers nicht und die Kommunikation zwischen den Prozessen vereinfacht eingezeichnet.

trigger-Systems möglich gewesen. Diese Struktur der Software erlaubt jedoch keinen zuverlässigen Betrieb des Gesamtsystems ohne ständige Überwachung durch Experten.

❷ In der nächsten Entwicklungsstufe werden die Benutzerschnittstelle und die Hardware-Zugriffe getrennt. Die Treiberfunktionen werden in jeweils einem Prozeß `mpre_srv` pro VME-CPU und Crate zugänglich gemacht, während es nur eine Benutzerschnittstelle `mpre_con` gibt, mit der auf alle Hardware-Module in den sieben Crates zugegriffen werden kann. Die Kommunikation zwischen `mpre_con` und den `mpre_srv`-Prozessen erfolgt mittels des `rpm`-Protokolls (Really Powerful Messaging), dessen Grundlagen in Abschnitt 4.2.3 dargelegt werden. `mpre_con` wird auf einem Linux-PC ausgeführt, wie auch alle weiteren Prozesse, die nicht auf die Hardware-Module zugreifen.

❸ Aufgrund der Struktur des `rpm`-Protokolls treten Probleme in der Kommunikation auf, wenn das Ausführen von Zugriffen länger als etwa 2 s dauert, wie zum Beispiel beim Laden der LUTs von PMGs. Deshalb werden diese Zugriffe in den `mpre_slave`-Prozeß verlagert, der wie `mpre_srv` auf jeder VME-CPU ausgeführt wird und von `mpre_srv` gestartet wird. Die `mpre_srv`- und `mpre_slave`-Prozesse auf derselben VME-CPU kommunizieren über einen gemeinsamen Speicherbereich (engl.: Shared Memory, SHM). Für diesen Speicherbereich wird im folgenden die Bezeichnung SHM verwendet, während die Kommunikation über diesen Speicherbereich mit `shm` abgekürzt wird.

❹ Da die Hardware-Module über sieben unabhängig voneinander gesteuerte Crates verteilt sind, wird ein zentraler Prozeß benötigt, der die Funktion des gesamten Myon-Pretrigger-Systems koordiniert. Der Prozeß `MPRE_BOSS` dient als zentrale Schnittstelle für alle Zugriffe innerhalb der Online-Software und für die Kommunikation mit Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers. Auch die Kommunikation zwischen der Benutzerschnittstelle `mpre_con` und den `mpre_srv`-Prozessen erfolgt über `MPRE_BOSS`.

❺ Verschiedene Informationen über das Verhalten der Prozesse und der Hardware-Module, wie z. B. Fehlermeldungen, müssen dargestellt und dauerhaft gespeichert werden. Dies wird vom `mpre_errlog`-Prozeß ausgeführt, der unter anderem Einträge in eine Logdatei vornimmt.

❻ Die Konfiguration des Systems, sowohl der Online-Software als auch der Hardware, ist in einer Datenbank gespeichert. Dort werden auch Informationen über den Zustand des Systems festgehalten, die für spätere Datenanalysen relevant sind. Dazu gehören die Maskierung von Datenkanälen und das Verhalten der optischen Verbindungen zwischen PLB und PCU.

❼ Der Prozeß `mpre_monitor` empfängt die Monitoring-Daten der `mpre_slave`-Prozesse und stellt sie in Form von Histogrammen dar oder legt Einträge in der Datenbank und in der Logdatei an.

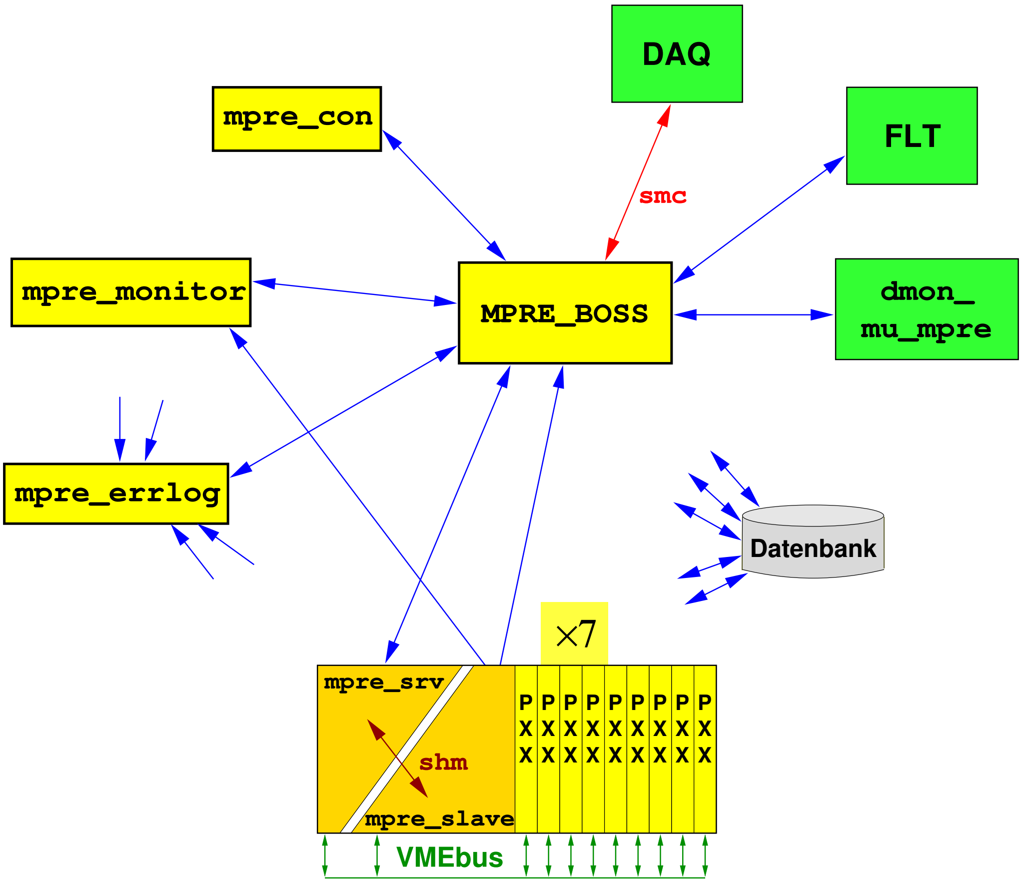

Abb. 4.14: Struktur der Online-Software und Schnittstellen mit Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers. Die Kommunikation zwischen Prozessen erfolgt mit der State Machine Control (`smc`), Shared Memory (`shm`) oder `rpm` (wenn nicht anders bezeichnet). Der Prozeß `dmon_mu_mpre` transferiert Daten zur Maskierung von Datenkanälen. Der übersichtlicheren Darstellung wegen ist nur eines von sieben Crates eingezeichnet.

Die Struktur der Online-Software sowie die Schnittstellen mit Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers ist schematisch in Abbildung 4.14 dargestellt. Es sind alle Kommunikationswege zwischen Prozessen eingezeichnet, wobei ihnen in der Regel mehrere verschiedene Arten des Austauschens von Informationen entsprechen. So können z. B. von `MPRE_BOSS` zu `mpre_srv` Anforderungen für Expertenzugriffe oder Nachrichten zum Testen der Kommunikation gesendet werden. Diese Details der Kommunikation werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Mit `MPRE_BOSS` tauschen drei Systeme außerhalb des Myon-Pretriggers Daten aus, die DAQ, der FLT und der Prozeß `dmon_mu_mpre`, der Daten für die Maskierung von Kanälen bereitstellt. Die DAQ steuert mittels der Central Run Control (CRC) die Bereitschaft aller Systeme für die Datennahme in Form von Zustandsübergängen. Anforderungen für solche Zustandsübergänge werden mit dem `smc`-Protokoll (State Machine Control) übermittelt und von `MPRE_BOSS` in die erforderlichen Zugriffe auf die Hardware-Module übersetzt. Von Prozessen des FLT werden Anforderungen, bestimmte Nachrichten zu erzeugen und an die Prozessoren des FLT zu senden, empfangen und umgesetzt.

Alternativ zu der geschilderten Struktur der Online-Software wäre auch ein Aufbau ohne einen zentralen Prozeß wie `MPRE_BOSS` denkbar. In diesem Fall erfolgt die Kommunikation mit der DAQ direkt mit den sieben `mpre_srv`-Prozessen. Dies macht die komplexe Kontrolle des Zustands der Hardware-Module durch `MPRE_BOSS` überflüssig, da das Ausführen der Zustandsübergänge direkt von der Central Run Control überwacht wird. Fehlt jedoch die zentrale Stelle, an der Informationen über das gesamte System vorliegen, wird die Kommunikation mit anderen Prozessen außerhalb des Myon-Pretriggers wesentlich aufwendiger. Wenn etwa FLT-Prozesse das Erzeugen von FLT-Nachrichten anfordern, müßte ihnen bekannt sein, welcher `mpre_srv`-Prozeß einen bestimmten PMG kontrolliert. Um einer Kapselung von internen Informationen willen ist deshalb der Struktur mit einem zentralen Prozeß der Vorzug gegeben worden.

4.2.3 Das `rpm`-Protokoll

Wie in Abbildung 4.14 dargestellt ist, gibt es zwischen den Prozessen der Online-Software drei verschiedene Kommunikationsprotokolle, `rpm`, `smc` und `shm`, wobei das `smc`-Protokoll auf `rpm` basiert. Da der weitaus größte Teil des Informationsaustausches mit `rpm`-Nachrichten erfolgt und die Struktur dieses Protokolls großen Einfluß auf den Aufbau der Online-Software besitzt, werden seine Grundlagen im folgenden dargestellt [Leg 98].

`rpm` basiert auf dem Netzwerkprotokoll TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Es kann sowohl zur Kommunikation mit UNIX-Prozessen dienen, aber auch mit Plattformen ohne Betriebssystem, wie z. B. den digitalen Signalprozessoren, die unter anderem für die Event Control (EVC) im HERA − B Experiment verwendet werden. Dies erfordert spezielle Anpassungen, unter anderem bezüglich der Anordnung übertragener Daten in Bytes und der Behandlung von Fließkommazahlen. `rpm` ist nach dem Client-Server-Modell aufgebaut, wobei ein Client ein Prozeß ist, der Dienste anfragt, die ein Server-Prozeß zur Verfügung stellt. Dienste können z. B. Informationen oder das Ausführen bestimmter Zugriffe sein. Um die Dienste eines Servers für beliebig viele Clients verfügbar zu machen, muß der Server für sie zugänglich sein. Die Adresse, unter der ein Server erreichbar ist, wird ihm zugeteilt und ist veränderlich, wenn der Server-Prozeß neu gestartet wird. Deshalb verwenden die Clients für ihre Anfragen einen unveränderlichen Namen, unter dem sich der Server bei einem Name-Server registriert hat. Die Clients wenden sich nun an den Name-Server, der ihnen die zu dem Namen des Servers gehörende Adresse mitteilt.

In Abbildung 4.15 ist der Ablauf der grundlegenden `rpm`-Kommunikation basierend auf der Funktion `rpm_request` dargestellt. Zunächst initialisieren sowohl Client als auch Server lokale Kopien sogenannter Message Handler für die Handhabung des `rpm`-Protokolls (`rpm_init` in Abbildung 4.15) und vereinbaren die Formate aller Nachrichten, die ausgetauscht werden können (`rpm_add_def`). Die Formate werden in Form von Strukturen in der Programmiersprache C definiert. Die Kommunikation wird durch einen Aufruf von `rpm_open` ermöglicht, wobei sich der Server im Gegensatz zum Client unter seinem Namen beim Name-Server registriert (`RPM_REGISTER`). Der Server stellt dann seine Dien-

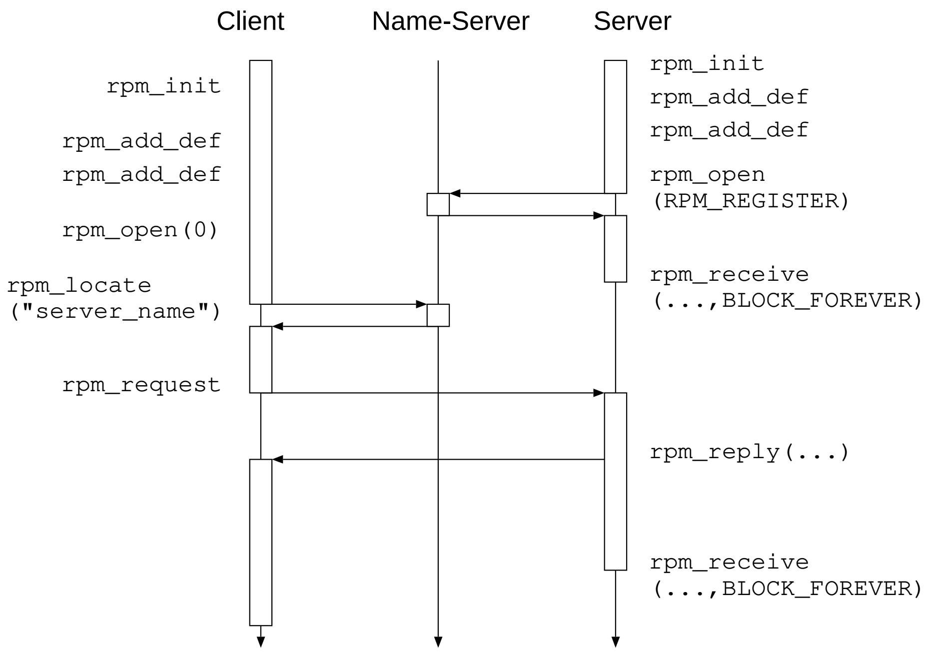

Abb. 4.15: Ablauf der Client-Server-Kommunikation basierend auf der Funktion `rpm_request` [Leg 98]. Die Ebene der lokalen Message Handler ist vereinfachend nicht eingezeichnet. Die Zeit schreitet nach unten hin fort.

ste zur Verfügung, indem er mit einem Aufruf von `rpm_receive` entweder überprüft, ob in diesem Moment eine Anfrage eines Clients vorliegt, oder auf eine Anfrage wartet. Die Prozesse der Online-Software, die als `rpm`-Server implementiert sind, warten auf Anfragen, wobei zwei Modi zu unterscheiden sind: Bei Angabe des Argumentes `BLOCK_FOREVER` wartet der Server, bis eine Anfrage eintrifft, ist also währenddessen blockiert. Dagegen wird im Modus `BLOCK_TIL_TIMEOUT` nur bis zum Ablauf einer einstellbaren Wartezeit, einem sogenannten Timeout, auf eine Anfrage gewartet und dann mit dem Programmablauf fortgefahren. Um die Dienste eines Servers in Anspruch nehmen zu können, fragt ein Client beim Name-Server mittels `rpm_locate` nach der Adresse, die zum Namen des Servers gehört. Daraufhin richtet er eine Anfrage in einem der vereinbarten Nachrichtenformate an die Adresse des Servers (`rpm_request`). Bis zu einer Antwort oder dem Auftreten eines Timeouts ist der Client blockiert. Der Server reagiert auf die Anfrage mit `rpm_reply`, das z. B. angeforderte Informationen, eine Bestätigung oder eine Fehlermeldung bei einer Anfrage nach dem Ausführen bestimmter Zugriffe enthalten kann.

Da die maximale Länge einer `rpm`-Nachricht auf etwa 1,4 kByte beschränkt ist, muß für den Transfer größerer Datenmengen auf ein anderes Schema zurückgegriffen werden. Der Ablauf dieser Kommunikation mittels `rpm_flood` ist in Abbildung 4.16 schematisch dargestellt. Die Initialisierung bis zur Nachfrage der Server-Adresse durch den Client mit `rpm_locate` verläuft analog zur Kommunkation, die auf `rpm_request` basiert. Der Client richtet seine Anfrage, die in diesem Fall in der Übermittlung einer Datenmenge von mehr als 1,4 kByte liegt, mit `rpm_flood` an den Server. Diese Nachricht enthält die insgesamt zu übertragende Datenmenge und fordert die Zuteilung eines entsprechend

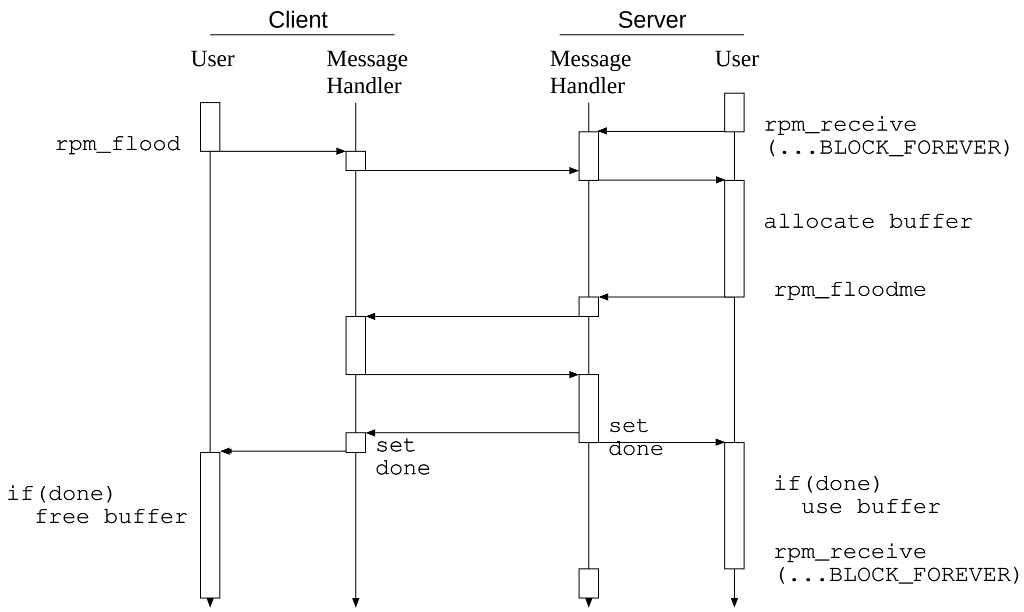

Abb. 4.16: Ablauf der Client-Server-Kommunikation zum Transfer großer Datenmengen basierend auf der Funktion `rpm_flood`; nach [Leg 98]. Die Ebene der lokalen Message Handler ist auf Client- und Server-Seite eingezeichnet. Die Zeit schreitet nach unten hin fort.

großen Speicherbereichs auf Server-Seite an (`allocate buffer` in Abbildung 4.16). Sobald dieser reserviert ist, antwortet der Server mit `rpm_floodme`, woraufhin die Daten asynchron vom Message Handler des Clients zu dem des Servers transferiert werden. Nach dem Übertragen aller Daten wird auf beiden Seiten eine Variable gesetzt, die dies anzeigt (`done`), so daß der Speicherbereich auf Client-Seite freigegeben werden, der Server die Daten verarbeiten und schließlich seine Dienste wieder zur Verfügung stellen kann.

In Tabelle 4.1 wird die Funktion der Prozesse der Online-Software als `rpm`-Clients und `rpm`-Server gezeigt, sowie der jeweilige Modus, in dem Client bzw. Server implementiert sind. `mpre_srv` und `MPRE_BOSS` sind in erster Linie Server-Prozesse, die durch Timeouts unterbrochen werden müssen, da sie regelmäßige Kontrollfunktionen zu erfüllen haben. Sie können auch kurzzeitig als `rpm`-Client Anfragen an andere Server richten. `mpre_slave` ist ein reiner Client, der zur Übertragung von Monitoring-Daten auch `rpm_flood` verwendet. Da `MPRE_BOSS` diese Daten teilweise weiterleitet, wird dieses Protokoll auch hier angewendet. Nur in Ausnahmefällen übertragen die Server-Prozesse `mpre_monitor` und `mpre_errlog` Daten als Client. Umgekehrt wird der Client-Prozeß `mpre_con` nur beim Empfang großer Datenmengen aus Test-FIFO- und DPRAM-Auslesen zum Server. Weitere Details hierzu finden sich in den folgenden Abschnitten, in denen die Funktion der verschiedenen Prozesse und ihre Kommunikation beschrieben werden.

Tab. 4.1: Funktion der Prozesse der Online-Software als rpm-Clients und rpm-Server. Für Server ist der Blockiermodus in rpm_receive, für Clients die Art der rpm-Kommunikation angegeben.

Prozeß	Typ	Modus
mpre_srv	1. Server 2. Client	BLOCK_TIL_TIMEOUT rpm_request
mpre_slave	Client	rpm_request & rpm_flood
MPRE_BOSS	1. Server 2. Client	BLOCK_TIL_TIMEOUT rpm_request & rpm_flood
mpre_monitor	1. Server 2. Client	BLOCK_FOREVER rpm_request
mpre_errlog	1. Server 2. Client	BLOCK_FOREVER rpm_request
mpre_con	1. Client 2. Server	rpm_request BLOCK_FOREVER

4.2.4 Die Prozesse mpre_srv und mpre_slave

Die beiden Prozesse mpre_srv und mpre_slave werden in diesem Abschnitt gemeinsam beschrieben, da sie eng miteinander verbunden sind. Sie werden im Gegensatz zu den anderen Prozessen der Online-Software auf einer VME-CPU betrieben. Sie führen alle Zugriffe auf die Myon-Pretrigger-Hardware aus, kommunizieren über einen gemeinsamen Speicherbereich, und mpre_slave wird von mpre_srv gestartet. Die zentrale Aufgabe von mpre_srv liegt darin, als Server-Prozeß für alle Zugriffe auf die Hardware-Module zu dienen, die in einem Crate installiert sind. Da er als Server für Anfragen von Clients praktisch jederzeit erreichbar sein muß, führt er nur diejenigen Zugriffe selbst aus, die eine Zeit von weniger als etwa 1 s in Anspruch nehmen. Alle länger dauernden Zugriffe werden an den mpre_slave-Prozeß weitergegeben und von ihm ausgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Implementierung von mpre_slave und der Kommunikation über SHM findet sich in [Bec 01].

Der Prozeß mpre_srv

In Abbildung 4.17 ist die Funktionsweise des mpre_srv-Prozesses in Form eines Flußdiagramms dargestellt. Nach dem Starten des Prozesses erfolgt zunächst die Initialisierung der rpm-Server-Funktionalität. Dazu gehört auch die eindeutige Benennung des Prozesses, um Zugriffe von Clients zu ermöglichen. Zur Unterscheidung zwischen den Prozessen auf verschiedenen VME-CPUs wird an „mpre_srv“ die Nummer des zugehörigen VME-Crates angehängt, d. h. die Prozesse registrieren sich als mpre_srv1 bis mpre_srv7 beim Name-Server. Die Zuordnung zwischen dem Namen der VME-CPU und der Crate-Nummer wird dabei der Datenbank entnommen. Nach der rpm-Initialisierung wird eine Nachricht an MPRE_BOSS gesendet, um diesen zu informieren, daß der mpre_srv-Prozeß

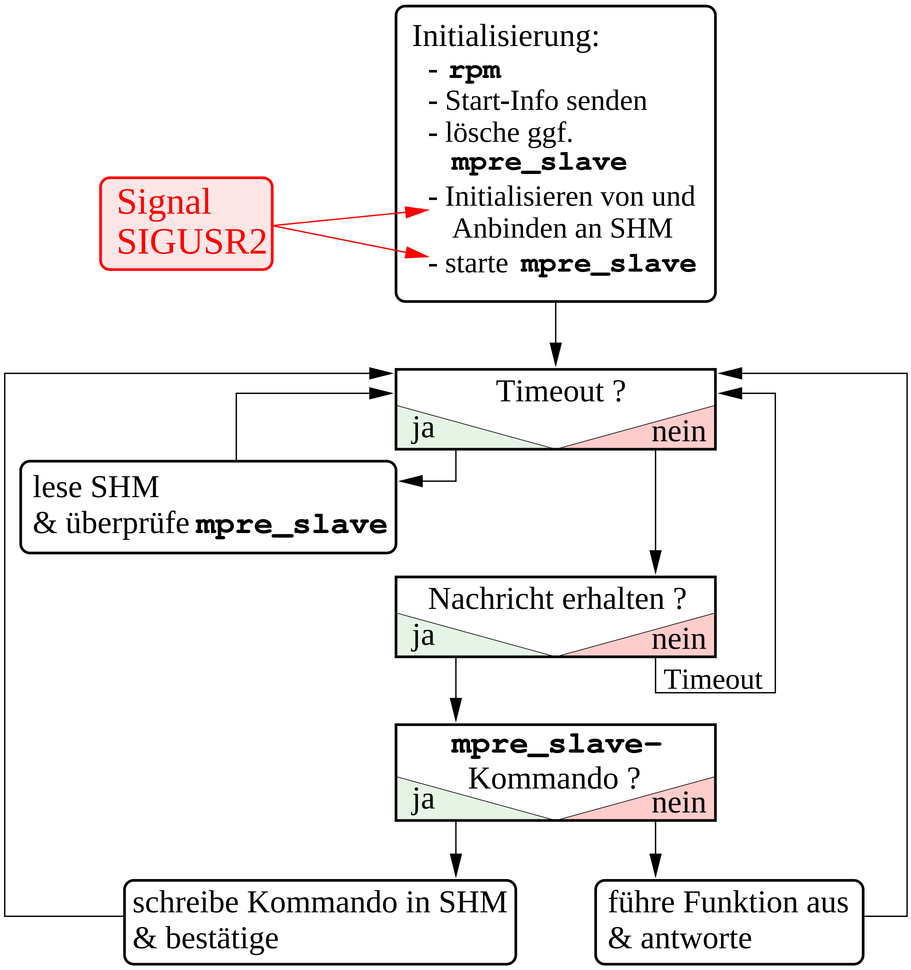

Abb. 4.17: Flußdiagramm der Funktion des `mpre_srv`-Prozesses. Nach der Initialisierung wartet `mpre_srv` auf Anforderungen, die entweder bearbeitet oder an `mpre_slave` weitergegeben werden. Zusätzlich führt `mpre_srv`, wenn ein Timeout eintritt, Kontrollfunktionen für das SHM und `mpre_slave` aus.

gestartet worden ist. Alle Prozesse der Online-Software senden nach dem Starten und vor dem Beenden eine entsprechende `rpm`-Nachricht, damit `MPRE_BOSS` z. B. auf den Absturz eines Prozesses reagieren kann. Darauf wird bei der Beschreibung von `MPRE_BOSS` in Abschnitt 4.2.5 näher eingegangen werden.

Schließlich wird der Speicherbereich, der zur Kommunikation mit `mpre_slave` dient, initialisiert und `mpre_slave` gestartet. Zunächst wird überprüft, ob `mpre_slave`-Prozesse existieren, die nicht korrekt beendet worden sind. Mit Hilfe der Eintragungen in einer sogenannten ID-Datei können `mpre_slave`-Prozesse beendet und die zugehörigen SHM-Segmente gelöscht werden. Würde diese Überprüfung nicht vorgenommen, könnte der verfügbare Speicherbereich der VME-CPU durch fehlerhaft nicht gelöschte SHM-Segmente reduziert werden. Im nächsten Schritt wird das SHM initialisiert. Dazu werden zwei Speicherbereiche erstellt und an `mpre_srv` angebunden, ein Anfrage-Segment für die Kommunikation von `mpre_srv` zu `mpre_slave` und ein Antwort-Segment für die

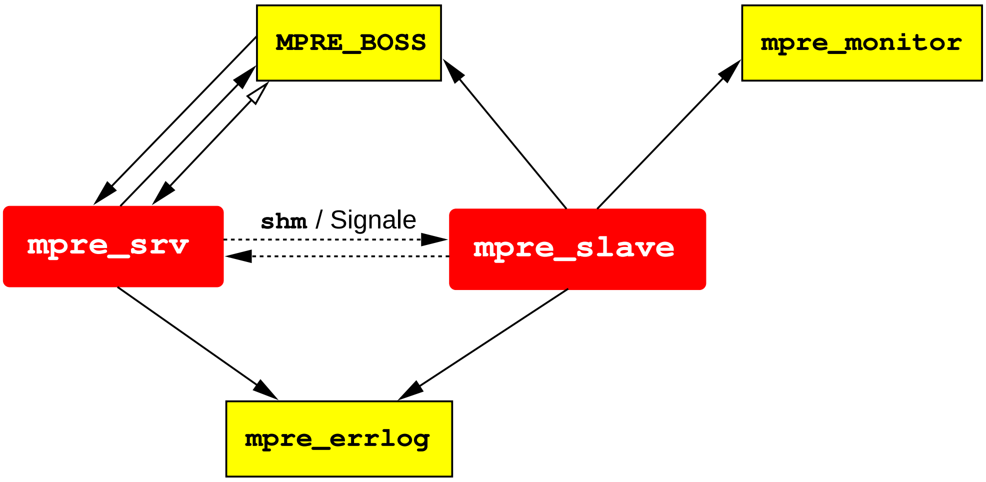

Abb. 4.18: Kommunikation von `mpre_srv` und `mpre_slave` mit anderen Prozessen mittels `rpm` und miteinander über `shm` und Signale zur Inter-Prozeß-Kommunikation. Einfache Pfeile bezeichnen eine Client-Server-Kommunikation, bei der als Antwort nur eine Bestätigung gesendet wird. Doppelpfeile stehen für Anforderungen, deren Antworten Informationen enthalten, wobei die offene Pfeilspitze auf den Client weist.

umgekehrte Kommunikationsrichtung. Zusätzlich werden für die beiden Segmente Semaphore erstellt, mit deren Hilfe die Zugriffe auf ein SHM-Segment koordiniert werden. Als Semaphor wird eine Variable bezeichnet, deren Wert beim Eintritt in einen kritischen Programmabschnitt dekrementiert und beim Verlassen wieder inkrementiert wird (z. B. nach [Her 96]), wobei der „kritische Programmabschnitt“ in diesem Fall ein Zugriff auf ein SHM-Segment ist. Danach startet `mpre_srv` mit der Funktion `fork` den Prozeß `mpre_slave`. Mit Hilfe des Signals zur Inter-Prozeß-Kommunikation `SIGUSR2` kann `mpre_slave` in Ausnahmesituationen dafür sorgen, daß `mpre_srv` das SHM neu initialisiert und `mpre_slave` neu startet. Dies geschieht etwa, wenn der Prozeß aufgrund einer ungültigen VME-Adresse oder einer Speicherverletzung abstürzt. Mit Hilfe sogenannter Signal-Handler wird in diesem Fall vor Beenden des Prozesses eine Funktion ausgeführt, die das Signal sendet.

Nach Abschluß der Initialisierungen beginnt die Funktion als `rpm`-Server. `mpre_srv` wartet auf Nachrichten von Clients und führt die Anfragen aus, wenn es sich um Expertenzugriffe handelt, die weniger als etwa 1 s dauern. In diesem Fall besteht die Antwort aus einer Bestätigung oder aus Rückgabewerten, wie z. B. den ausgelesenen Werten eines Registers. Auch die länger dauernden Funktionen, die zum Test der Verbindungen mit dem FLT implementiert sind, werden von `mpre_srv` ausgeführt. Sie werden nur außerhalb der Datennahme verwendet, wenn die ständige Erreichbarkeit von `mpre_srv` nicht von entscheidender Bedeutung ist. Diese Testroutinen werden in Abschnitt 4.2.5 beschrieben. Funktionen, die von `mpre_slave` ausgeführt werden müssen, werden von `mpre_srv` in das SHM übertragen, und dem anfordernden Client-Prozeß wird mit einer Bestätigung hierfür geantwortet. Wie aus der Darstellung der Kommunikation von mpre_srv mit anderen Prozessen in Abildung 4.18 ersichtlich ist, agiert mpre_srv in zwei Fällen als rpm-Client: wenn das Starten und Stoppen des Prozesses MPRE_BOSS mitgeteilt wird und bei Nachrichten an mpre_errlog, wie z. B. Fehlermeldungen. Anfragen werden ausschließlich von MPRE_BOSS gestellt, der auch Expertenzugriffe von der Benutzerschnittstelle mpre_con weiterleitet.

Neben der Funktion als Server-Prozeß für die Zugriffe innerhalb eines Crates führt mpre_srv regelmäßige Kontrollfunktionen des SHM und von mpre_slave aus, um deren korrekte Funktion sicherzustellen. Dazu sind zwei verschiedene Modi für Timeouts vorgesehen, bei deren Auftreten mpre_srv die notwendigen Kontrollen durchführt. Einerseits kommt es nach 120 s, in denen keine Nachricht eintrifft, zu einem Timeout. Dies wird mit dem BLOCK_TIL_TIMEOUT-Modus von rpm_receive sichergestellt. Wenn jedoch regelmäßig rpm-Nachrichten in Zeitabständen eintreffen, die kürzer als 120 s sind, tritt dieser Timeout nicht auf. Um zu gewährleisten, daß dennoch eine Kontrolle der Funktion des SHM und von mpre_slave durchgeführt wird, ist ein zusätzlicher Timeout-Modus implementiert. Er tritt auf, wenn nach 180 s kein anderer Timeout erfolgt ist.

Die SHM-Schnittstelle

Für die Schnittstelle zwischen mpre_srv und mpre_slave wird, im Gegensatz zur Kommunikation zwischen allen anderen Prozessen der Online-Software, nicht das rpm-Protokoll verwendet. Bei der Kommunikation zwischen drei Prozessen kann es, wenn ein Client-Server-Protokoll wie rpm verwendet wird und die beteiligten Prozesse sowohl Client als auch Server sein müssen, zu einem Ringschluß kommen. Diese Situation wird anhand von Abbildung 4.19 erläutert. Erfordert eine Anfrage eines Prozesses mpre_xyz an mpre_srv eine Antwort, für die zuerst Informationen von mpre_slave benötigt werden, kann mpre_srv nicht sofort antworten. Tritt dann zusätzlich der Fall ein, daß mpre_slave

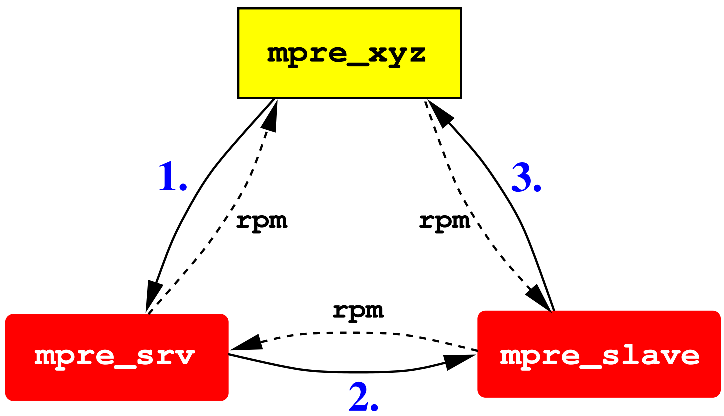

Abb. 4.19: Darstellung der möglichen Blockierung der Schnittstelle zwischen mpre_srv und mpre_slave bei Verwendung des rpm-Protokolls. Wenn für die Beantwortung der dargestellten Anforderung eines Prozesses mpre_xyz (1.) mpre_srv eine Nachricht an mpre_slave schicken muß (2.) und zu deren Beantwortung mpre_slave bei mpre_xyz anfragen muß (3.), kommt es zu einem Ringschluß.

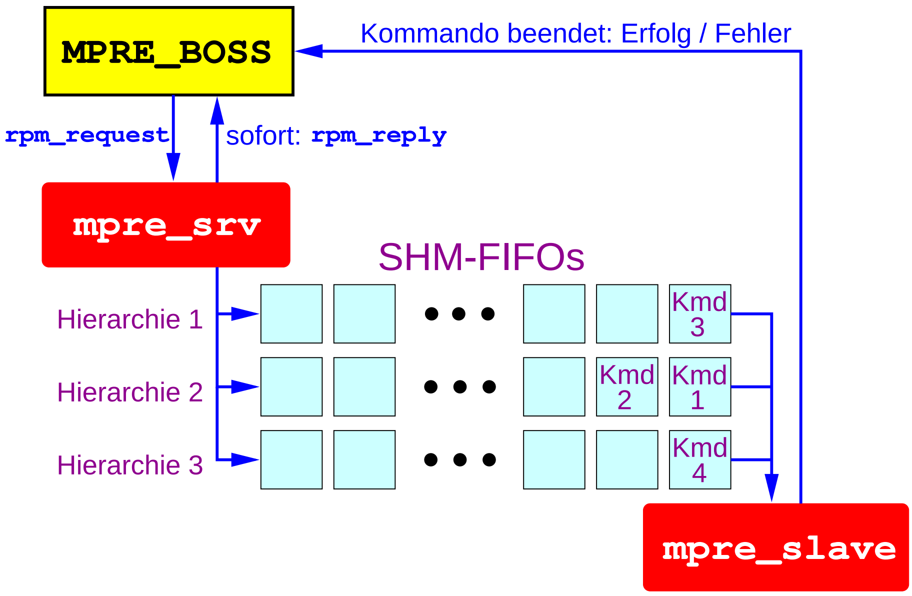

Abb. 4.20: Struktur des Anforderungs-Segmentes im SHM. Für länger dauernde Zugriffe antwortet `mpre_srv` mit einer Bestätigung auf die Anfrage von `MPRE_BOSS`. Gemäß ihrer Hierarchie werden die Kommandos (Kmd1 bis Kmd4) in ihrer zeitlichen Reihenfolge in dem entsprechenden SHM-FIFO abgelegt. Von dort werden sie von `mpre_slave` entnommen und ausgeführt. Das Ergebnis wird `MPRE_BOSS` mitgeteilt. Für die drei Hierarchiestufen beträgt die FIFO-Tiefe jeweils 20 Kommandos.

für die Beantwortung dieser Nachricht Informationen von `mpre_xyz` benötigt, sind die drei Prozesse blockiert und die Kommunikation schlägt fehl. Aus diesem Grund ist die Schnittstelle zwischen `mpre_srv` und `mpre_slave` so aufgebaut, daß einer der Prozesse dem anderen Daten übermittelt, ohne auf eine Antwort zu warten. Für die beiden Kommunikationsrichtungen gibt es getrennte Segmente des SHM, das Anfrage- und das Antwort-Segment. In der aktuellen Struktur der Online-Software wird fast ausschließlich das Anfrage-Segment verwendet, da in der Regel Daten von `mpre_srv` zu `mpre_slave` transferiert werden. Im Antwortsegment legt `mpre_slave` Informationen über die Kommandos ab, die er gerade bearbeitet. Diese Informationen werden von `mpre_srv` nur auf eine Anfrage von `MPRE_BOSS` hin ausgelesen. Der gleichzeitige schreibende und lesende Zugriff auf dasselbe SHM-Segment wird mit Hilfe jeweils eines Semaphors verhindert. Diese Variablen zeigen an, ob auf ein Segment zugegriffen wird, so daß in diesem Fall Zugriffe des anderen Prozesses blockiert werden können. Die Blockierung des SHM-Segments dauert nur so lange, bis der Lese- oder Schreibzugriff abgeschlossen ist. Untersuchungen haben gezeigt, daß dieser Vorgang $t = (54{,}7 \pm 1{,}7)\,\mu\mathrm{s}$ in Anspruch nimmt [Bec 01].

Das Anforderungs-Segment des SHM besitzt die Struktur von FIFOs mit verschiedenen Hierarchiestufen, wie in Abbildung 4.20 schematisch dargestellt ist. Da die Zugriffe, die von `mpre_slave` ausgeführt werden, länger dauern und während des Ausführens bereits weitere Anforderungen eintreffen können, müssen diese in ihrer zeitlichen Reihenfolge gespeichert werden. Dies geschieht mit einer FIFO-Struktur, in der für jede Anforderung alle notwendigen Informationen enthalten sind, damit `mpre_slave` den Zugriff durchführen kann. Da bestimmte Anforderungen, wie etwa Kommandos, die für die Central Run Control auszuführen sind, wichtiger sind als andere, werden verschiedene Hierarchien von SHM-FIFOs implementiert. `mpre_slave` entnimmt immer dem FIFO der höchsten Hierarchie das Kommando, das am längsten zur Ausführung ansteht. So wird gewährleistet, daß wichtige Anforderungen schnellstmöglichst bearbeitet werden. Wenn bei der Ausführung verschiedener Zugriffe ihre Reihenfolge von Bedeutung ist, können sie nacheinander, mit der gleichen Hierarchiestufe versehen, angefordert werden. Da ihre Abfolge im SHM-FIFO erhalten bleibt, führt `mpre_slave` die Aufgaben in der richtigen Reihenfolge durch. Im Betrieb der Online-Software hat sich eine Wahl von drei Hierarchiestufen und eine Tiefe der FIFOs von 20 Kommandos als ausreichend erwiesen. Beide Parameter können bei Bedarf verändert werden.

Der Prozeß `mpre_slave`

Nachdem der `mpre_slave`-Prozeß von `mpre_srv` gestartet wird, werden Initialisierungen – vor allem der `rpm`-Kommunikation – vorgenommen, und die Anbindung an die beiden Segmente des SHM wird vollzogen. Die Zugriffe auf die Hardware-Module sind erst möglich, sobald `mpre_srv` und `mpre_slave` gestartet und mit dem SHM verbunden sind. Deshalb registriert sich jeder `mpre_slave`-Prozeß nach der Anbindung an das SHM pro forma als `rpm`-Server, obwohl er ein reiner Client-Prozeß bleibt und nicht auf Anfragen antwortet. Dies erlaubt jedoch allen anderen Prozessen, durch eine Nachfrage beim Name-Server nachzuprüfen, ob Zugriffe auf die Hardware-Module möglich sind.

Von `mpre_slave` werden alle diejenigen Zugriffe ausgeführt, die länger als etwa 1 s dauern. Dies sind die Auslesen der DPRAMs der PCU und der Test-FIFOs sowie das Laden und Zurücklesen der LUTs des PMGs. Diese Funktionen basieren auf den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Treiberfunktionen. Die Funktionen zum Auslesen von DPRAMs und Test-FIFOs sind soweit modifiziert worden, daß die Daten in `rpm`-Nachrichten an `MPRE_BOSS` geschickt werden, der sie an `mpre_con` weiterleitet. Hierzu wird wegen der großen Datenmengen das auf der Funktion `rpm_flood` basierende Protokoll verwendet.

Auch Monitoring-Funktionen werden von `mpre_slave` ausgeführt. Wie in Abbildung 4.21 dargestellt, basieren sie auf den Signalen, die den Zustand der optischen Verbindungen angeben, und auf der Auslese der beiden Zähler für jeden PCU-Koinzidenzkanal und von Test-FIFOs. Die Grundlage bilden auch hier die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Treiberfunktionen. Für jede optische Verbindung des Systems wird alle 5 s der Wert des LinkOK-Signals ausgelesen und, wenn die Verbindung nicht funktioniert, wird sie zurückgesetzt und neu gestartet. Um statistische Schwankungen zu verringern, werden die Werte über einen Zeitraum von 1 Minute gemittelt und dann an `mpre_monitor` gesendet. Alle 10 s werden die Zyklus- und Koinzidenzzähler der PCUs gestartet und nach 3 s wieder angehalten und ausgelesen. Nach einer Mittelung über drei Auslesen werden die Informationen transferiert. Um die Menge der zu übertragen-

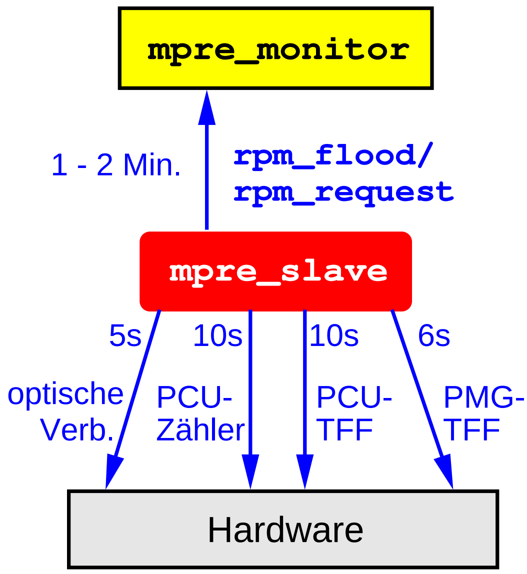

Abb. 4.21: Monitoring-Funktionen in `mpre_slave`. Mit den angegebenen Periodendauern wird auf die Informationen der optischen Verbindungen, die Zähler im Koinzidenz-CPLD der PCU und die Test-FIFOs von PCU und PMG zugegriffen. Zur Reduzierung des Nachrichtentransfers werden gemittelte oder summierte Werte an `mpre_monitor` gesendet.

den Daten möglichst gering zu halten, werden die alle 10 s ausgelesenen und über fünf Auslesen summierten Daten aus den PCU-Test-FIFOs bereits in Form von Histogrammen für jeden Parameter gespeichert und erst dann zu `mpre_monitor` transferiert. Um die Daten der einzelnen Koinzidenzkanäle gegeneinander skalieren zu können, werden zusätzlich die PCU-Zähler für kurze Zeit gestartet und ausgelesen. Im Gegensatz zum Monitoring der PCU- werden bei den PMG-Test-FIFOs korrelierte Informationen in Form vollständiger FLT-Nachrichten übertragen, da das Füllen von Histogrammen hier nicht zu einer Verringerung der Datenmenge führt. Da der PMG-Test-FIFO nur 128 Nachrichten – verglichen mit den Daten von 4096 Koinzidenzen auf der PCU – umfaßt, wird er häufiger ausgelesen, alle 6 s, und es wird über 20 Auslesen summiert. Alle Parameter des Sammelns von Monitoring-Informationen, wie z. B. die Ausleseperioden, können mittels Einträgen in der Datenbank verändert werden. Im Gegensatz zu anderen Zugriffen werden Monitoring-Funktionen in der Regel kontinuierlich ausgeführt. Es gibt eine Anforderung für das Starten einer Monitoring-Aufgabe und eine für das Beenden. Dazwischen werden sie von `mpre_slave` zusätzlich zu den sonstigen vorliegenden Anforderungen ausgeführt.

Um die Zugriffe auf die Hardware-Module einfacher zu gestalten, sind Treiberfunktionen zu sogenannten Systemfunktionen zusammengefaßt worden. Sie erlauben, mit nur einer Anforderung für eine solche Funktion, PCUs bzw. PMGs zurückzusetzen, zu initialisieren, zu starten und zu stoppen. Für PCUs werden folgende Zugriffe durchgeführt:

- Zurücksetzen: Alle Kommando- und Masken-Register werden gelöscht, die DACs werden auf 0 gesetzt und die Zähler im Koinzidenz-CPLD zurückgesetzt.

- Initialisieren: Die Offset-Spannungen können bestimmt werden, wenn dies notwendig ist. Da dies sehr zeitaufwendig ist, werden die optischen Verbindungen in der Regel mit den bekannten Werten initialisiert, die in der Datenbank gespeichert sind. Die Masken-Register werden ebenfalls mit den Werten aus der Datenbank geladen. Schließlich werden der Inhibit- und der Reduzier-Modus eingestellt.

- Starten: Alle FIFOs, die Zustandsautomaten in den CPLDs und die optischen Verbindungen werden zurückgesetzt und, ebenso wie die Prozessierung des Koinzidenz-CPLDs, gestartet.

- Stoppen: Die optischen Verbindungen und die Prozessierung des Koinzidenz-CPLDs werden angehalten.

Beim Stoppen bleibt die Initialisierung erhalten, so daß die Prozessierung gegebenenfalls sofort wieder gestartet werden kann. Für das Zurücksetzen, Starten bzw. Stoppen von PMGs ist nur jeweils ein VME-Zugriff erforderlich. Die Initialisierung besteht aus dem Laden der LUTs und der Einstellung des Modus zur Verdoppelung von FLT-Nachrichten.

Untersuchungen des Zeitverhaltens

Für die Datennahme im HERA – B Experiment werden die `mpre_srv`-Prozesse auf den VME-CPUs von der DAQ gestartet. Im Falle eines Absturzes eines Prozesses wird von der DAQ ein Neustart veranlaßt. Die `mpre_slave`-Prozesse werden hingegen von den `mpre_srv`-Prozessen gestartet, da nur so die Verbindung über SHM aufgebaut werden kann. Deshalb ist neben der regelmäßigen Kontrolle der Funktion durch `mpre_srv` während des Betriebs wichtig, daß beim Starten das SHM und `mpre_slave` möglichst schnell initialisiert werden.

In `mpre_srv` und `mpre_slave` sind Messungen der relevanten Zeiten mit der Funktion `gettimeofday` vorgenommen worden, mit der eine Auflösung in der Größenordnung von $1\,\mu$s erreicht wird. In den `mpre_srv`-Prozessen werden die Zeiten

- vom Starten des Prozesses bis vor der Initialisierung des SHM,
- für die Initialisierung des SHM und
- für das Starten von `mpre_slave`

gemessen. Für `mpre_slave`-Prozesse werden die Zeiten

- vom Starten des Prozesses bis vor der Anbindung an das SHM und
- für die Anbindung an das SHM

bestimmt. Vom 7.8.2000 bis zum Ende der Datennnahme am 25.8.2000 sind die Ergebnisse dieser Zeitmessungen in den Logdateien festgehalten worden.

In Abbildung 4.22 sind die gemessenen Zeiten für `mpre_srv` dargestellt. Dabei sind jeweils der gesamte Bereich der auftretenden Zeitdifferenzen und der Bereich, in dem der größte Teil der Meßwerte liegt, dargestellt. Für die Zeit bis zum Beginn der SHM-

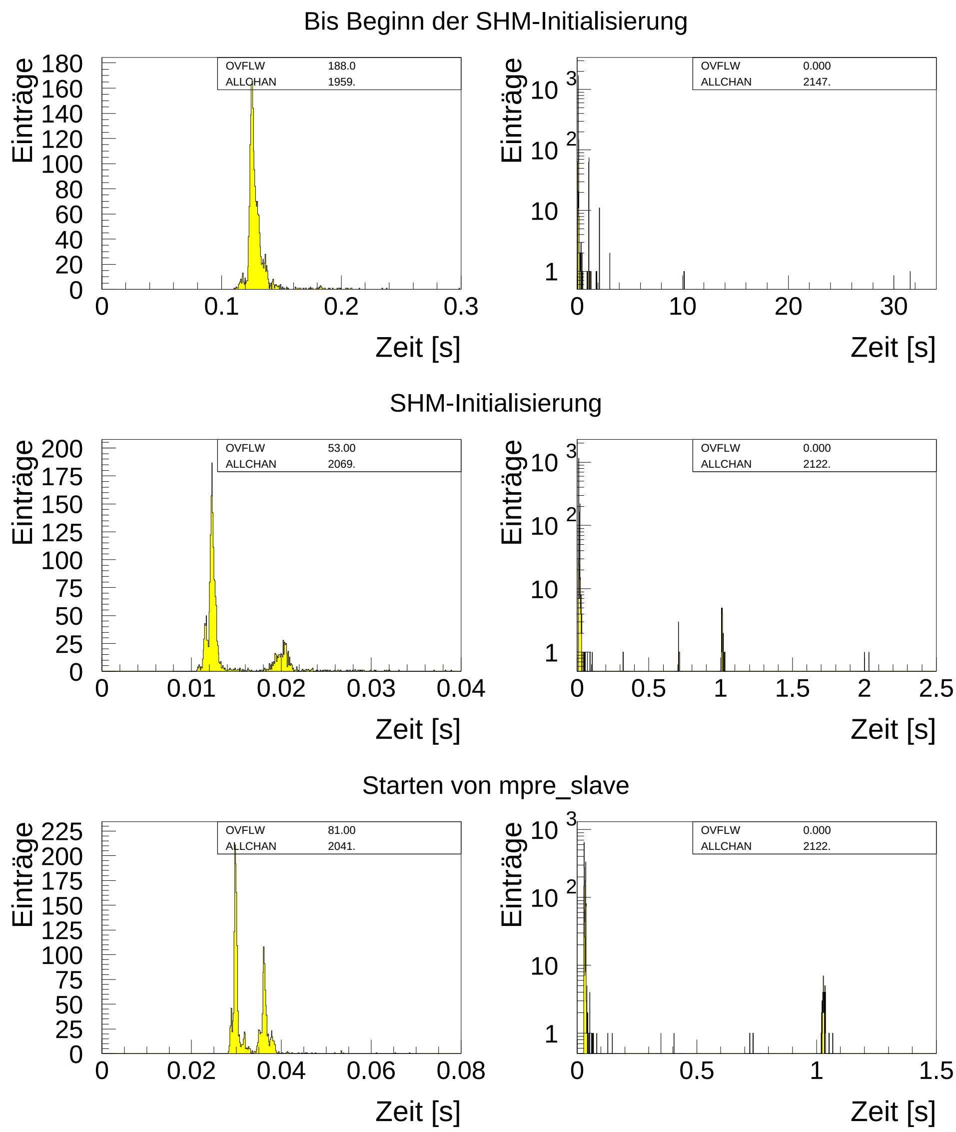

Abb. 4.22: Ergebnisse der Zeitmessungen für `mpre_srv`. In den Histogrammen der rechten Hälfte sind alle Meßwerte eingetragen, in denen der linken Hälfte ist der Bereich vergrößert dargestellt, in dem die meisten Meßwerte liegen.

Initialisierung fällt auf, daß es Einträge bei etwa 10 s und 31 s gibt, obwohl die meisten gemessenen Werte zwischen 100 ms und 200 ms liegen. Aufgrund der Informationen in den Logdateien kann der Wert bei 31 s auf einen `mpre_slave`-Prozeß zurückgeführt werden, der während der Initialisierung von `mpre_srv` beendet werden mußte. Offenbar ist es beim vorherigen Beenden von `mpre_srv` nicht gelungen, `mpre_slave` ebenfalls zu beenden. In dem untersuchten Zeitraum ist diese Situation nur einmal aufgetreten. Die beiden Einträge bei etwa 10 s sind durch Probleme beim Zugriff auf die ID-Datei, die Informationen über SHM-Segmente und Semaphore enthält, verursacht worden. Beide

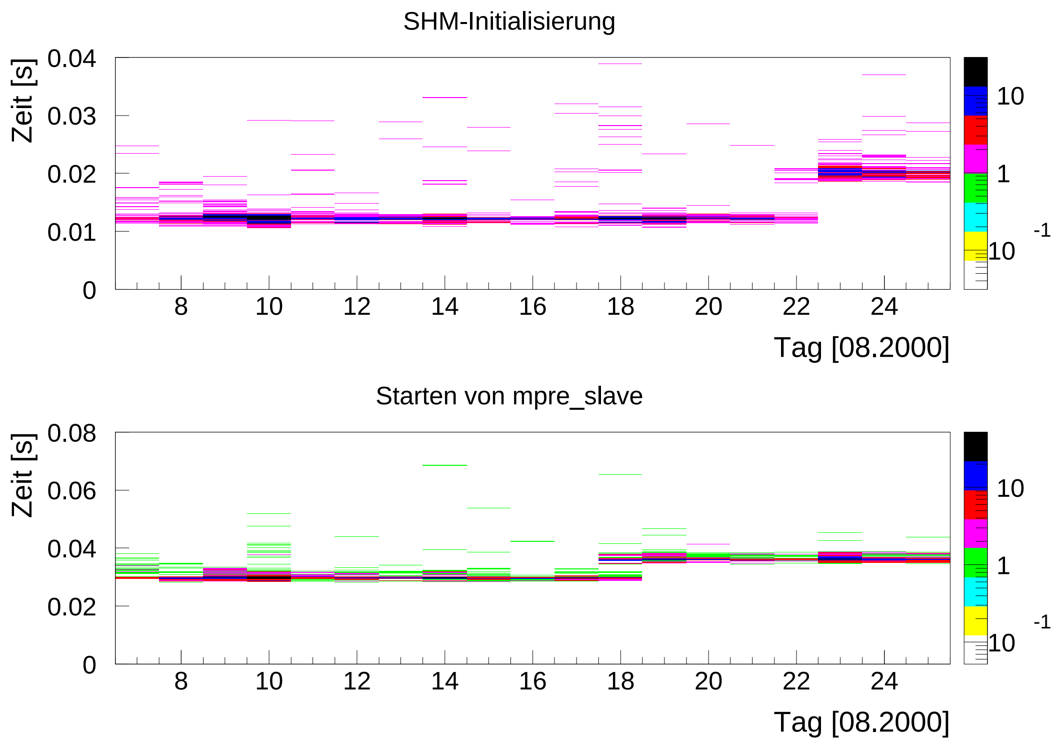

Abb. 4.23: Ergebnisse von Zeitmessungen aus `mpre_srv` für die Initialisierung des SHM und das Starten von `mpre_slave`, dargestellt in Abhängigkeit des Datums. Für die gemessenen Zeitdifferenzen ist jeweils der gleiche Bereich wie für die Histogramme auf der linken Seite in Abbildung 4.22 gewählt.

geschilderte Situationen können erst dann systematisch untersucht werden, sobald die Datennahme des HERA – B Experimentes im Jahr 2001 beginnt. Neben diesen Beobachtungen fällt auf, daß es gerade über 1 s, 2 s und 3 s Einträge gibt. Offenbar gibt es in Funktionen zur Initialisierung des `rpm`-Protokolls, die vor dem Initialisieren des SHM durchgeführt werden, Wartezeiten von 1 s.

Eine ähnliche Beobachtung kann für das Initialisieren des SHM und das Starten des `mpre_slave`-Prozesses gemacht werden. Dort gibt es in den verwendeten Bibliotheksfunktionen offenbar auch Wartezeiten von 1 s. Der Wert von etwa 2 s bei der Initialisierung des SHM ist in der oben geschilderten Situation aufgetreten, als der `mpre_slave`-Prozeß zuvor beendet werden mußte. Die Struktur der Verteilung mit zwei Maxima, die auch bei der Zeit zum Starten von `mpre_slave` auftritt, ist auf Änderungen in der Online-Software zurückzuführen. In Abbildung 4.23 wird die Abhängigkeit der gemessenen Zeitdifferenzen vom Datum gezeigt. Bei der Initialisierung des SHM ist ein Versatz vom 22.8. auf den 23.8. zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß eine Übermittlung zusätzlicher Informationen über die erzeugten SHM-Segmente und Semaphore an `mpre_errlog` eingeführt worden ist, die zu einer kleinen Verzögerung führt. Für den Anstieg der Zeit für das Starten von `mpre_slave` ab dem 18.8.2000 ist das Hinzufügen

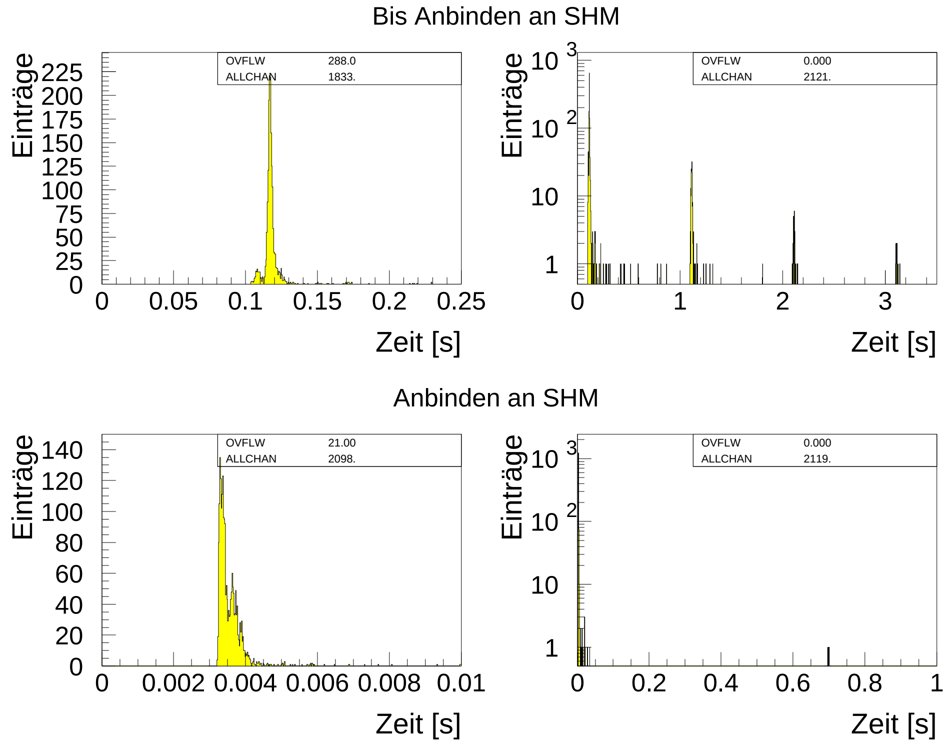

Abb. 4.24: Ergebnisse der Zeitmessungen für `mpre_slave`. In den Diagrammen der rechten Hälfte sind alle Meßwerte eingetragen, in den Diagrammen der linken Hälfte ist der Bereich vergrößert dargestellt, in dem die meisten Meßwerte liegen.

neuer Funktionen für den Zugriff auf die Datenbank verantwortlich. Dadurch ist die ausführbare Datei für `mpre_slave` um etwa 10 % vergrößert worden, und deshalb dauert das Starten von `mpre_slave` länger als zuvor.

Für die gemessenen Zeit im `mpre_slave`-Prozeß bis zum Anbinden des SHM, dargestellt in Abbildung 4.24, fällt wiederum die Struktur mit Abständen von 1 s auf. Dies ist offenbar wiederum auf Wartezeiten von 1 s in den Funktionen zur Initialisierung des `rpm`-Protokolls zurückzuführen. Das Anbinden an das SHM geschieht sehr schnell, verglichen mit allen anderen Zeiten.

Die resultierenden Zeitdifferenzen sind in Tabelle 4.2 zusammengefaßt. Dort ist sowohl der arithmetische Mittelwert als auch der Median angegeben. Aufgrund der Einträge bei Zeitwerten, die um mindestens eine Größenordung über den typischen auftretenden Zeiten liegen, ist das arithmetische Mittel zu größeren Werten verschoben, und die Fehler sind wesentlich größer als die Mittelwerte selbst. Als Fehler werden die Standardabweichungen der Einzelwerte angegeben, um Aussagen über den Zeitbereich machen zu können, in dem einzelne Zeitdifferenzen liegen. Zur Bestimmung der typischen Zeitdifferenzen wird der Median verwendet, der von extremen Werten sehr wenig beeinflußt wird. Der Fehler wird berechnet, indem die Intervalle oberhalb und unterhalb

Tab. 4.2: Ergebnisse der Zeitmessungen für `mpre_srv` und `mpre_slave`. Es wird jeweils der Median und das arithmetische Mittel angegeben. Für die Initialisierung des SHM und das Starten von `mpre_slave` werden die Meßwerte zusätzlich für zwei getrennte Zeiträume ausgewertet.

Zeitmessung	Median [ms]	arithmetisches Mittel [ms]
Bis SHM-Initialisierung	$127\ ^{+10}_{-\ 3}$	245 ± 808
SHM-Initialisierung	$12{,}4\ ^{+7{,}6}_{-0{,}4}$	$34{,}9 \pm 145{,}5$
7.–22.8.00	$12{,}3\ ^{+0{,}5}_{-0{,}5}$	$35{,}1 \pm 152{,}7$
23.–25.8.00	$20{,}2\ ^{+0{,}8}_{-0{,}8}$	$34{,}2 \pm 112{,}4$
Starten von `mpre_slave`	$30{,}5\ ^{+6{,}1}_{-0{,}9}$	$68{,}4 \pm 183{,}9$
7.–17.8.00	$29{,}9\ ^{+1{,}0}_{-0{,}4}$	$55{,}5 \pm 156{,}0$
19.–25.8.00	$36{,}3\ ^{+1{,}6}_{-0{,}6}$	$94{,}1 \pm 229{,}6$
Bis Anbinden an SHM	$117\ ^{+11}_{-\ 2}$	276 ± 441
Anbinden an SHM	$3{,}4\ ^{+0{,}3}_{-0{,}1}$	$4{,}7 \pm 26{,}2$

des Medians bestimmt werden, in denen jeweils 34,14 % der Zeitwerte liegen [Fri 74]. Dies entspricht dem Anteil von Werten, die in der $1\,\sigma$-Umgebung einer Gauß-Verteilung liegen. Die Ausläufer zu hohen Werten spiegeln sich in den asymmetrischen Fehlerintervallen der Mediane wider. Für die Initialisierung des SHM und das Starten von `mpre_slave` werden die zuvor beschriebenen Zeiträume zusätzlich getrennt ausgewertet. Die Verzögerungen aufgrund der oben beschriebenen Modifikationen der Online-Software liegen zwischen 6 ms und 8 ms, sind also vertretbar gering.

Insgesamt ergibt sich für `mpre_srv` eine typische Zeitdauer von weniger als 200 ms und für `mpre_slave` von etwa 120 ms für die jeweilige Initialisierung. Diese Werte sind für das Starten der Prozesse durch die DAQ ausreichend gering, so daß keine Komplikationen zu erwarten sind. Die selten auftretenden sehr großen Werte bis etwa 30 s können zu Schwierigkeiten führen und müssen daher zukünftig systematisch untersucht werden, um gegebenenfalls Möglichkeiten für ihre Vermeidung zu finden.

4.2.5 Der Prozeß `MPRE_BOSS` und die Kommunikation zwischen den Prozessen

Die zentrale Komponente der Online-Software ist der `MPRE_BOSS`-Prozeß. Er koordiniert die Kommunikation zwischen den Prozessen des Myon-Pretriggers und dient als Schnittstelle zu allen Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers. Außerdem sammelt er aktuelle Informationen über den Zustand der Hardware-Module und der anderen Prozesse, um darauf im Falle von Problemen adäquat reagieren zu können. Aufgrund seiner zentralen Stellung ist `MPRE_BOSS` der einzige Prozeß der Online-Software, ohne dessen korrekte Funktion eine Datennahme mit dem Myon-Pretrigger-System nicht möglich ist.

Informationen über den Systemzustand

MPRE_BOSS kontrolliert verschiedene Aspekte des Zustands der Hardware-Module und der Prozesse der Online-Software, von denen die vier wichtigsten im folgenden beschrieben werden.

- MPRE_BOSS protokolliert und überwacht die Ausführung aller Zugriffe, die die sieben mpre_slave-Prozesse auszuführen haben,
- er bestimmt für jede PCU und jeden PMG den aktuellen Zustand,
- er überprüft mit Hilfe von Testnachrichten die Kommunikation mit allen mpre_srv- und mpre_slave-Prozessen und
- erhält von allen Prozessen der Online-Software Informationen über ihr Starten und Beenden.

Wie im vorigen Abschnitt dargelegt gibt es bei der Übermittlung der Anforderungen für Zugriffe von mpre_srv an mpre_slave über das SHM keine Rückmeldung über die erfolgreiche Ausführung, die Ergebnisse der Zugriffe oder aufgetretene Fehler. Daher kann mpre_srv an den anfordernden Client-Prozeß, d. h. an MPRE_BOSS, nur eine Bestätigung schicken, daß das Kommando im SHM abgelegt worden ist. MPRE_BOSS legt deshalb für jede Anforderung, die von einem mpre_slave-Prozeß ausgeführt werden soll, je einen Eintrag in zwei linearen Listen, der Anforderungs- und der Timeout-Liste, an. Lineare Listen sind gewählt worden, da die Anzahl ihrer Elemente, d. h. die Anzahl noch nicht beendeter Zugriffe, die die mpre_slave-Prozesse ausführen, unbestimmt ist und neue Elemente an beliebigen Positionen der Listen einfach eingeordnet werden können. Der Aufbau der Listen ist in Abbildung 4.25 schematisch dargestellt. Um einer Antwort von mpre_slave die korrekte Anforderung zuordnen zu können, werden sie mit Anforderungsnummern versehen. Diese werden – für die verschiedenen Crates getrennt – fortlaufend numeriert. Die Elemente der Anforderungsliste sind entsprechend der Anforderungsnummer geordnet. Sie enthalten die Hierarchiestufe des SHM-FIFOs und die Crate-Nummer, durch die der mpre_srv- und der mpre_slave-Prozeß gekennzeichnet sind, die die Anforderung bearbeiten. Die gesamte rpm-Nachricht und der rpm-Header (engl. für Kopfzeile), in dem unter anderem die IP-Adresse des mpre_srv-Prozesses enthalten ist, werden ebenfalls in der Anforderungsliste gespeichert. Die rpm-Nachricht enthält zusätzlich die Informationen, wie häufig beim Auftreten von Fehlern das Schicken eines Kommandos an mpre_srv höchstens wiederholt werden darf und wie häufig es bereits geschickt worden ist. Neben dem Zeitpunkt des Abschickens enthält das Element der Anforderungsliste eine Variable, die den Status des Kommandos anzeigt. Hier wird z. B. festgehalten, ob bei einem vorherigen Ausführen des Kommandos Fehler aufgetreten sind. Jedes Listenelement enthält einen Zeiger auf das nachfolgende Element, wobei das letzte Element der Liste durch den NULL-Zeiger gekennzeichnet ist.

Für jeden Zugriff wird von MPRE_BOSS eine Zeit berechnet, zu der mpre_slave auf die Anforderung spätestens geantwortet haben muß. Dieser Timeout-Zeitpunkt wird in der zweiten linearen Liste, der Timeout-Liste gespeichert. Ihre Elemente sind nach den Timeout-Werten geordnet, so daß das erste Element immer den Zugriff enthält, der als

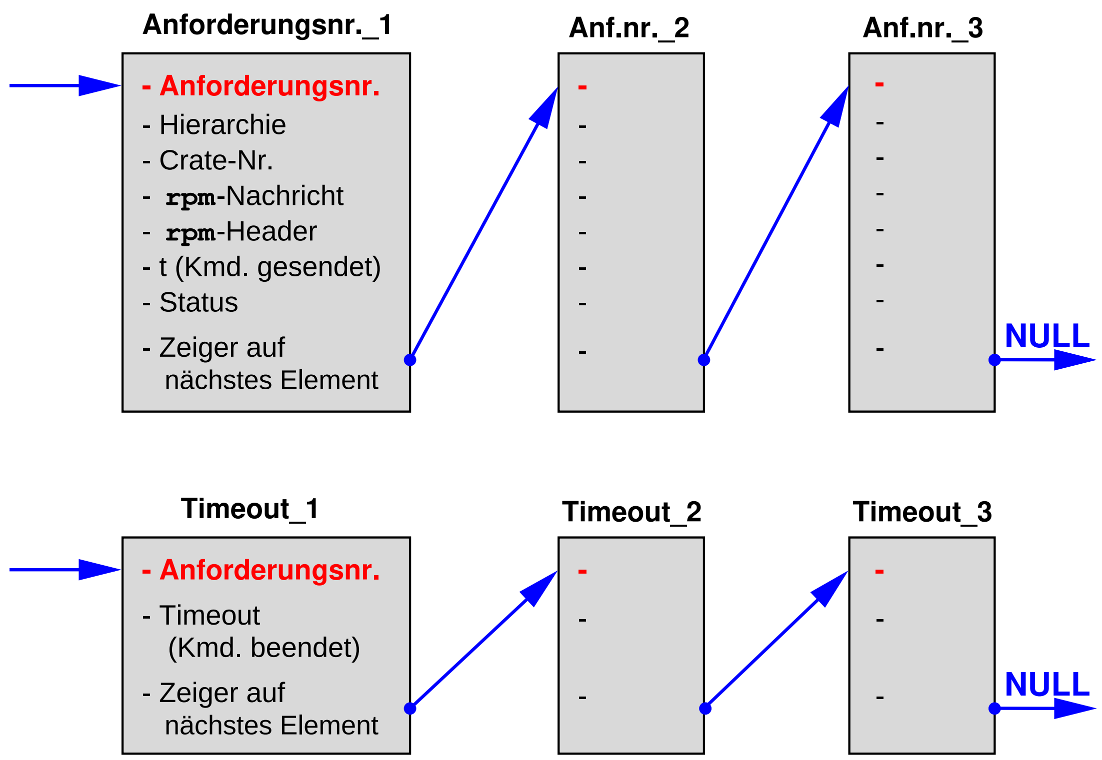

Abb. 4.25: Anforderungs- und Timeout-Liste des `MPRE_BOSS`-Prozesses, mit denen die Ausführung von Zugriffen durch die `mpre_slave`-Prozesse überwacht wird. Die Anforderungsliste enthält sämtliche Informationen der von `mpre_slave` auszuführenden Kommandos. In der Timeout-Liste wird für jedes Kommando festgehalten, wann es spätestens ausgeführt sein muß. Beide Listen sind als lineare Listen aufgebaut, hier beispielhaft mit drei Elementen dargestellt.

nächster beendet sein muß. Da jedes Element der Liste die Anforderungsnummer enthält, kann einem Timeout-Wert eindeutig das betreffende Kommando zugeordnet werden.

In der Regel werden die Hierarchie und die maximale Zahl von Versuchen, ein zuvor fehlgeschlagenes Kommando zu senden, von `MPRE_BOSS` bestimmt. Nur wenn der Benutzer bei einer Anfrage mittels `mpre_con` diese Werte festlegt, werden sie übernommen und nicht neu bestimmt. Zugriffe, denen die höchste Hierarchiestufe zugewiesen wird, sind z. B. Zustandsübergänge, die von der DAQ angefordert werden, System- und Monitoring-Funktionen. Die Zeitdauern, die höchstens für das Ausführen eines Zugriffs erlaubt sind, und die daraus folgenden Timeout-Werte werden ebenfalls von `MPRE_BOSS` bestimmt. Dabei wird – neben der typischen Zeit für den betreffenden Zugriff – berücksichtigt, wie viele Kommandos mit gleicher oder höherer Hierarchie bereits in dem `mpre_slave`-Prozeß zur Bearbeitung anstehen, auf wie viele Hardware-Module der Zugriff angewendet werden soll und ob geschriebene Werte überprüft werden müssen. Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, können für jede Treiberfunktion, mit der Werte, z. B. in Registern, verändert werden, die geschriebenen Werte optional mit Lesezugriffen überprüft werden. Durch die zusätzlichen Lesezugiffe verlängert sich die Dauer der Ausführung der Funktion.

Tab. 4.3: Kategorien zur Charakterisierung des Systemzustands des Myon-Pretriggers und ihre Bedeutung. In Klammern ist das Bitmuster in hexadezimaler Schreibweise angegeben, mit dem der Zustand intern bezeichnet wird.

Zustand		Bedeutung
ST_UNKNOWN	(01)	Zustand bei Starten der Online-Software
ST_RESET	(10)	Hardware ist zurückgesetzt, d. h. in definiertem Grundzustand
ST_INITIALIZED	(20)	Systemfunktion zur Initialisierung ist ausgeführt; Prozessierung kann gestartet werden
ST_RUNNING	(40)	Prozessierung ist gestartet
ST_STOPPED	(80)	Prozessierung ist angehalten; Initialisierung bleibt erhalten
ST_ERROR	(04)	fehlerhaftes Verhalten einer Hardware-Komponente
ST_EXPERT	(08)	kein eindeutiger Zustand, da ein Expertenzugriff auf die Hardware erfolgt ist, der keinem der regulären Zustände entspricht
ST_NO_TRANS	(02)	nur für Zustandsübergänge: es findet kein Übergang statt

Bei einigen Zugriffen müssen spezifische Parameter einbezogen werden, wie z. B. die Anzahl von Wiederholungen beim Auslesen von Test-FIFOs. Zuletzt wird die Anforderungsnummer bestimmt und der Zugriff in die beiden Listen eingeordnet, nach der Anforderungsnummer bzw. nach dem Timeout-Wert.

Die Auswirkungen der Zugriffe auf die Hardware-Module bilden die Grundlage einer weiteren wichtige Quelle von Informationen über den Systemzustand. Der mögliche Zustand einer PCU oder eines PMG wird in die in Tabelle 4.3 angegebenen Kategorien eingeteilt. Für jeden möglichen Zugriff auf die Hardware-Module wird seine Auswirkung auf die Hardware in die dargestellten Kategorien eingeordnet. So kann `MPRE_BOSS` für jedes Modul einen aktuellen Zustand und einen Übergang in einen zukünftigen Zustand bestimmen:

- Wenn eine Anforderung für einen Zugriff an `mpre_srv` geschickt wird, der eine Auswirkung auf den Zustand haben wird, hält `MPRE_BOSS` fest, daß die betroffenen Module einen Übergang in den entsprechenden Zustand ausführen.
- Sobald eine Nachricht von `mpre_slave` eintrifft, daß ein Kommando erfolgreich ausgeführt worden ist, wird mit Hilfe des Eintrags in der Anforderungsliste überprüft, ob der Zustand durch das Ausführen des Zugriffs verändert worden ist. Wenn dies der Fall ist, speichert `MPRE_BOSS` für die Module den neuen Zustand und setzt den Wert für einen Übergang auf ST_NO_TRANS, d. h. es findet kein Übergang statt.

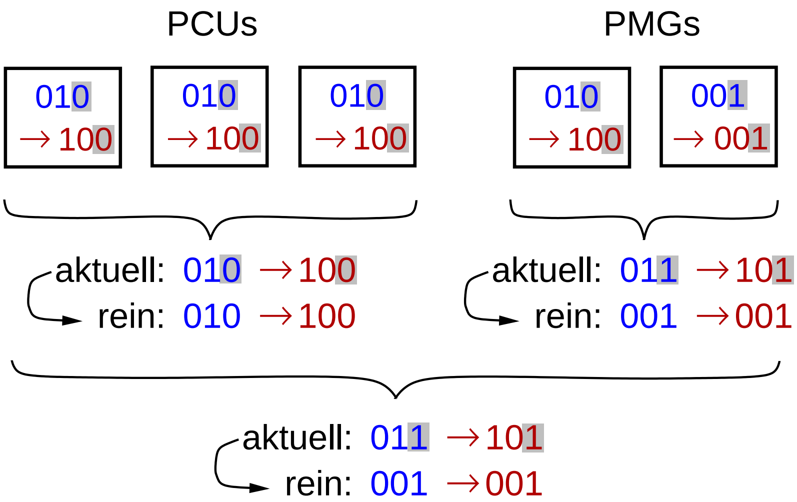

Abb. 4.26: Bestimmung des Systemzustands und des Systemübergangs der Hardware-Module. Es sind die Zustände und Übergänge (mit „→") für drei PCUs und zwei PMGs – vereinfachend mit drei Bits – dargestellt. Daraus werden aktuelle und reine Zustände und Übergänge für alle PCUs, alle PMGs und alle Module bestimmt. Das grau unterlegte Bit entspricht einem bei der Bestimmung der reinen Werte bevorzugten Zustand.

Die Klassifizierung der Zustände und Übergänge ist mit Hilfe von Bitmustern implementiert, wobei immer nur ein Bit gesetzt ist, wie anhand der Werte in Tabelle 4.3 zu erkennen ist.

Aus den Werten für die einzelnen PCUs und PMGs werden systemweite Zustände und Übergänge bestimmt. In Abbildung 4.26 ist dies vereinfachend mit drei Bits umfassenden Werten und drei PCUs sowie zwei PMGs dargestellt. Aus den Zuständen und Übergängen (mit „→") der PCUs, der PMGs und aller Hardware-Module werden durch Veroderung der Bitmuster sogenannte aktuelle Werte bestimmt. Für alle unterschiedlichen vorkommenden Zustände ist darin je ein Bit gesetzt. Da die Zugriffe für verschiedene Crates gegeneinander zeitlich verzögert ausgeführt werden und die Werte nach jeder Rückmeldung aktualisiert werden, sind während der Übergänge in der Regel mehrerere Bits gesetzt. Das System befindet sich also in dieser Zeit nicht in einem eindeutigen Zustand. Deshalb werden aus den aktuellen Werten immer sogenannte reine Werte bestimmt. Ist der aktuelle Wert – wie für die PCUs im dargestellten Beispiel – ein eindeutiger Zustand bzw. Übergang, entspricht der reine dem aktuellen Wert. Für die PMGs ist dies nicht der Fall, da ihre Zustände und Übergänge voneinander abweichen und für die aktuellen Werte deshalb zwei Bits gesetzt sind. Hier kann nur dann ein reiner Wert bestimmt werden, wenn einer der vorkommenden Zustände bevorzugt ist, wie z. B. der dem grau unterlegten Bit entsprechende. Die in dieser Weise ausgezeichneten Zustände sind ST_UNKNOWN, ST_EXPERT und ST_ERROR, die in aufsteigender Priorität genannt sind. Treten mehrere dieser Werte gleichzeitig auf, nimmt der reine Zustand denjenigen mit höchster Priorität an. Damit wird erreicht, daß im Fall eines Fehlers bei einer PCU oder einem PMG die Systemvariablen den Wert ST_ERROR, der

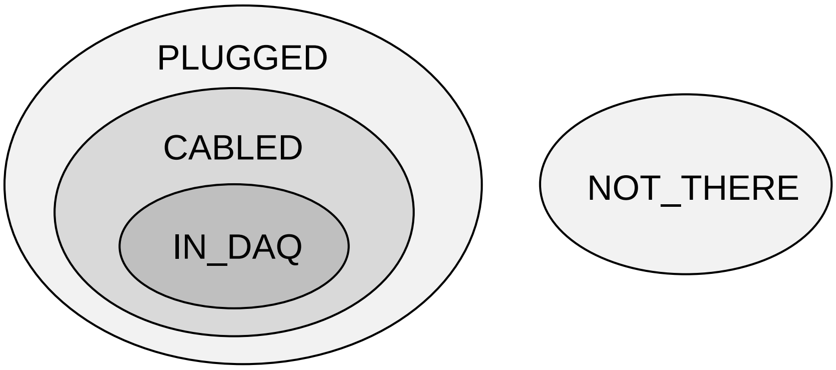

Abb. 4.27: Darstellung der Hardware-Status, die eine PCU oder ein PMG annehmen können.

ausgezeichnet ist und die höchste Priorität besitzt, annehmen.

Unter bestimmten Umständen muß verhindert werden, daß aufgrund einzelner Hardware-Module – im dargestellten Beispiel ein PMG – reine Zustände und Übergänge nicht angenommen werden. So sollen z. B. fehlerhafte Module, die zu Testzwecken installiert sind, nicht berücksichtigt werden. Deshalb wird jede PCU und jeder PMG mit einem sogenannten Hardware-Status klassifiziert, der vom Benutzer mittels eines Eintrages in der Datenbank festgelegt wird. Der Hardware-Status hängt nicht mit den oben beschriebenen Zuständen und Übergängen der Module zusammen und ist, im Gegensatz zu diesen, nicht dynamisch veränderlich. In Abbildung 4.27 sind die vier Hardware-Status, die eine PCU oder ein PMG annehmen können, dargestellt.

- Wenn ein Modul installiert ist, so daß es mit VME-Zugriffen kontrolliert werden kann, aber nicht oder unvollständig mit der vorhergehenden und nachfolgenden Komponente des Myon-Pretrigger-Systems verbunden ist, wird ihm der Hardware-Status PLUGGED zugewiesen.
- Der Wert CABLED wird für vollständig verbundene Module verwendet. Diese Module gehören folglich zusätzlich zur Kategorie PLUGGED.
- Um für die Datennahme mit dem Myon-Pretrigger die Möglichkeit zu eröffnen, nur einen Teil der vollständig verbundenen Module zu verwenden, wird für diese der Hardware-Status IN_DAQ verwendet.
- Alle Module, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht installiert sind, gehören zur Kategorie NOT_THERE.

Mit Einträgen in der Datenbank wird die Auswahl, welche dieser Kategorien bei der Bestimmung der zuvor beschriebenen Systemzustände und -übergänge verwendet wird, getroffen. Eine typische Wahl während der Datennahme im Jahr 2000 ist die Kategorie CABLED gewesen, die auch die Module mit dem Hardware-Status IN_DAQ einschließt. Für das Zurücksetzen der Module ist hingegegen die Kategorie PLUGGED gewählt worden, um sicherzustellen, daß auch teilweise verbundene PCUs oder PMGs sich in einem definierten Zustand befinden und die Datennahme nicht beeinflussen.

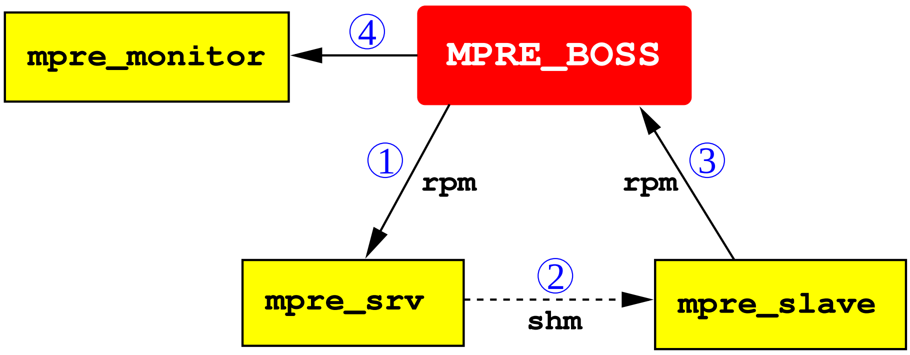

Abb. 4.28: Kommunikation zur Überprüfung der korrekten Funktion von mpre_srv- und mpre_slave-Prozessen. Testnachrichten werden an mpre_srv-Prozesse gesendet, über shm an mpre_slave und von dort wieder an MPRE_BOSS geleitet. Die Ergebnisse der Testnachrichten werden schließlich mpre_monitor übermittelt.

Eine weitere wichtige Aufgabe von MPRE_BOSS ist das Überprüfen der Erreichbarkeit der mpre_srv- und mpre_slave-Prozesse, die auf den sieben VME-CPUs ausgeführt werden. Wenn Fehler in einem der Prozesse oder der Kommunikation zwischen ihnen auftreten, kann die Funktion des Myon-Pretriggers für das betreffende Crate nicht mehr gewährleistet werden. Deshalb sendet MPRE_BOSS in regelmäßigen Abständen Testnachrichten an mpre_srv. Wie in Abbildung 4.28 gezeigt ist, werden die Anforderungen von MPRE_BOSS (①) über shm an den zugehörigen mpre_slave-Prozeß weitergeleitet (②) und von dort wieder an MPRE_BOSS (③). Wenn diese Kommunikation innerhalb der vorgegebenen Zeitdauer korrekt durchgeführt wird, kann davon ausgegangen werden, daß mpre_srv, mpre_slave und ihre gemeinsame SHM-Schnittstelle korrekt funktionieren. Im folgenden wird dies verkürzend als „Verfügbarkeit eines mpre_slave-Prozesses“ bezeichnet. Intern protokolliert MPRE_BOSS, welche mpre_slave-Prozesse verfügbar sind, und teilt Änderungen mpre_monitor mit (④). Dort wird diese Information benötigt, um festzustellen, von welchen mpre_slave-Prozessen Monitoring-Daten übermittelt werden.

Bezüglich ihrer Verfügbarkeit werden kritische und unkritische mpre_slave-Prozesse unterschieden: Kritische mpre_slave-Prozesse werden für die Datennahme benötigt, während unkritische nicht erforderlich sind. Während der Datennahme im Jahr 2000 ist ausschließlich der Pad-Pretrigger verwendet worden, d. h. die Hardware-Module, die in den Crates 1 bis 6 installiert sind. Die Prozesse mpre_srv7 und mpre_slave7 sind also nicht benötigt worden. Dort auftretende Fehler haben deshalb keine Folgen für die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems. Ihr Auftreten wird in der Logdatei festgehalten, zieht aber keine weitergehenden Konsequenzen nach sich.

Von allen Prozessen der Online-Software erhält MPRE_BOSS Nachrichten über ihr Starten und Beenden. Dies erlaubt – insbesondere während der Datennahme – die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems auch beim Absturz von Prozessen innerhalb kurzer Zeit fortführen zu können. Wenn die Prozesse von der DAQ gestartet werden, werden sie nach einem Absturz einmal automatisch neu gestartet. In diesen Situationen sind sie jedoch auf zusätzliche Informationen angewiesen, um ihre Funktion korrekt ausführen zu können. So teilt MPRE_BOSS bei einem Neustart von mpre_monitor diesem die verfügbaren mpre_slave-Prozesse mit. Beim Starten oder Beenden von mpre_srv- oder mpre_slave-Prozessen sorgt MPRE_BOSS durch das Senden von Testnachrichten für eine Aktualisierung dieser Information. Bei einem Start von mpre_srv oder mpre_slave werden die Kommandos, die in der Anforderungsliste für das entsprechende Crate stehen, nochmals gesendet. Wenn der Systemzustand während der Datennahme ST_RUNNING ist, wird zusätzlich das Monitoring neu gestartet, um zu gewährleisten, daß die Funktion des Myon-Pretriggers kontinuierlich überwacht wird.

Programmablauf von MPRE_BOSS

Als zentraler koordinierender Prozeß der Myon-Pretrigger Online-Software muß MPRE_BOSS für anfragende Prozesse erreichbar sein, er ist also in erster Linie als rpm-Server ausgelegt. Da er regelmäßig Kontrollaufgaben erfüllen muß, wird er im BLOCK_TIL_TIMEOUT-Modus betrieben, so daß er nur bis zum Auftreten eines Timeouts auf Anfragen wartet. Solche Anfragen an MPRE_BOSS führen in der Regel dazu, daß er als rpm-Client selbst Nachrichten an Server-Prozesse schicken muß, um Informationen zu erhalten oder das Ausführen von Funktionen anzufordern. Um die Zeiträume, in denen MPRE_BOSS nicht erreichbar ist, zu minimieren, führt er möglichst wenige aufwendige Prozessierungen durch.

Der funktionelle Ablauf des MPRE_BOSS-Prozesses ist in Abbildung 4.29 in Form eines Flußdiagramms gezeigt. Zu Beginn werden verschiedene Initialisierungen durchgeführt, so auch für die verwendeten Kommunikationsprotokolle rpm und smc [Ryb 99]. Letzteres dient zur Übermittlung von Zustandsübergängen der Central Run Control (CRC). Für smc werden zunächst nur die grundlegenden Initialisierungen durchgeführt, die noch nicht für die vollständige Benutzung des Protokolls ausreichen. Auf Anforderungen für CRC-Zustandsübergänge soll erst nach weiteren, unten beschriebenen Initialisierungen reagiert werden können.

Zudem wird der Wert der Umgebungsvariablen FLTMODE gelesen, der bestimmt, ob für die Datennahme die Spursuche im Triggersystem bereits im FLT oder erst im Second Level Trigger (SLT) begonnen wird. Dafür müssen die Look-up Tables der PMGs mit unterschiedlichen Daten geladen werden, mit PHYS_MM-LUTs (Physik-Datennahme mit Mehrfach-Nachrichten, für engl. multiple messages) für den Beginn der Spursuche im FLT oder PHYS_SM-LUTs (Physik-Datennahme mit Einzel-Nachrichten, für engl. single messages) für den Beginn im SLT. Aufgrund von Besonderheiten des Spursuche-Algorithmus im FLT ist es notwendig, für mehr als 99 % der möglichen Koinzidenzen im Pad-System [Ada 01b] drei FLT-Nachrichten pro gefundener Koinzidenz zu erzeugen. Für den Algorithmus des SLT ist dies nicht notwendig. Da das Senden zweier zusätzlicher FLTNachrichten einen zusätzlichen Zeitaufwand von 80 ns für jede Koinzidenz bedeutet, werden für die im SLT beginnende Spursuche nur einzelne Nachrichten generiert.

Die Initialisierung von MPRE_BOSS wird mit dem Auslesen von Tabellen der Datenbank abgeschlossen, die Informationen über die Verteilung der Hardware-Module und Einstellungen für die Online-Software enthalten. Dazu gehören z. B. die Informationen, welche der mpre_slave-Prozesse als kritisch eingestuft werden, welcher Hard-

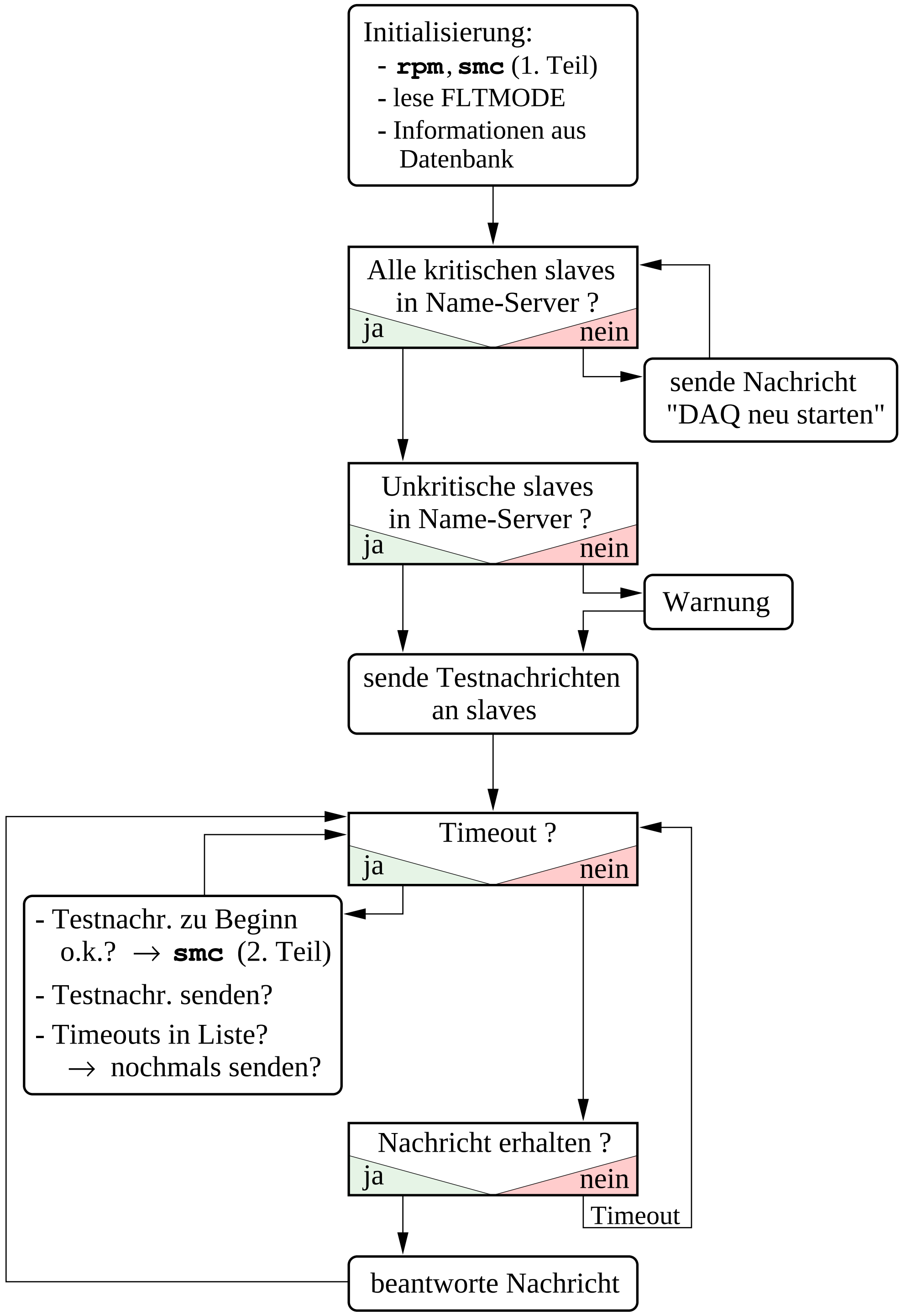

Abb. 4.29: Flußdiagramm der Funktion des `MPRE_BOSS`-Prozesses. Nach der Initialisierung wird überprüft, ob sich alle `mpre_slave`-Prozesse registriert haben, anschließend werden Testnachrichten gesendet. Eintreffende Anforderungen werden bearbeitet, und beim Auftreten eines Timeouts werden Kontrollfunktionen durchgeführt.

ware-Status für die Bestimmung des Systemzustands herangezogen wird und in welchen Zeitabständen welche Monitoring-Aufgaben ausgeführt werden sollen.

Bevor `MPRE_BOSS` seine Funktion als `rpm`-Server aufnimmt, überprüft er, ob alle kritischen `mpre_slave`-Prozesse beim Name-Server registriert sind. Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben wurde, dokumentiert jeder `mpre_slave`-Prozeß die erfolgte Anbindung an die SHM-Segmente mit der Anmeldung beim Name-Server. Wenn nach 40 s mindestens einer der kritischen `mpre_slave`-Prozesse noch nicht registriert ist, wird eine Nachricht mittels `smc` geschickt, die zum Neustart der DAQ und damit auch aller Prozesse der Online-Software auffordert. Diese Nachricht wird entsprechend ihrer Bedeutung so dargestellt, daß sie die Aufmerksamkeit der für die Datennahme Verantwortlichen erregt. In dieser Situation verbleibt `MPRE_BOSS` in einer Endlosschleife, da keine sinnvolle Datennahme möglich ist. So verhindert er weitere CRC-Zustandsübergänge und damit den Beginn der Datennahme. Wenn sich alle kritischen `mpre_slave`-Prozesse registriert haben, werden zusätzlich die unkritischen überprüft. Das Fehlen eines der Prozesse wird in der Logdatei festgehalten, zieht aber keine weiteren Konsequenzen nach sich. Anschließend sendet `MPRE_BOSS` Testnachrichten an alle `mpre_srv`-Prozesse.

Danach beginnt die Funktion von `MPRE_BOSS` als `rpm`-Server, die bis zum Beenden der Datennahme oder dem Auftreten eines schwerwiegenden Fehlers fortgeführt wird. Analog zum Prozeß `mpre_srv` werden Kontrollaufgaben ausgeführt, wenn ein Timeout auftritt. Dieser kann einerseits in der Funktion `rpm_receive` ausgelöst werden, wenn 25 s lang keine `rpm`-Nachricht empfangen wird, oder andererseits aktiviert werden, wenn 75 s seit dem letzten Auftreten eines Timeouts vergangen sind. Dies wird benötigt, da der Timeout in `rpm_receive` nicht auftritt, wenn sehr viele Nachrichten empfangen werden. Die Zeiten basieren auf Erfahrungswerten und sind kürzer gewählt als bei `mpre_srv`, da die Kontrollaufgaben von `MPRE_BOSS` zu unmittelbaren Konsequenzen für die Datennahme führen können und deshalb häufiger ausgeführt werden müssen.

Beim ersten Auftreten eines Timeouts wird überprüft, ob alle zum Abschluß der Initialisierungsaufgaben gesendeten Testnachrichten von den kritischen `mpre_slave`-Prozessen beantwortet worden sind. Ist dies der Fall, wird die Initialisierung des `smc`-Protokolls abgeschlossen, so daß Anforderungen für CRC-Zustandsübergänge bearbeitet werden können.

Bei allen weiteren Timeouts werden zwei Aufgaben wahrgenommen: Zum einen werden, wenn mehr als 300 s seit dem letzten Senden vergangen sind, Testnachrichten gesendet. Die Liste der verfügbaren `mpre_slave`-Prozesse wird dann entsprechend der erhaltenen Antworten aktualisiert und bei Änderungen `mpre_monitor` mitgeteilt. Zum anderen wird in der Timeout-Liste nach allen Anforderungen für Zugriffe, die `mpre_slave` ausführt, gesucht, die zum aktuellen Zeitpunkt beendet sein müssen. Werden solche Einträge gefunden, wird anhand des dazugehörigen Elements der Anforderungsliste überprüft, ob das Kommando bereits so häufig wie erlaubt geschickt worden ist. Wenn die Maximalzahl noch nicht erreicht ist, werden die Einträge in der Anforderungs- und der Timeout-Liste gelöscht, eine neue Anforderungsnummer und ein neuer Timeout bestimmt, neue Einträge in beide Listen eingeordnet und das Kommando an `mpre_srv` geschickt. Kann das Kommando jedoch nicht noch einmal gesendet werden, da die Höchstzahl von Versuchen bereits unternommen worden ist, werden die bisherigen

Einträge in beiden Listen gelöscht und eine Fehlermeldung in die Logdatei eingetragen. Weitere Auswirkungen hängen vom fehlgeschlagenen Kommando selbst ab. Bei einer Testnachricht wird die Liste verfügbarer `mpre_slave`-Prozesse aktualisiert, bei einer Anforderung für einen CRC-Zustandsübergang kann dieser nicht ausgeführt werden, da die auszuführende Aufgabe in mindestens einem Crate fehlgeschlagen ist.

Kommunikation zwischen den Prozessen

Die Interpretation von Anforderungen, die `MPRE_BOSS` als `rpm`-Server erhält, wird im folgenden näher beschrieben. Wie in Abbildung 4.30 zu erkennen ist, tauscht `MPRE_BOSS` mit allen Prozessen der Online-Software und mit Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers Informationen aus. Insgesamt sind 21 Prozesse beteiligt, wenn alle sieben Crates des Myon-Pretrigger-Systems und die Benutzerschnittstelle `mpre_con` verwendet werden. Nur die Kommunikation zwischen `mpre_srv` und `mpre_slave`, der Transfer von Monitoring-Daten von `mpre_slave` zu `mpre_monitor` und die Übermittlung von Informationen aller Prozesse an `mpre_errlog` sind unabhängig von `MPRE_BOSS`.

Grundsätzlich können drei verschiedene Modi unterschieden werden, in denen das Myon-Pretrigger-System betrieben wird:

- ohne das Einwirken von Prozessen außerhalb des Myon-Pretriggers mit Hilfe der

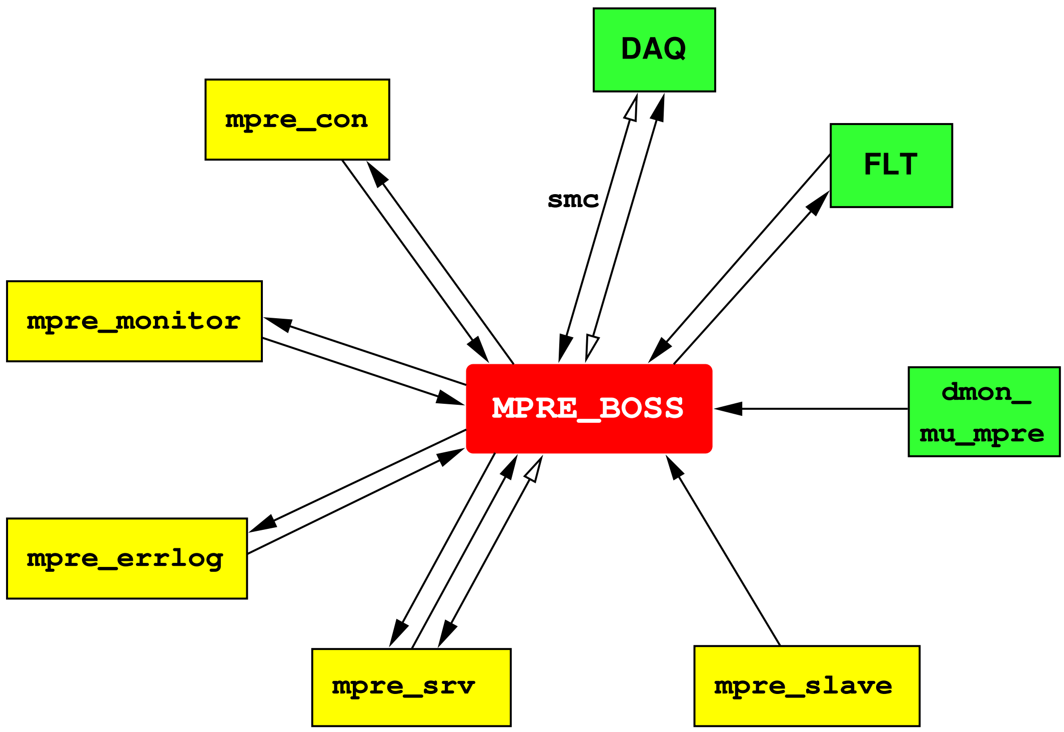

Abb. 4.30: Kommunikation von `MPRE_BOSS` mit anderen Prozessen mittels `rpm` und `smc`. Einfache Pfeile bezeichnen eine Client-Server-Kommunikation, deren Antwort nur eine Bestätigung enthält. Doppelpfeile stehen für das Austauschen von Informationen, wobei die offene Pfeilspitze auf den Client-Prozeß zeigt.

Benutzerschnittstelle mpre_con,

- gesteuert von der Central Run Control für die Datennahme und
- Anforderungen von Prozessen des FLT ausführend.

Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Expertenzugriffe

Für Zugriffe von Experten, die mit Hilfe der Benutzerschnittstelle mpre_con durchgeführt werden, gibt es zwei verschiedene Arten der Kommunikation, abhängig davon, ob die entsprechende Funktion von mpre_srv oder von mpre_slave ausgeführt wird. Der dafür notwendige Austausch von Nachrichten ist in Abbildung 4.31 schematisch dargestellt. In beiden Fällen wird das Ausführen einer bestimmten Funktion von mpre_con bei MPRE_BOSS angefragt (① bzw. ❶). Eine direkte Anfrage bei mpre_srv ist nicht möglich, da einerseits die Zugriffe eine Aktualisierung von Systemzustand oder -übergang notwendig machen, die nur MPRE_BOSS vornehmen kann. Andererseits gibt es Systemfunktionen, die – aufgrund von MPRE_BOSS bekannten Informationen – an mehrere mpre_srv-Prozesse verteilt werden müssen. Zudem müßte mpre_con eigene Listen der von mpre_slave auszuführenden Kommandos führen, analog zu den oben beschriebenen in MPRE_BOSS implementierten.

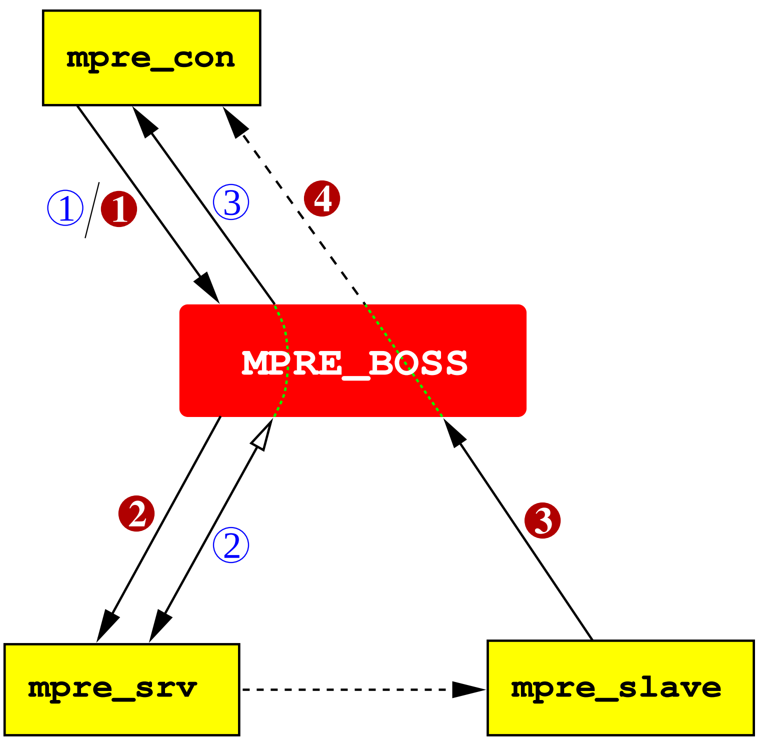

Abb. 4.31: Darstellung der Kommunikation für Expertenzugriffe, die von mpre_srv (① bis ③) oder mpre_slave (❶ bis ❹) ausgeführt werden.

Abhängig von der auszuführenden Funktion aktualisiert `MPRE_BOSS` den Systemzustand und -übergang für die betroffenen Hardware-Module. Wenn `mpre_srv` den Zugriff selbst ausführt, stellt `MPRE_BOSS` sofort die entsprechende Anforderung (②) und erhält eine Bestätigung für die Ausführung oder die Werte gelesener Register. Diese werden gegebenenfalls an `mpre_con` weitergeleitet (③).

Wenn die Funktion dagegen von `mpre_slave` ausgeführt wird, fügt `MPRE_BOSS` der Anforderungs- und Timeout-Liste entsprechende Einträge hinzu, bevor die Anforderung an `mpre_srv` gesendet wird (❷). Von dort wird sie mittels `shm` an `mpre_slave` übergeben und nach einer bestimmten Zeit ausgeführt. Die Antwort von `mpre_slave` kann eine Bestätigung für die Ausführung einer Funktion, z. B. das Laden einer LUT, oder ausgelesene Daten von DPRAMs der PCU oder von Test-FIFOs enthalten (❸). Letztere werden aufgrund der großen Datenmenge mittels `rpm_flood` transferiert. Um diese an den ursprünglich anfragenden `mpre_con`-Prozeß weitergeben zu können (❹), hat `MPRE_BOSS` dessen Adresse gespeichert. Da beliebig viele `mpre_con`-Prozesse gleichzeitig ausgeführt werden können, wird die Adresse von `mpre_con` bei dessen Anfrage gespeichert und der Anforderungsnummer zugeordnet. Um die Daten von `MPRE_BOSS` empfangen zu können, wird `mpre_con` bei solchen Zugriffen zu einem `rpm`-Server, bis er die Daten erhalten hat.

Kommunikation für die Datennahme

Während der Datennahme wird die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems durch die Central Run Control der DAQ gesteuert. Die verschiedenen Phasen während der Initialisierung, beim Starten und beim Anhalten der Datennahme werden durch CRC-Zustände charakterisiert. Die Anforderung für den Übergang in einen anderen Zustand wird Run Control-Prozessen der einzelnen Subsysteme des HERA − B Experimentes mit dem `smc`-Protokoll mitgeteilt. Diese wiederum geben die Anforderungen an sogenannte Tochterprozesse weiter, die die notwendigen Aufgaben ausführen. Für die Online-Software des Myon-Pretrigger-Systems nimmt `MPRE_BOSS` diese Funktion wahr. Das erfolgreiche Ausführen der Aufgaben wird von diesen Prozessen bestätigt, so daß die Run Control in den neuen Zustand übergehen kann, sobald alle ihr zugeordneten Tochterprozesse ihre Aufgaben erfüllt haben. Wenn alle Run Control-Prozesse den neuen Zustand angenommen haben, beendet auch die Central Run Control den Zustandsübergang.

In dieser streng hierarchischen Struktur ist keine Kommunikation, die von einer tieferen Ebenen ausgeht, zu einer höheren Ebene möglich. Im Falle von Problemen müssen Tochterprozesse den Zustandsübergang verweigern, so daß letztlich auch die CRC nicht fortfahren kann. Die Definition von Zuständen und Übergängen kann für jeden Prozeß individuell definiert werden. In Abbildung 4.32 ist das Schema für die CRC vereinfacht dargestellt. Es wird auch für Zustände und Übergänge von `MPRE_BOSS` verwendet. Die zwei Meta-Zustände BRAINDEAD und EXIT stehen für das Starten bzw. das Beenden des Prozesses. Im Zustand INITIALIZED ist die Initialisierung des `smc`-Protokolls abgeschlossen, so daß es zur Kommunikation mit dem Prozeß benutzt werden kann. Die Initialisierung des vom Prozeß kontrollierten Teils des Detektor- oder Triggersystems erfolgt beim Übergang in den Zustand READY: Bis zum Zwischenzustand CONFIGURED erfolgen alle Initialisierungen, die für die Kalibrierung des Detektors notwendig

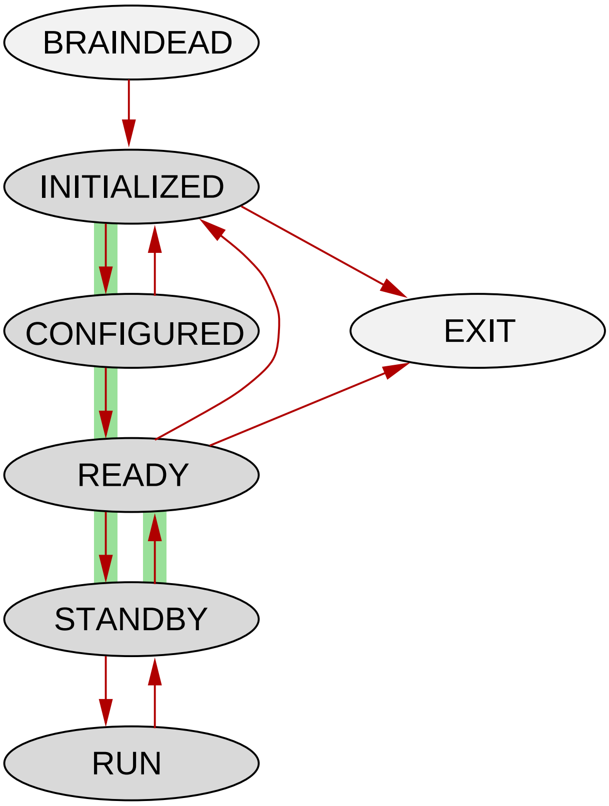

Abb. 4.32: Vereinfachte Darstellung der CRC-Zustände und ihrer Übergänge. Für die dunkel unterlegten Übergänge werden Funktionen von der Online-Software des Myon-Pretriggers ausgeführt.

sind, alle weiteren werden im Übergang in den Zustand READY ausgeführt. In diesem Zustand ist das System vorbereitet, um mit der Datennahme zu beginnen. Dazu wird zunächst in den Zustand STANDBY gewechselt, in dem das ganze System bereits aktiv ist, aber noch pausiert. In diesem Zustand werden die Triggersignale unterdrückt, so daß keine Daten gespeichert werden. Beim Übergang nach RUN wird die Unterdrückung aufgehoben, und die Datennahme beginnt.

Die Aufgaben, die die Online-Software bei CRC-Zustandsübergängen ausführt, sind in Tabelle 4.4 zusammengefaßt. Beim Übergang INITIALIZED → CONFIGURED werden zunächst Testnachrichten geschickt, um sicherzustellen, daß alle kritischen `mpre_slave`-Prozesse verfügbar sind. Danach werden die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Systemfunktionen für das Zurücksetzen von PCUs und PMGs ausgeführt. Die Initialisierung der Hardware-Module erfolgt beim Übergang CONFIGURED → READY. Beim ersten Ausführen dieses Übergangs nach dem Starten von `MPRE_BOSS` werden zuvor die Masken der PCUs auf der Grundlage von in der Datenbank abgelegten Einstellungen bestimmt. Da die LUTs der PMGs geladen werden müssen, dauert diese Aufgabe am längsten. Zum Starten der Datennahme – in READY → STANDBY – wird zuerst die Prozessierung der PCUs und PMGs gestartet, dann die auszuführenden Monitoring-Aufgaben. Da das Monitoring fehlerhafte Ergebnisse erzeugt, wenn keine Datenprozes-

Tab. 4.4: Ausgeführte Aufgaben der Online-Software bei CRC-Zustandsübergängen. Übergänge in neue Systemzustände der Hardware-Module sind zusätzlich angegeben.

CRC-Übergang	Ausgeführte Aufgaben
INITIALIZED → CONFIGURED	Senden von Testnachrichten Zurücksetzen von PCUs und PMGs (→ ST_RESET)
CONFIGURED → READY	Gegebenenfalls Bestimmung der PCU-Masken Initialisieren von PCUs und PMGs (→ ST_INITIALIZED)
READY → STANDBY	Starten der Prozessierung von PCUs und PMGs (→ ST_RUNNING) Starten des Monitorings
STANDBY → READY	Stoppen des Monitorings Stoppen der Prozessierung von PCUs und PMGs (→ ST_STOPPED)

sierung der Hardware-Module erfolgt, wird im umgekehrten Übergang beim Anhalten der Datennahme zunächst das Monitoring und danach die Prozessierung gestoppt.

Zur Durchführung der beschriebenen Aufgaben werden teilweise Zeiträume von etwa 60 s benötigt, Informationen werden an sieben verschiedene `mpre_srv`-Prozesse verteilt, und von sieben `mpre_slave`-Prozessen empfangene Nachrichten werden von `MPRE_BOSS` ausgewertet. Die hierzu notwendige Kommunikation ist in Abbildung 4.33 dargestellt.

① `MPRE_BOSS` reagiert auf die Anforderung der Central Run Control, einen Zustandsübergang auszuführen, indem er zunächst bestätigt, daß die Aufgabe ausgeführt wird, aber noch nicht abgeschlossen ist. Abhängig vom angeforderten Übergang wird überprüft, ob sich die Hardware-Module in einem dafür geeigneten Systemzustand befinden. Ist dies nicht der Fall, werden sie durch Ausführen der geeigneten Systemfunktionen dorthin gebracht. Wenn etwa der CRC-Übergang CONFIGURED → READY angefordert wird, die Hardware aber den Systemzustand ST_UNKNOWN einnimmt, werden die PCUs und PMGs zuvor zurückgesetzt und damit in den Systemzustand ST_RESET überführt.

② Die Nachrichten an die `mpre_srv`-Prozesse enthalten Informationen über die auszuführenden Aufgaben und Parameter, unter anderem für das Monitoring und den Typ der zu ladenden LUTs. Da die Aufgaben an `mpre_slave` weitergegeben werden, ordnet `MPRE_BOSS` die Kommandos zuvor in die beiden Listen ein.

③ Die `mpre_slave`-Prozesse antworten mit Bestätigungen oder Fehlermeldungen für die auszuführenden Kommandos.

④ Sobald die Nachrichten von allen kritischen `mpre_slave`-Prozessen gesammelt sind,

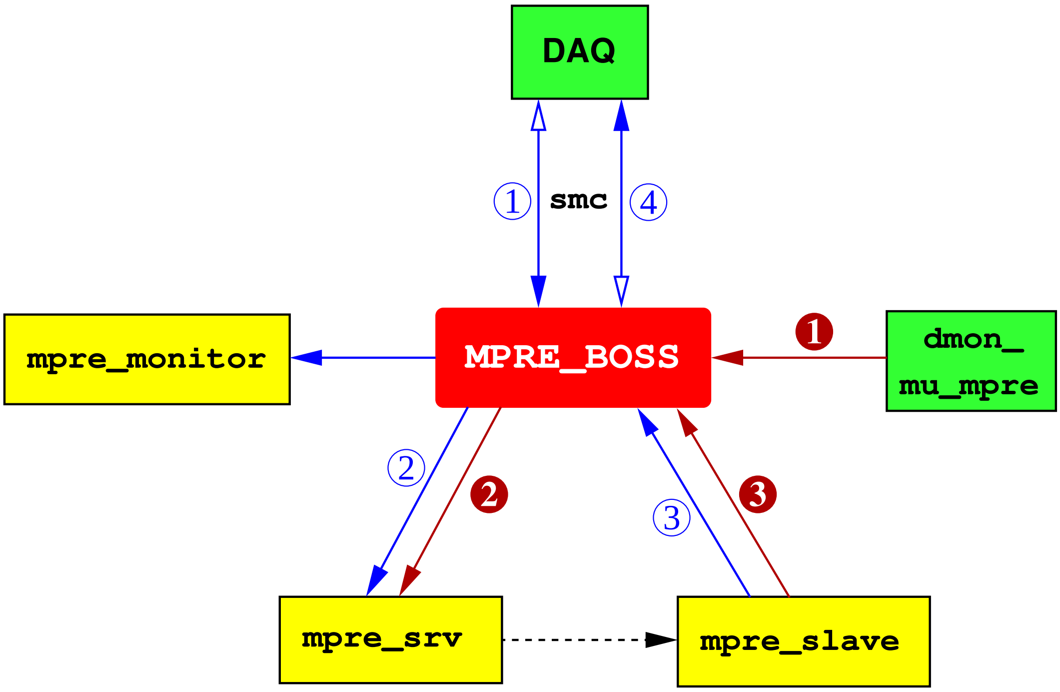

Abb. 4.33: Darstellung der Kommunikation für die Datennahme. Dazu gehören die Bearbeitung von Anforderungen für CRC-Zustandsübergänge (① bis ④) und von Informationen für die Maskierung von Datenkanälen (❶ bis ❸). Veränderungen der verfügbaren `mpre_slave`-Prozesse werden `mpre_monitor` mitgeteilt.

fordert `MPRE_BOSS` bei der Central Run Control eine weitere Anfrage für den anhängigen CRC-Zustandsübergang an. Auf diese Anfrage antwortet `MPRE_BOSS`, wenn alle kritischen `mpre_slave`-Prozesse die Aufgaben korrekt ausgeführt haben, mit einer Bestätigung für den abgeschlossenen Übergang oder andernfalls mit einer Zurückweisung des Übergangs. Letzteres verhindert weitere CRC-Zustandsübergänge und damit die Datennahme, da das Myon-Pretrigger-System nicht korrekt funktioniert.

Unabhängig von CRC-Zustandsübergängen wird die Maskierung von Datenkanälen aufgrund heißer Pads aktualisiert. Der Prozeß `dmon_mu_mpre` [Buc 01] bestimmt während der Datennahme anhand von Daten, die mit einem Zufallstrigger ausgewählt werden, ob Pads heiß sind. Wenn die Trefferrate eines Pads entweder von der aktuellen Wechselwirkungsrate abhängige globale oder individuell für jedes Pad bestimmte Schwellen überschreitet, wird es als heiß bezeichnet und muß im Myon-Pretrigger-System ausmaskiert werden, um die Rate erzeugter FLT-Nachrichten nicht zu beeinflussen. Diese Pads werden in der Datenbank gespeichert. Um die Auswirkungen statistischer Schwankungen zu minimieren, müssen vor einer Änderung des Eintrages in der Datenbank mindestens 2000 zufallsgetriggerte Ereignisse verarbeitet werden, signifikante Veränderungen der als heiß bezeichneten Pads vorliegen und eine festgelegte Zeitdauer seit der letzten Aktualisierung vergangen sein. Erfahrungen im Betrieb des Systems haben gezeigt, daß hier ein Wert von 12 Minuten geeignet ist.

❶ Nach dem Eintrag in der Datenbank teilt `dmon_mu_mpre` `MPRE_BOSS` mit, daß es Veränderungen bei den heißen Pads gibt und wo in der Datenbank die aktuellen Informationen gespeichert sind. Daraufhin liest `MPRE_BOSS` die Daten aus und bestimmt auf ihrer Grundlage neue Masken für die PCUs. Wenn sich diese von den bisherigen Masken unterscheiden, werden die neuen Masken-Werte in der Datenbank gespeichert. Befinden sich die Hardware-Module im Systemzustand ST_INITIALIZED, ST_RUNNING oder ST_STOPPED, werden die PCUs zur Änderung der Maskierung neu initialisiert.

❷ Dazu werden an die `mpre_srv`-Prozesse Anforderungen gesendet, das Monitoring zu stoppen, die Datenprozessierung von PCUs und PMGs anzuhalten, die PCUs zurückzusetzen und neu zu initialisieren und anschließend die Datenprozessierung und das Monitoring neu zu starten. Das Stoppen und Starten von Prozessierung und Monitoring erfolgt nur, wenn der Systemzustand ST_RUNNING eingenommen wird.

❸ Die Funktionen werden von `mpre_slave` ausgeführt und ihr Ergebnis `MPRE_BOSS` mitgeteilt.

Eine erneute Initialisierung der PMGs ist nicht notwendig und wäre wegen des Ladens der LUTs sehr zeitaufwendig. Da während der Aktualisierung der PCU-Masken keine Datenprozessierung stattfindet und somit kein Triggern auf Myon-Spuren möglich ist, muß die dafür aufzuwendende Zeit möglichst gering gehalten werden. Ein Beenden der Datennahme und ein Neustart wären aufgrund der Häufigkeit der Masken-Aktualisierungen, die insbesondere zu Beginn der Datennahme etwa alle 12 Minuten auftreten, nicht sinnvoll. Zudem kann, wie oben beschrieben, ein Tochterprozeß der Run Control wie `MPRE_BOSS` keine Anforderungen für Zustandsübergänge an die Central Run Control senden. In Abschnitt 4.2.9 wird beschrieben, wie dennoch für jedes Ereignis eine eindeutige Zuordnung zu den verwendeten PCU-Masken möglich ist.

Untersuchung des Zeitverhaltens bei CRC-Zustandsübergängen und Aktualisierungen der PCU-Masken

Für eine effiziente Datennahme ist es wichtig, daß die oben beschriebenen Aufgaben der Online-Software bei Anforderungen für CRC-Zustandsübergänge möglichst schnell und zuverlässig durchgeführt werden. Dies gilt in erster Linie bei den Übergängen zwischen den Zuständen READY und STANDBY, die zum Starten und Anhalten der Datennahme häufig ausgeführt werden, und für die Aktualisierung der PCU-Masken. Erfahrungen während der Datennahmeperiode im Jahr 2000 haben jedoch gezeigt, daß das grundlegende Starten aller Prozesse durch die DAQ ebenfalls sehr häufig notwendig gewesen ist. Dies ist hauptsächlich durch viele verschiedene Arten der Datennahme – z. B. mit aktiver Spursuche im FLT oder erst im SLT – und Fehlfunktionen wichtiger Prozesse verursacht worden, die jeweils einen Neustart erforderlich machen. Deshalb müssen auch die Zeiten für die Übergänge bis zum Zustand READY minimiert werden.

Das Zeitverhalten für das Myon-Pretrigger-System wird für das Ende der Datennahme im Jahr 2000, vom 2.8. bis zum 25.8.2000 untersucht. In diesem Zeitraum waren die Online-Software und die Hardware-Module in einem stabilen Zustand, der auch einen Ausblick für das Verhalten des Systems bei Wiederbeginn der Datennahme im Jahr 2001 erlaubt. Die Zeitinformationen über Zustandsänderungen und Masken-Aktualisierungen werden den Logdateien für die genannte Periode entnommen. Die Zeitwerte sind mit einer Genauigkeit von 1 s angegeben, so daß der systematische Fehler eines Wertes mit $\pm$ 0,5 s und einer Differenz mit $\pm$ 0,71 s angenommen wird.

Der untersuchte Zeitraum wird in zwei Abschnitte eingeteilt, da am 18.8.2000 die Zugriffe auf die Datenbank modifiziert worden sind. Zum einen ist auf die allgemein verwendete Datenbank zugegriffen worden, während zuvor lokale Dateien als Datenbank verwendet wurden. Zum anderen ist in vielen Funktionen der Online-Software, die für Aufgaben während der Datennahme benötigt werden, die Struktur der Zugriffe auf die Datenbank modifiziert worden, um die Bearbeitungszeiten der Prozesse zu verkürzen. Unter anderem wird bei Lesezugriffen auf Tabellen, die sich während der Laufzeit der Prozesse nicht verändern, die Tabelle einmal nach dem Starten des Prozesses gelesen und intern gespeichert. So konnte die Zahl der Datenbank-Zugriffe reduziert werden.

In Abbildung 4.34 sind die Meßwerte für die vier CRC-Zustandsübergänge dargestellt, für die die Online-Software Aufgaben ausführt, die arithmetischen Mittelwerte und ihre Fehler sind in Tabelle 4.5 zusammengefaßt. Als Fehler werden die Standardabweichungen der Einzelwerte angegeben, da eine Aussage über den typischen Bereich gegeben werden soll, in dem die Zeitdauer für einen CRC-Zustandsübergang liegen kann. Der für alle berechneten Zeitdifferenzen gleiche systematische Fehler von $\pm$ 0,71 s ist nicht enthalten. In Tabelle 4.5 ist zudem für jedes Ergebnis die Zahl der Übergänge angegeben, die ausgewertet wurden. Die nur beim Neustart der DAQ ausgeführten Übergänge bis zum Zustand READY treten nur etwa 10 % bis 20 % weniger häufig auf als die

Tab. 4.5: Ergebnisse der Zeitmessungen für die CRC-Zustandsübergänge und das Aktualisieren der PCU-Masken. Es sind jeweils die arithmetischen Mittelwerte und die Anzahl der ausgewerteten Vorgänge angegeben. Die Anzahl der Aktualisierungen der PCU-Masken entspricht der Summe der Aktualisierungen der einzelnen Crates.

Zeitmessung	alter DB-Zugriff		neuer DB-Zugriff	
INITIALIZED $\rightarrow$ CONFIGURED	$(0{,}23 \pm 0{,}42)$ s	200	$(0{,}24 \pm 0{,}42)$ s	81
CONFIGURED $\rightarrow$ READY	$(49{,}6 \pm 13{,}1)$ s	160	$(49{,}5 \pm 10{,}0)$ s	77
LUT: PHYS_MM	$(66{,}3 \pm 13{,}4)$ s	42	$(54{,}0 \pm 6{,}1)$ s	59
LUT: PHYS_SM	$(43{,}6 \pm 5{,}9)$ s	118	$(34{,}7 \pm 3{,}8)$ s	18
READY $\rightarrow$ STANDBY	$(15{,}9 \pm 4{,}6)$ s	214	$(4{,}2 \pm 1{,}3)$ s	105
STANDBY $\rightarrow$ READY	$(0{,}59 \pm 0{,}55)$ s	188	$(0{,}21 \pm 0{,}40)$ s	88
Aktualisieren der PCU-Masken	$(15{,}4 \pm 3{,}0)$ s	988	$(3{,}1 \pm 1{,}1)$ s	922

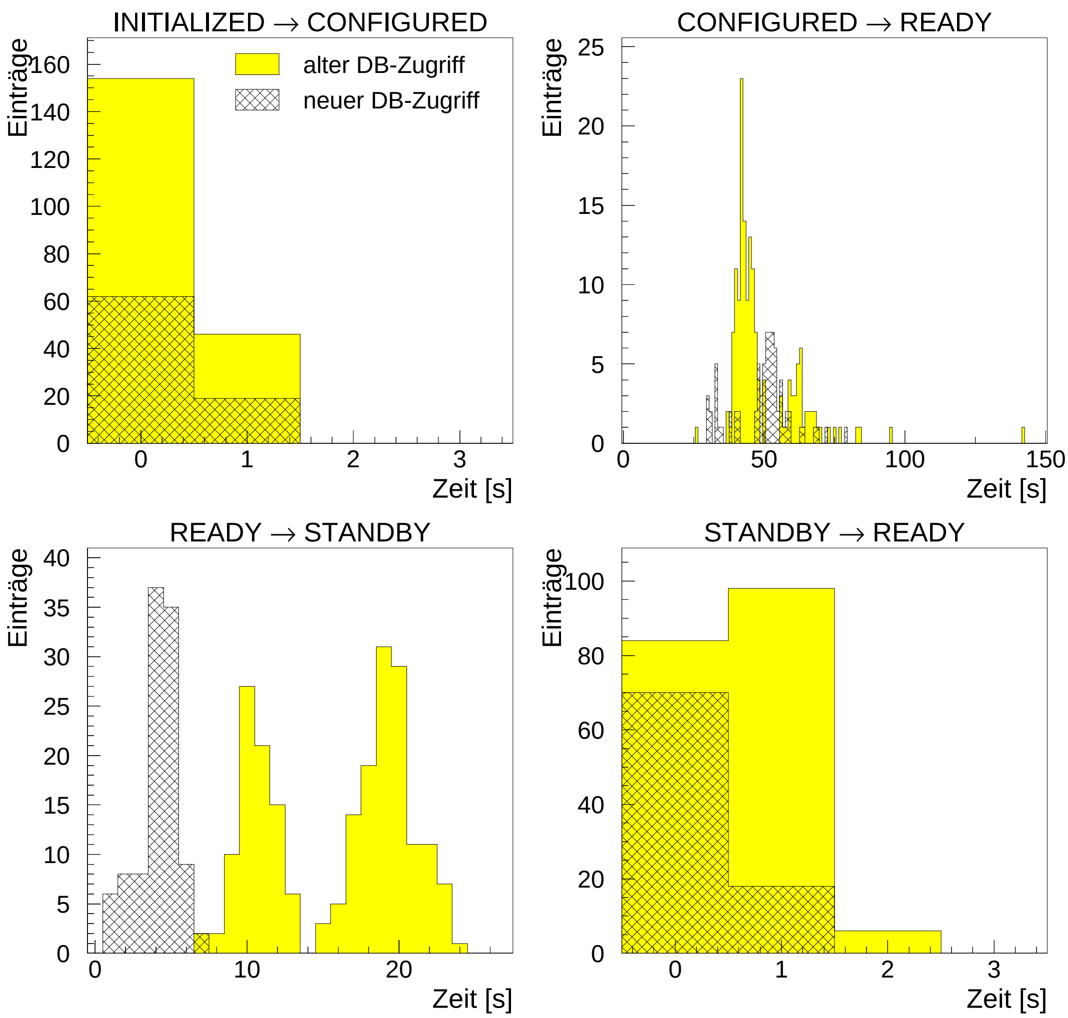

Abb. 4.34: Zeitdauern für das Ausführen der CRC-Zustandsübergänge. Die Werte vor und nach der Modifikation der Datenbank-Zugriffe sind getrennt dargestellt.

Übergänge beim Starten und Anhalten der Datennahme. Dies unterstreicht, wie wichtig die Minimierung der benötigten Zeit für alle Übergänge ist.

Das Senden der Testnachrichten und das Zurücksetzen der PCUs und PMGs in einen definierten Grundzustand im Übergang INITIALIZED → CONFIGURED benötigt höchstens 1 s und ist unbeeinflußt von der Modifikation der Datenbank-Zugriffe, da hier keine Informationen aus der Datenbank gelesen werden.

Der Übergang CONFIGURED → READY benötigt zwischen etwa 40 s und 60 s und somit deutlich länger als die anderen Übergänge. Hauptgrund hierfür ist die für das Laden der LUTs von drei PMGs pro Crate aufzuwendende Zeit. Im Histogramm in Abbildung 4.34 sind zwei Einträge bei 412 s und 207 s nicht eingezeichnet, die auch bei der Berechnung der Mittelwerte nicht berücksichtigt werden. Sie werden durch die Bestimmung der Offset-Werte der POL-Empfänger für die PCUs in allen sieben Crates

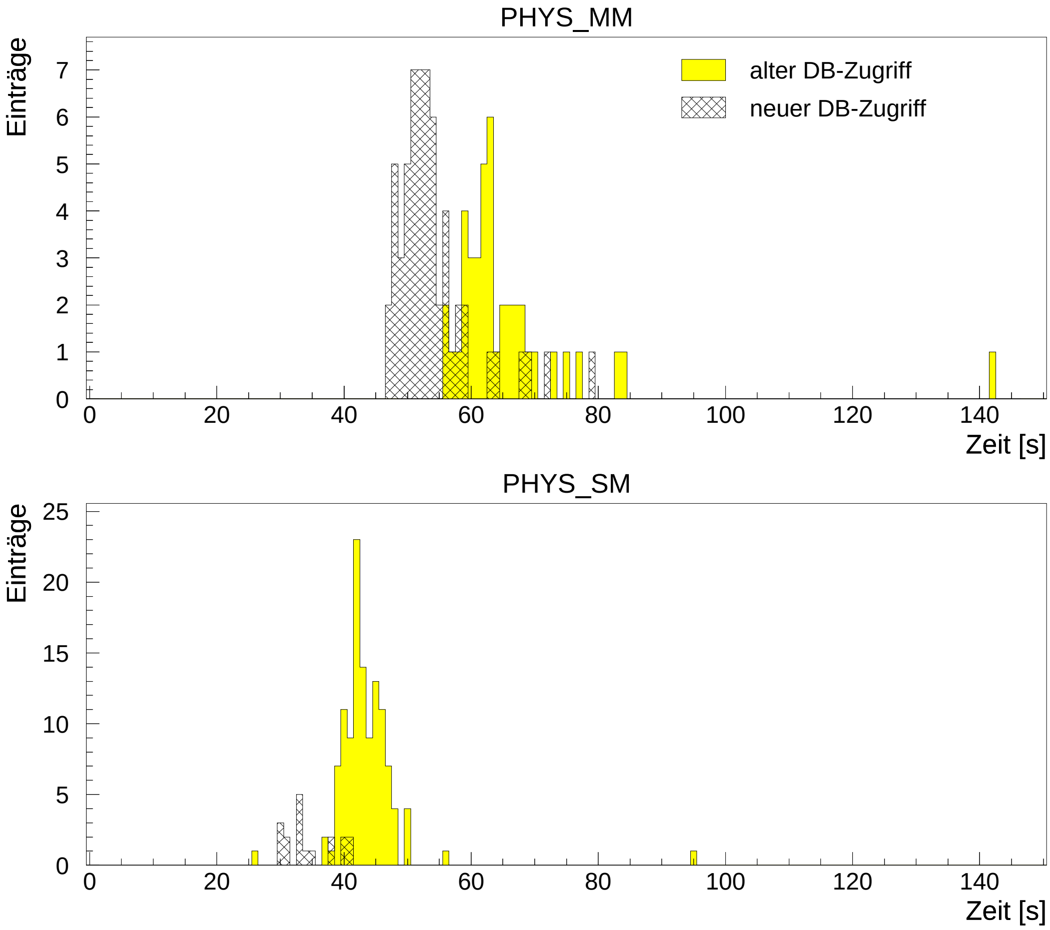

Abb. 4.35: Zeitdauern für den CRC-Zustandsübergang CONFIGURED → READY bei Verwendung der unterschiedlichen LUT-Typen. Die Werte vor und nach der Modifikation der Datenbank-Zugriffe sind getrennt dargestellt.

bzw. in nur einem Crate verursacht. In Abschnitt 4.1.3 ist hierfür eine Abschätzung von etwa 250 s für alle PCUs eines Crates gegeben worden. Wird die Zeitdauer für das Laden der LUTs hinzugezählt, bleibt eine Differenz von etwa 60 s zu dieser Abschätzung. Der Grund hierfür liegt im Auftreten von Fehlern im Protokoll der VME-Schnittstelle der PCU-Mezzanin-Karte. Wenn diese Fehler auftreten, die durch eine geänderte Programmierung eines CPLDs behoben werden können, muß die Bestimmung der Offset-Spannung für den betroffenen POL-Empfänger von neuem begonnen werden. Da in der Regel die in der Datenbank gespeicherten Offset-Werte übernommen werden, werden diese beiden Zeitdauern nicht für die Bestimmung der typischen Werte berücksichtigt.

Entgegen der Erwartung scheint die Zeitdauer für den Übergang nicht von der Änderung der Datenbank-Zugriffe beeinflußt zu werden, obwohl viele Lese- und Schreibzugriffe notwendig sind. Wenn die benötigte Zeit aber in Abhängigkeit vom Typ der LUT dargestellt wird, wie in Abbildung 4.35 und in Tabelle 4.5, ist ihre deutliche Verkürzung

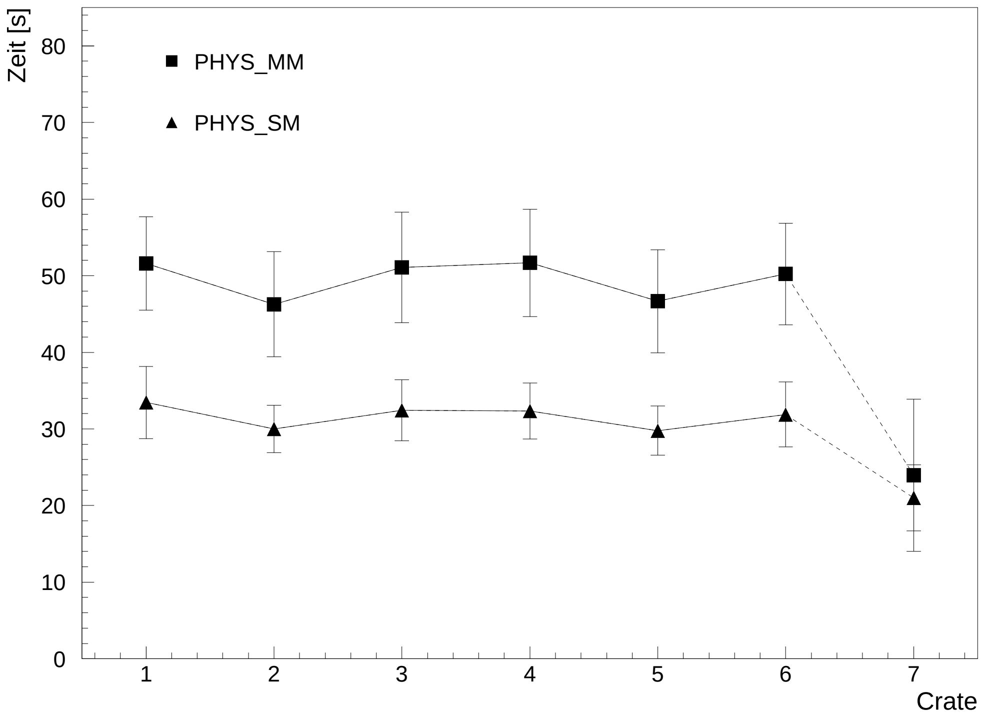

Abb. 4.36: Zeitdauer pro Crate für die auszuführenden Aufgaben beim CRC-Zustandsübergang CONFIGURED → READY. Die Werte für die Periode mit modifizierten Datenbank-Zugriffen sind getrennt nach LUT-Typ dargestellt. Für die PMGs in Crate 7 werden sogenannte transparente LUTs verwendet. Die dargestellten Fehler entsprechen den Standardabweichungen der Einzelwerte.

durch die Modifikation der Datenbank-Zugriffe erkennbar. Zugleich wird deutlich, daß der Übergang bei Verwenden der LUTs vom Typ PHYS_MM etwa 25 % länger dauert als mit LUTs vom Typ PHYS_SM. Wegen der größeren Zahl vom PMG zu erzeugender FLT-Nachrichten sind die Dateien der PHYS_MM-LUTs größer. Das bedeutet, daß die Zeit für das Laden der LUTs nicht nur von der Zahl der VME-Zugriffe, die immer gleich ist, abhängt, sondern auch von der Größe der Datei. Wie in Abschnitt 4.1.3 erwähnt muß dieser Zusammenhang näher untersucht werden, um Möglichkeiten für eine Verringerung des Zeitaufwandes zu finden. Da nach dem 18.8.2000 der Anteil der Datennahme mit dem Beginn der Spursuche im FLT – und damit der Verwendung der LUTs vom Typ PHYS_MM – deutlich größer war als zuvor, bleibt der errechnete Mittelwert für den Übergang CONFIGURED → READY unverändert.

Die Aufgaben bei einem CRC-Zustandsübergang werden von den `mpre_slave`-Prozessen der sieben Crates unabhängig voneinander ausgeführt. Die Dauer für den Übergang wird von demjenigen `mpre_slave`-Prozeß bestimmt, der die meiste Zeit benötigt. In Abbildung 4.36 ist die Zeitdauer in Abhängigkeit vom Crate für die Periode ab dem

18.8.2000 mit modifizierten Datenbank-Zugriffen gezeigt. Für das Pixel-System, dessen PCUs und PMGs in Crate 7 installiert sind, werden sogenannte transparente LUTs verwendet, die die Koinzidenzdaten der PCU in Parameter der FLT-Nachricht kopieren. Da nur zwei PMGs für das Pixel-System benötigt werden, wird der Übergang hier am schnellsten vollzogen. Trotz der großen statistischen Fehler ist zu erkennen, daß für beide Typen von LUTs, PHYS_MM und PHYS_SM, in Crate 2 und 5 weniger Zeit aufgewendet wird als in den Crates 1, 3, 4 und 6, obwohl überall jeweils drei PMGs installiert sind. In den beiden Crates werden jedoch nur 18 Koinzidenzkanäle, verglichen mit 24 in den anderen vier Crates, verwendet. Deshalb ist die Zahl möglicher Koinzidenzen, damit auch die Größe der Dateien für das Laden der LUTs und folglich die dafür aufzuwendende Zeit kleiner.

Für den CRC-Zustandsübergang READY $\rightarrow$ STANDBY, bei dem die Prozessierung der Hardware-Module und das Monitoring gestartet werden, ist anhand der Mittelwerte in Tabelle 4.5 ein deutlicher Unterschied durch die veränderten Datenbank-Zugriffe erkennbar: Der Zeitaufwand kann um etwa einen Faktor 4 reduziert werden. Dies ist in erster Linie auf die vielen Zugriffe auf Informationen der Datenbank beim Starten des Monitorings für die optischen Verbindungen zurückzuführen. Diese Funktion ist auch für die in Abbildung 4.34 zu erkennenden zwei Maxima für die Periode mit alten Datenbank-Zugriffen verantwortlich. Beim ersten Ausführen dieser Monitoring-Aufgabe nach dem Starten von `mpre_slave` war zusätzlich eine große Anzahl von Zugriffen auf die Datenbank notwendig, so daß der erste CRC-Übergang etwa 10 s länger dauerte als jeder weitere. Durch die Modifikation der Datenbank-Zugriffe ist dieser unerwünschte Effekt behoben worden.

Beim Beenden der Datenprozessierung des Myon-Pretrigger-Systems im Übergang STANDBY $\rightarrow$ READY sind nur wenige Zugriffe auf Informationen der Datenbank notwendig, so daß die ohnhin kurze Zeitdauer von im Mittel weniger als 1 s nur geringfügig reduziert wird.

Wesentlich deutlicher fällt der Unterschied bei der Aktualisierung der PCU-Masken aus. Hier wirken sich die Verbesserungen bei den vielen Zugriffen beim Ändern der Datenbank, wenn neue Datenkanäle ausmaskiert werden müssen, und beim Starten des Monitorings für die optischen Verbindungen aus. In Abbildung 4.37 sind die Meßwerte dargestellt, anhand der Mittelwerte in Tabelle 4.5 ist die Verkleinerung der notwendigen Zeit um etwa einen Faktor 5 erkennbar. In diesem Fall ist nicht die maximale Zeitdauer eines `mpre_slave`-Prozesses von Bedeutung, sondern die aufgewendete Zeit für jedes Crate. Hier ist dieselbe Struktur wie beim CRC-Übergang CONFIGURED $\rightarrow$ READY zu erkennen, bei der die Zeitdauer in den Crates 2 und 5 kürzer ist als in den anderen Crates für die Hardware-Module des Pad-Systems. Der Grund hierfür liegt wiederum in der kleineren Zahl verwendeter Koinzidenzkanäle von 18 gegenüber 24 in den anderen vier Crates. Die Werte für Crate 7 sind nur bedingt aussagekräftig, da die Integration des Pixel-Systems gerade bezüglich der Aktualisierung der PCU-Masken noch nicht abgeschlossen ist. Während des Zeitraumes vom 18.8. bis zum 25.8.2000 kam es zu etwa 130 Aktualisierungen der PCU-Masken, entsprechend 16 pro Tag, die zu einer inaktiven Zeit des Myon-Pretrigger-Systems von jeweils 3 s pro Crate geführt haben. Diese Größe einer Totzeit des Myon-Pretrigger-Systems von im Mittel etwa 48 s pro Tag ist

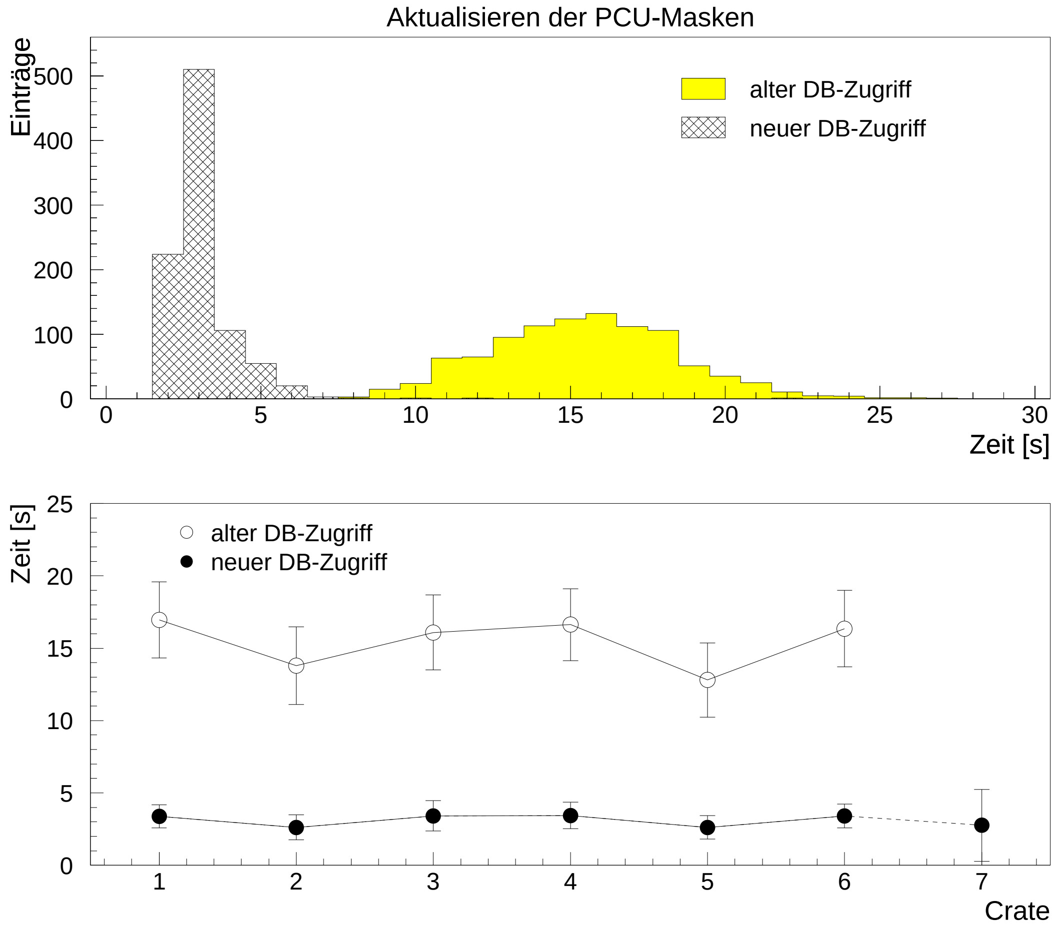

Abb. 4.37: Zeitdauer für das Aktualisieren der PCU-Masken. Für alte und neue Datenbank-Zugriffe getrennt ist die Verteilung auch in Abhängigkeit vom Crate gezeigt. Während der Periode vor der Modifkation der Datenbank-Zugriffe sind die Masken der PCUs in Crate 7 noch nicht modifiziert worden.

akzeptabel.

Insgesamt sind die Zeiten für die Aufgaben bei CRC-Zustandsübergängen für die Datennahme im Jahr 2000 ausreichend gering gewesen. Im Übergang CONFIGURED → READY ist die notwendige Zeitdauer, insbesondere wenn LUTs vom Typ PHYS_MM geladen werden – wie für die zukünftige Datennahme zu erwarten – nicht weit von der des bisher langsamsten Subsystems entfernt: Für das Buchen von Histogrammen zur Beurteilung der Datenqualität werden in diesem CRC-Übergang 64 s benötigt [Sán 00]. Deshalb ist eine Verbesserung beim Laden der LUTs notwendig, oder das Laden muß bereits im CRC-Übergang INITIALIZED → CONFIGURED durchgeführt werden, in dem mehr Zeit zur Verfügung steht. Dies würde weitere Umstrukturierungen der durchgeführten Aufgaben bei CRC-Übergängen notwendig machen. Um die Effizienz der Datennahme zu erhöhen, sind aufgrund der großen Zahl von durchgeführten CRC-Übergängen auch

Verbesserungen beim Übergängen READY → STANDBY und bei der Aktualisierung von PCU-Masken wünschenswert.

Kommunikation mit FLT-Prozessen

Die Kommunkation mit Prozessen des FLT während der Datennahme ist in der Online-Software noch nicht implementiert. Bislang gibt es zwei Arten von Anforderungen, die außerhalb der Datennahme für Tests verwendet werden. Beide beruhen auf der in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Treiberfunktion `pmg_InternalTest`, mit deren Hilfe unabhängige Tests des PMGs auf der Grundlage von am Eingang erzeugten Testmustern möglich sind. Die dabei erzeugten FLT-Nachrichten werden für Tests der Verbindungen zwischen den PMGs und den Track Finding Units (TFU) des FLT und für sogenannte Testvektor-Tests benutzt. Letztere dienen zur Überprüfung des Spursuche-Algorithmus des FLT.

In Abbildung 4.38 ist der Ablauf der Kommunikation, der für beide Tests gleich ist, dargestellt. Ein Prozeß der FLT-Online-Software stellt eine Anfrage an `MPRE_BOSS` (①), im Falle von Verbindungstests für das Erzeugen von FLT-Nachrichten. Diese Anforderung enthält die Informationen, welcher PMG wieviele FLT-Nachrichten erzeugen soll. Der PMG wird durch die Crate- und die Segment-Nummer eindeutig bezeichnet. `MPRE_BOSS` leitet die Anforderung an den `mpre_srv`-Prozeß weiter, der den ausgewählten PMG steuert (②). Dieser erzeugt die angeforderte Zahl von FLT-Nachrichten am Eingang des PMGs, wobei die BX-Nummer fortlaufend und die anderen Parameter der Koinzidenzdaten mit Zufallszahlen generiert werden. Anschließend wird der PMG-Test-FIFO ausgelesen, die Daten in FLT-Nachrichten übersetzt und als Antwort an `MPRE_BOSS`

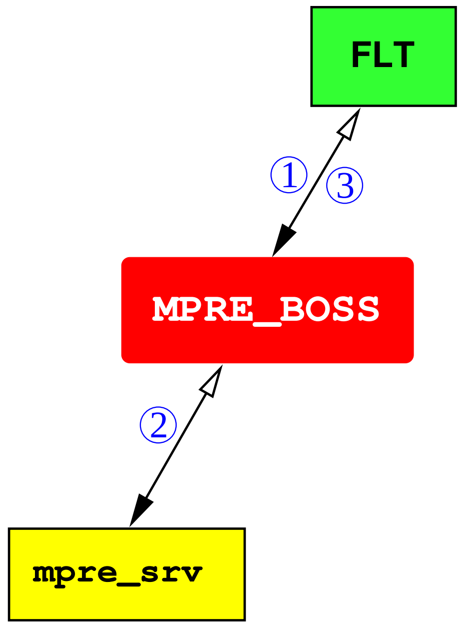

Abb. 4.38: Darstellung der Kommunikation zwischen Prozessen des FLT und `MPRE_BOSS` für Verbindungs- und Testvektor-Tests.

gesendet. Aufgrund der Speichertiefe des PMG-Test-FIFOs wird die Anzahl erzeugter FLT-Nachrichten auf maximal 80 begrenzt. Die Daten der FLT-Nachrichten werden in der Antwort von `MPRE_BOSS` an den anfragenden FLT-Prozeß übermittelt (③). Durch einen Vergleich dieser Daten mit den auf der TFU empfangenen FLT-Nachrichten kann eine Aussage über die Qualität der Verbindungen gemacht werden. Verbindungstests zwischen PMGs und TFUs sind wiederholt durchgeführt worden und haben gezeigt, daß die Verbindungen keine Fehler bei in der Regel 10^5 überprüften Bits der FLT-Nachrichten aufweisen. Wenn Fehler aufgetreten sind, konnte dies immer auf defekte Hardware-Komponenten, wie z. B. LVDS-Multiplexer, zurückgeführt werden. Zukünftig wird es durch eine Automatisierung dieser Tests auch möglich sein, eine größere Zahl von übertragenen Bits zu verwenden.

Mit Hilfe von Testvektor-Tests kann die korrekte Funktion des Spursuche-Algorithmus des FLT überprüft werden. Dazu werden von Prozessen der FLT-Online-Software Spuren simuliert, die die Komponenten des FLT finden müssen. Die Ortskoordinaten der simulierten Spur in der MU3- und MU4-Superlage werden `MPRE_BOSS` mitgeteilt. Aus diesen Informationen berechnet `MPRE_BOSS` die zugehörigen MU3- und MU4-Pads und ob diese Pads die Koinzidenzbedingung erfüllen. Ist dies der Fall, wird das Koinzidenzmuster und der zugehörige PMG bestimmt. Wenn dieser mit den Komponenten des FLT verbunden ist, sendet `MPRE_BOSS` eine Anforderung an den entsprechenden `mpre_srv`-Prozeß, aufgrund der Koinzidenzdaten die korrekten FLT-Nachrichten zu erzeugen. Die Daten der erzeugten FLT-Nachrichten sind in der Antwort von `mpre_srv` enthalten und werden von `MPRE_BOSS` an den anfragenden FLT-Prozeß weitergeleitet.

Bislang sind die dargestellten Funktionen nur für unabhängige Tests verfügbar. Die Erfahrungen beim Betrieb der beiden Systeme, Myon-Pretrigger und FLT, zeigen, daß Verbindungstests unbedingt regelmäßig in automatisierter Form durchgeführt werden müssen, etwa beim Initialisieren des Systems. Dazu sind einige Änderungen notwendig, wie z. B. das Ausführen der Funktion durch `mpre_slave`, da es längere Zeit in Anspruch nimmt und `MPRE_BOSS` und `mpre_srv` währenddessen blockiert. Neben Modifikationen der Kommunikation wird eine Anpassung der Reaktionen auf CRC-Zustandsübergänge in der Online-Software von sowohl Myon-Pretrigger als auch FLT vonnöten sein.

4.2.6 Der Prozeß `mpre_monitor`

Neben der von `MPRE_BOSS` durchgeführten internen Kontrolle der Hardware-Module, der Prozesse der Online-Software und ihrer Kommunikation muß es die Möglichkeit geben, die Qualität der Datennahme mit dem Myon-Pretrigger-System zu beurteilen. Solche Monitoring-Aufgaben dürfen die Prozessierung der Hardware-Module nicht beeinflussen. Da der Datenfluß durch das System, schematisch für das Pad-System in Abbildung 4.39 dargestellt, wesentlich größer ist als die erreichbaren Ausleseraten über den VME-Bus, können Daten nur auf statistischer Basis entnommen werden. Zugleich dürfen die Zugriffe zur Initialisierung und Steuerung der Hardware-Komponenten, die höhere Priorität besitzen, nicht durch die Monitoring-Aufgaben gestört werden.

Der Prozeß `mpre_monitor` sammelt als `rpm`-Server die gesamte Monitoring-Information und stellt sie in geeigneter Weise dar, so daß Rückschlüsse auf die Funktion des Myon-

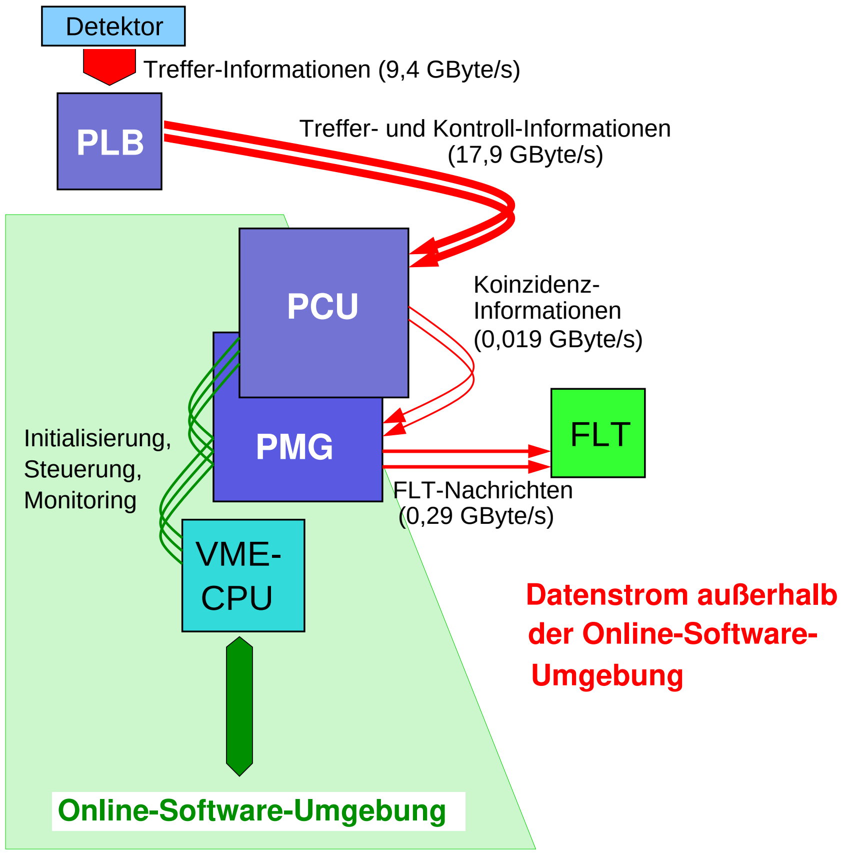

Abb. 4.39: Darstellung der Zugänglichkeit von Informationen für die Online-Software außerhalb des Datenflusses durch das Myon-Pretrigger-System. Die Datenraten entsprechen den Werten für das Pad-System in Abbildung 3.13.

Pretriggers und teilweise des Myon-Detektors möglich sind. Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, führen die verfügbaren `mpre_slave`-Prozesse Monitoring-Aufgaben parallel zu sonstigen Zugriffen, aber mit niedrigerer Priorität aus. Dabei handelt es sich um die Überprüfung der Funktion der optischen Verbindungen zwischen PLB und PCU, die Auslese von Zählerwerten des Koinzidenz-CPLDs auf der PCU sowie von Test-FIFOs auf PCU und PMG. In Abständen von etwa 1 bis 2 Minuten erhält `mpre_monitor` die Daten für die jeweilige Monitoring-Aufgabe von den sieben `mpre_slave`-Prozessen. Da die meisten Nachrichten mit dem zeitaufwendigeren auf `rpm_flood` basierenden Protokoll und fast gleichzeitig gesendet werden, muß die Zeit für die Prozessierung von Daten in `mpre_monitor` minimiert werden. Andernfalls kommt es beim Senden der Daten in `mpre_slave`-Prozessen zu Timeouts kommen, die zum Verlust von Monitoring-Daten führen.

In Abbildung 4.40 ist gezeigt, in welcher Form `mpre_monitor` die aufbereiteten Daten zur Verfügung stellt. Um insbesondere Experten die Möglichkeit zu geben, die Datenqualität des Myon-Pretriggers bereits während der Datennahme beurteilen zu können, werden Informationen in Form von Histogrammen dargestellt. `mpre_monitor` stellt die Histogramme mit Hilfe des `rhp`-Protokolls (Remote Histogramming Package) als Server

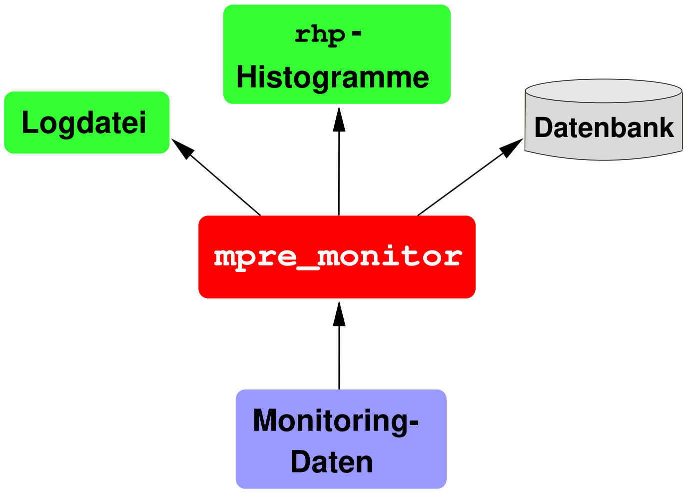

Abb. 4.40: Aufbereitung der Monitoring-Daten durch `mpre_monitor` in Form von Einträgen in die Logdatei, `rhp`-Histogrammen und Einträgen in die Datenbank.

zur Verfügung. Beliebig viele `rhp`-Client-Prozesse können dann auf diese Daten zugreifen und werden automatisch von jeder Aktualisierung der Histogramme verständigt. Auf diese Weise können sowohl detaillierte Informationen für einzelne Koinzidenzkanäle als auch globale Verteilungen für den gesamten Myon-Pretrigger dargestellt werden. Lokale Informationen werden von `mpre_monitor` nach Empfangen der Daten eines `mpre_slave`-Prozesses sofort aktualisiert, während für globale Informationen zunächst die Daten von allen verfügbaren `mpre_slave`-Prozessen gesammelt werden müssen. Deshalb wird `mpre_monitor` jede Änderung bei der Verfügbarkeit von `mpre_slave`-Prozessen von `MPRE_BOSS` mitgeteilt. In Abbildung 4.41 ist als Beispiel für ein globales Histogramm die zweidimensionale Verteilung der Koinzidenzen im Pad-System gezeigt, die aus den Daten aller 132 PCU-Test-FIFOs zusammengesetzt ist. Die Gewichtung des Anteils verschiedener Spalten erfolgt mit Hilfe der Zählerwerte aus dem Koinzidenz-CPLD. Der starke Anstieg der Koinzidenzraten für Pads nahe dem Protonstrahlrohr ist deutlich zu erkennen. Da nicht jederzeit Experten die zur Verfügung stehenden Histogramme überprüfen können, werden die globalen Verteilungen in einem Teil der Datenbank gespeichert, der für die Auswertung der Datenqualität von Subsystemen des HERA – B Experimentes vorgesehen ist. Aufgrund von Beschränkungen des zur Verfügung stehenden Speicherplatzes können die lokalen Verteilungen nicht gespeichert werden. Sie sind ausschließlich während der Datennahme verfügbar.

Deshalb werden zusätzlich wichtige Informationen in der Logdatei festgehalten, unter anderem Koinzidenzraten, Verhältnisse maskierter Datenkanäle und Informationen über die Qualität der optischen Verbindungen. Da einzelne `mpre_slave`-Prozesse nur über einen Teil der Informationen über die Qualität der optischen Verbindungen verfügen, wird die entsprechende Tabelle der Datenbank in regelmäßigen Abständen von `mpre_monitor` aktualisiert. Eine schlechte Funktion von optischen Verbindungen hat Auswirkungen auf die den PCUs zur Verfügung stehenden Daten und damit auf die Effizienz des Myon-Pretrigger-Systems. Deshalb ist eine regelmäßige Aktualisierung und

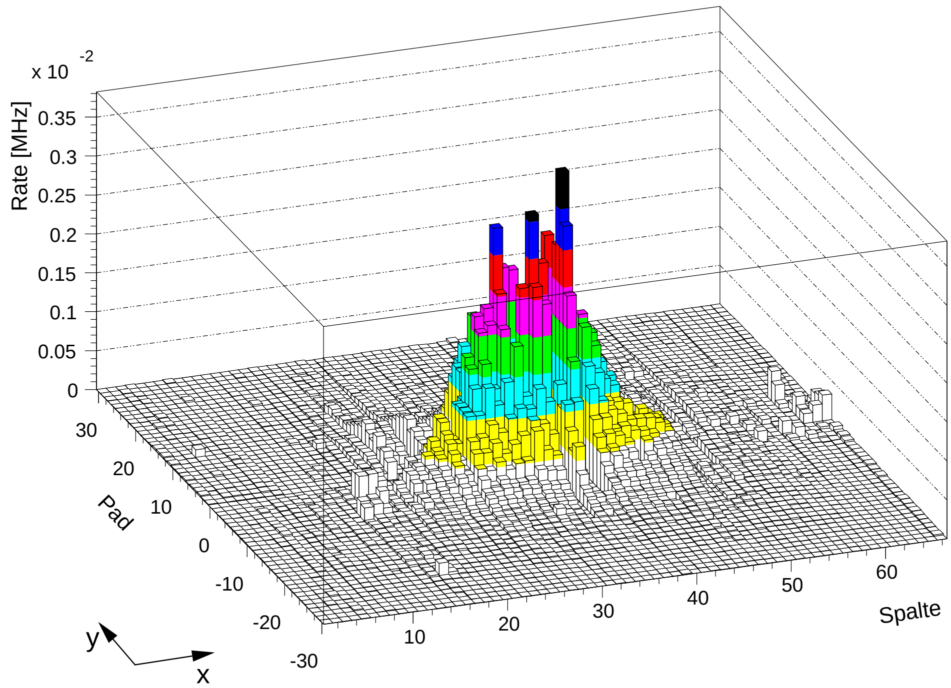

Abb. 4.41: Verteilung der Koinzidenzen im Pad-System aus dem Monitoring der PCU-Test-FIFOs. Die Daten wurden während Run 16927 am 9.8.2000 bei einer Wechselwirkungsrate am Target von 4 MHz aufgezeichnet. Die Numerierung der Spalten und Pads erfolgt gemäß der Definition in Abbildung 2.6.

ein dauerhaftes und allgemein zugängliches Speichern der Daten von großer Bedeutung.

Auswertungen der geschilderten Informationen, die Rückschlüsse auf die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems erlauben, werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.2.7 Der Prozeß `mpre_errlog`

Die Darstellung und das Speichern von wichtigen Informationen über die Funktion der Prozesse der Online-Software ist aus mehreren Gründen von großer Wichtigkeit. Zur Vereinfachung der Fehlersuche sind ausführliche und standardisierte Informationen notwendig. Zur Charakterisierung der Datenqualität des Myon-Pretrigger-Systems können weitere Informationen, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, herangezogen werden.

Der Prozeß `mpre_errlog` erhält solche Informationen mittels `rpm`-Nachrichten von allen Prozessen der Online-Software. Da eine Blockierung von `mpre_errlog` zum Verlust wichtiger Informationen führen würde und deshalb unbedingt vermieden werden muß, führt er keine rechenzeitaufwendigen Prozessierungen durch und ist als reiner `rpm`-Server implementiert. Nur beim Starten und Beenden von `mpre_errlog` sendet er, wie alle anderen Prozesse, eine Mitteilung an `MPRE_BOSS`.

Um eine strukturierte Behandlung von Fehlermeldungen sicherzustellen, besitzen die Nachrichten der Prozesse an `mpre_errlog` ein festes Format. Dies vereinfacht zudem die Lokalisierung von Fehlerquellen auch für Quelldateien, die von verschiedenen Program-

Tab. 4.6: Kategorien der Niveaus für Fehlermeldungen und ihre Bedeutung.

Niveau	Bedeutung
SEV_DEBUG	kein Fehler; zusätzliche Informationen für Tests der Prozesse
SEV_INFO	kein Fehler; Daten zur Funktion der Prozesse und für das Monitoring
SEV_WARNING	potentielle Quelle für einen Fehler; beeinträchtigt die grundsätzliche Funktion aber nicht
SEV_ERROR	Fehler, der die Prozessierung beeinträchtigt, aber ihr Fortsetzen dennoch zuläßt
SEV_SEVERE	Fehler, der zum Stoppen der Prozessierung und möglicherweise zum Absturz des Prozesses führen kann
SEV_FATAL	Fehler, der einen Neustart des Prozesses erforderlich macht

mierern erstellt werden. Eine Fehlermeldung enthält

- den Namen des Prozesses, in dem der Fehler aufgetreten ist,
- den PC bzw. die VME-CPU, auf der der Prozeß ausgeführt wird,
- den Namen der Funktion,
- eine Zeitangabe, wann der Fehler aufgetreten ist,
- ein Fehlerniveau, welches die Schwere des Fehlers charakterisiert,
- die Art des Fehlers und
- gegebenenfalls detailliertere Erläuterungen.

Die Kategorien für das Fehlerniveau sind in Tabelle 4.6 beschrieben. Werden die Prozesse der Online-Software außerhalb der Datennahme von Experten gestartet, stellt `mpre_errlog` die empfangenen Meldungen in einem speziellen Fenster dar, wobei besonders schwerwiegende Fehler durch eine geeignete Formatierung hervorgehoben werden. Wenn die Prozesse von der DAQ gestartet werden, werden alle Meldungen oberhalb des Niveaus SEV_DEBUG zur Darstellung durch Prozesse der DAQ weitergeleitet. In beiden Fällen werden die Meldungen in die jeweils aktuelle Logdatei eingetragen.

4.2.8 Die Benutzerschnittstelle `mpre_con`

Die Benutzerschnittstelle `mpre_con` wird während der Datennahme nicht verwendet, da die Kontrolle des Myon-Pretrigger-Systems durch Anforderungen der Central Run Control ausgeführt wird. Sie wird für Zugriffe von Experten und Tests noch nicht implementierter Funktionen benötigt. Als Grundlage dient die Benutzerschnittstelle `mpcon`, die in Abschnitt 4.1.5 beschrieben wurde.

Auch mit `mpre_con` können alle verfügbaren VME-Zugriffe der Hardware-Module mit Hilfe einer Menüsteuerung ausgeführt werden. Die Kommunikation erfolgt, wie in

Abschnitt 4.2.5 dargestellt, als `rpm`-Client über `MPRE_BOSS`. Nur wenn das Auslesen von DPRAMs oder Test-FIFOs die Rückgabe größerer Datenmengen erforderlich macht, wartet `mpre_con` als `rpm`-Server auf die von `MPRE_BOSS` weitergeleitete Nachricht von `mpre_slave`. Die Verwendung von Steuerskripten wird von `mpre_con` grundsätzlich unterstützt, ist aber wegen der Aufteilung der Hardware-Zugriffe zwischen `mpre_srv` und `mpre_slave` nicht praktikabel. Da `mpre_srv` nach Übertragen der Anforderung in das SHM bereits `MPRE_BOSS` antwortet, kann mit dem Ausführen des Steuerskriptes fortgefahren werden, bevor `mpre_slave` die Funktion ausgeführt hat. Die zeitliche Abfolge der Kommandos im Steuerskript bleibt also nicht erhalten. Aus diesem Grund gibt es auch keine Möglichkeit, Steuerskripte von `mpre_con` erstellen zu lassen.

Zusätzlich zu den Menüs für das Ausführen der Treiber- und Systemtestfunktionen können in `mpre_con` weitere Funktionen ausgewählt werden. Dazu gehören die beschriebenen System- und Monitoring-Funktionen, die von `mpre_slave` durchgeführt werden, sowie Anforderungen an `MPRE_BOSS`, Testnachrichten zu senden und Informationen über den aktuellen Systemzustand der Hardware darzustellen. Für Tests der Kommunikation mit Prozessen der FLT-Online-Software und mit `dmon_mu_mpre`, können auch ohne die Benutzung dieser Prozesse Anforderungen von `mpre_con` an `MPRE_BOSS` gerichtet werden. Da bis in die letzten Wochen der Datennahme im Jahr 2000 statt der Datenbank lokale Dateien zum Speichern der Informationen verwendet wurden, gibt es in `mpre_con` Funktionen zum Transfer zwischen beiden Arten von Datenbank und zum Vergleich ihrer Daten. So konnten die Routinen für den Zugriff auf die Datenbank ausführlich getestet werden, um sicherzustellen, daß die Daten mit den in den zuvor verwendeten Dateien konsistent sind.

4.2.9 Die Datenbank

Die Datenbank für den Myon-Pretrigger wird verwendet, um für die Funktion der Online-Software wichtige Informationen zur Verfügung zu stellen und Informationen für eine spätere Beurteilung der Datenqualität dauerhaft zu speichern.

Die Datenbank für das HERA – B Experiment [Amo 00] wird aus Tabellen aufgebaut, für die beliebig viele Versionen gespeichert werden können. Die Version einer Tabelle wird durch zwei jeweils 32 Bits umfassende Zahlen, eine Major- und eine Minor-Nummer (engl. für Haupt- und Neben-Nummer) charakterisiert. Bei Änderung von Parametern, die die Kalibrierung wichtiger Subkomponenten des Detektors oder des Triggers beeinflussen, kann zusätzlich zu einer neuen Version der entsprechenden Tabelle ein sogenannter Schlüssel erzeugt werden. Er dient der Zordnung jeden gespeicherten Ereignisses des Experimentes zu der korrekten Version dieser Tabelle. Für Schreib- und Lesezugriffe auf Tabellen der Datenbank stehen spezielle Bibliotheksfunktionen zur Verfügung [MIZ 95]. Auf ihrer Grundlage sind Zugriffsfunktionen für die Datenbank des Myon-Pretriggers entwickelt worden, die das Lesen, Durchsuchen und Ändern der Tabellen ermöglichen. Sie werden in [Bec 01] näher beschrieben. Da bis auf die letzten Wochen der Datennahme im Jahr 2000 nicht die beschriebene Datenbank, sondern lokale Dateien an ihrer Stelle verwendet worden sind, erlauben diese Zugriffsfunktionen die Verwendung beider Arten von Datenbanken und den Transfer von Informationen zwischen ihnen.

Tab. 4.7: Tabellen der Datenbank für den Myon-Pretrigger mit einer Kurzbeschreibung ihres Inhalts.

Tabelle	Inhalt
MAP	Zuordnung von Detektorspalten zu Kanälen der Myon-Pretrigger-Hardware
CRATE	Zuordnung von VME-CPUs zu Crates
SETUP	Auswahl von PCUs und PMGs
LINK_QUALITY	Schwellen für die Bestimmung der Qualität der optischen Verbindungen
RUN_SETTING	Einstellungen für die Initialisierung, das Monitoring, die Maskierung und die kritischen `mpre_slave`-Prozesse
BOARD	Hardware-Eigenschaften der PCUs und PMGs
LOGICAL_PCU	spezifische Eigenschaften der PCUs
LOGICAL_PMG	spezifische Eigenschaften der PMGs
MASK_BP	Vorlage für die PCU-Masken
PCU_MASK	aktuelle Werte der PCU-Masken
PCU_OFFSET	Offset-Werte für die POL-Empfänger
OPT_LINK	Qualität der optischen Verbindungen
det_hot_channels	von `dmon_mu_mpre` erstellte Liste der heißen Detektorkanäle

Die Tabellen der Datenbank für den Myon-Pretrigger können nach ihrer Funktion in vier Gruppen unterteilt werden, wie es in Tabelle 4.7 angedeutet ist. Es werden Tabellen unterschieden, die nur von Experten verändert werden, eingeteilt nach der Häufigkeit der Änderungen in zwei Gruppen, und Tabellen, die von Prozessen der Online-Software dynamisch aktualisiert werden. Die Tabelle det_hot_channels, die von einem Prozeß außerhalb des Myon-Pretriggers geändert wird, wird zusätzlich von den anderen unterschieden.

Die Tabelle MAP enthält die Zuordnung zwischen den Spalten des Detektors und den Kanälen von PLBs, PCUs und PMGs sowie der optischen Faser des POLs, der den PLB-Kanal mit dem PCU-Eingang verbindet. Diese Informationen werden im Normalfall nicht verändert. Dies gilt auch für die in der Tabelle CRATE gespeicherte Zuordnung von Crates zu den VME-CPUs, die die Zugriffe auf die Hardware-Module in dem Crate vornehmen.

Veränderungen der zweiten Gruppe der Datenbank sind häufiger notwendig. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Einstellungen für die Benutzung des Myon-Pretrigger-Systems zur Datennahme. Mit Einträgen in der Tabelle SETUP können beliebige Gruppen von PCUs und PMGs zusammengefaßt werden, die analog zu den Modulen mit bestimmten Hardware-Status wie z. B. PLUGGED oder CABLED behandelt werden. Damit wird eine zusätzliche Flexibilität insbesondere für Tests erreicht. Zur Beurteilung der Qualität der optischen Verbindungen werden Schwellen für die Fehlerraten defi-

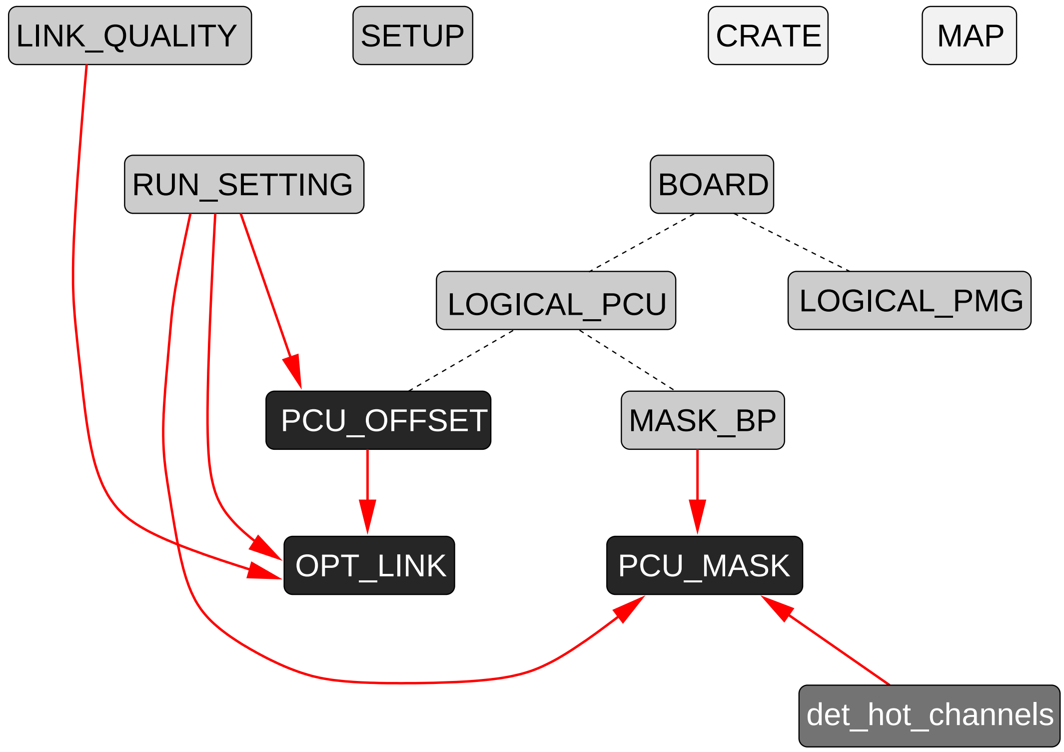

Abb. 4.42: Direkte Abhängigkeiten zwischen den Tabellen der Datenbank. Indirekte Abhängigkeiten, z. B. von der Zuordnung der Detektor- zu den Hardware-Kanälen in der Tabelle MAP sind nicht dargestellt. Die Unterteilung in vier Gruppen von Tabellen ist durch die unterschiedlichen Graustufen hervorgehoben.

niert und in der Tabelle LINK_QUALITY gespeichert. Grundsätzliche Einstellungen für die Datennahme werden in der Tabelle RUN_SETTING festgelegt. Dazu gehören die Auswahl der verwendeten Hardware-Module, ob die Offset-Werte der POL-Empfänger neu bestimmt werden sollen oder welche optischen Verbindungen benutzt werden. Hierzu werden diese gemäß der Rate auftretender Fehler in Kategorien eingeteilt, die in Kapitel 5 detailliert beschrieben werden. Es wird festgelegt, welche Monitoring-Aufgaben mit welchen Parametern, wie z. B. der Periode für ihre Ausführung, durchgeführt werden. Zudem gibt es Einstellungen für die Aktualisierung von Masken, und die kritischen `mpre_slave`-Prozesse werden ausgewählt. In Abbildung 4.42, in der die direkten Zusamenhänge zwischen den Teilen der Datenbank dargestellt sind, wird die zentrale Bedeutung der Informationen in RUN_SETTING verdeutlicht.

Jedes Hardware-Modul in einem Steckplatz wird mit einer sogenannten ID-Nummer bezeichnet, die sich aus dem Typ, d. h. PCU oder PMG, der Crate-Nummer und der Position innerhalb des Crates zusammensetzt. Die ID-Nummer bleibt beim Austausch eines Hardware-Moduls gegen ein anderes, das im selben Steckplatz installiert wird, unverändert. Sie wird deshalb bei der Definition der Eigenschaften der PCUs und PMGs verwendet, um die Einträge in verschiedenen Tabellen miteinander verbinden zu können. Die an ein Hardware-Modul gebundenen Eigenschaften, wie seine Seriennumer und sein

Status, sind in der Tabelle BOARD zusammengefaßt, während in LOGICAL_PCU und LOGICAL_PMG die spezifischen Eigenschaften enthalten sind. Für PCUs sind dies unter anderem die Zuordnung der optischen Verbindungen am Eingang und ein Eintrag für jeden Koinzidenzkanal, ob er korrekt funktioniert. So können im Fall eines fehlerhaften Koinzidenzkanals die anderen drei auf derselben PCU weiterhin verwendet werden. Die Einstellungen für PMGs umfassen im wesentlichen die Dateien, in denen die Daten der verschiedenen LUT-Typen enthalten sind. Bei der Bestimmung der PCU-Masken werden als Grundlage sogenannte Blueprint-Masken (engl. für Blaupausen) verwendet. In der zugehörigen Tabelle MASK_BP ist für jede PCU festgelegt, welche Datenkanäle aufgrund von Defekten immer ausmaskiert sein müssen. Wenn etwa die Treiberbausteine für die Übertragung der Daten der MU4-Randspalten defekt sind, muß für die betroffene PCU diese MU4-Spalte ausmaskiert werden.

Die auf den PCUs verwendeten Masken werden in der Tabelle PCU_MASK gespeichert. Sie setzen sich aus den Blueprint-Masken und den weiteren Informationen – abhängig von den Einstellungen in RUN_SETTING – zusammen. In der Regel werden auch defekte Koinzidenkanäle und die heißen Detektorkanäle, die von `dmon_mu_mpre` in der Tabelle det_hot_channels abgelegt werden, ausmaskiert. Wie auch die weiteren Teile der Datenbank werden die Daten in PCU_MASK von Prozessen der Online-Software aktualisiert. Da die Maskierung von Datenkanälen zu einer Verringerung der Akzeptanz des Myon-Pretriggers führt, muß diese Information nicht nur in der Datenbank gespeichert werden, sondern auch einzelnen Ereignissen zugeordnet werden können. Deshalb wird bei jeder Aktualisierung von PCU_MASK ein neuer Schlüssel erzeugt.

Die aktuellen Offset-Werte der POL-Empfänger sind in der Tabelle PCU_OFFSET abgelegt, aus der sie bei der Initialisierung des Systems ausgelesen werden. Durch einen Eintrag in RUN_SETTING kann eine Neubestimmung der Werte angefordert werden, die, wie in Abschnitt 4.2.5 gezeigt, sehr zeitaufwendig ist. Wenn kein zusammenhängender Bereich von Offset-Spannungen gefunden wird, in dem die Verbindung korrekt funktioniert, oder wenn dieser Bereich sehr klein ist, wird die optische Verbindung in der Tabelle OPT_LINK als grundsätzlich defekt gespeichert. Gemäß der in LINK_QUALITY definierten Schwellen werden dort auch die Verbindungen eingetragen, für die im Monitoring Fehler gefunden werden. Auswertungen der Informationen über die Maskierung und die Qualität der optischen Verbindungen werden in Kapitel 5 gegeben.

Die vorgestellte Struktur der Datenbank enthält alle relevanten Informationen für die PCUs und PMGs des Myon-Pretrigger-Systems und stellt mit der Maskierung und der Qualität der optischen Verbindungen die zwei zentralen Größen für eine Beurteilung der Datenqualität des Systems zur Verfügung. Einzig die Informationen über die installierten PLBs sind zukünftig hinzuzufügen, um die Lokalisierung von Fehlern zu vereinfachen, die an der Schnittstelle zwischen PLBs und PCUs auftreten.

4.3 Zusammenfassung und Vorschläge für Erweiterungen der Online-Software

Im Rahmen dieser Arbeit ist Software entwickelt worden, die den Betrieb und das Testen von einzelnen Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems, von Minimalsystemen und des Gesamtsystems im HERA – B Experiment ermöglicht.

Mit der Entwicklung von Treiberfunktionen wird jeder von den Hardware-Modulen unterstützte Zugriff auf PFEDS, PCU, PMG und PMM verfügbar gemacht. Sie verwenden Bibliotheksfunktionen, die die elementaren VME-Zugriffe auf einer VME-CPU ausführen, die auch im HERA – B Experiment verwendet wird. Dies erleichtert – zusammen mit dem modularen Aufbau der gesamten Software – die Verwendung dieser Funktionen als Grundlage der Online-Software. Da die Hardware-Module keine Prozessoren enthalten, werden komplexe Funktionen in der Software implementiert. Dazu gehören die Einstellungen der optischen Verbindungen, die Auslese der DPRAMs der PCU und von Test-FIFOs auf PCU und PMG, die auch für das Monitoring der Funktion des Myon-Pretrigger-Systems von großer Bedeutung sind. Die ebenfalls ausführlich beschriebenen Treiberfunktionen für das Erzeugen von Testdaten am Eingang des PMGs und das Laden der LUTs sind wichtig für Verbindungstests mit den FLT-Modulen und die Initialisierung des Gesamtsystems.

Um Einzelkomponenten und Minimalsysteme in großer Zahl und mit hoher Genauigkeit testen zu können, ist Software für automatisierte und flexible Systemtests entwickelt worden. Systemtests basieren auf der Erzeugung von Referenzdateien mit einer als korrekt funktionierend bekannten Konfiguration von Hardware-Modulen. Da nur geringe Einschränkungen an die Konfiguration und die Erzeugung von Testmustern gestellt werden dürfen, ist die Erstellung von Referenzdateien auf der Basis von Daten aus PCU- oder PMG-Test-FIFOs sehr aufwendig. Die Durchführung der eigentlichen Systemtests basiert auf der Auslese von Test-FIFO-Daten, die mit den Referenzdaten verglichen werden. Bis zu relativen Fehlerraten von weniger als 10^{-7}, begrenzt durch die verfügbare Meßdauer, konnte die korrekte Funktion der Komponenten des Myon-Pretrigger-Systems mit Hilfe dieser Funktionen bestätigt werden.

Mit Hilfe der Benutzerschnittstelle `mpcon` können Treiber- und Systemtestfunktionen ausgeführt werden. Sie beinhaltet Menüs, mit deren Hilfe alle Funktionen durchgeführt werden können, und Steuerskripte, die häufig zu wiederholende Abfolgen von Zugriffen vereinfachen und reproduzierbar machen. In beiden Fällen steht dem Benutzer eine einfache Adressierung der Hardware-Einheiten zur Verfügung.

Die Software für den Betrieb von Einzelkomponenten und Minimalsystemen erfüllt alle gestellten Anforderungen vollständig und zuverlässig. Bei der Einstellung der Offset-Spannungen der POL-Empfänger, die etwa 250 s für ein vollständig installiertes Crate benötigt, sind systematische Untersuchungen durchzuführen, ob die Wartezeit nach der Einstellung der Werte verkürzt werden kann.

Für das gesamte Myon-Pretrigger-System müssen etwa 60 Hardware-Module, die in sieben Crates installiert sind, mit Hilfe von VME-Zugriffen initialisiert, gesteuert und überwacht werden. Dazu ist die in die Datennahmeumgebung des HERA – B Experimentes integrierte Online-Software entwickelt worden, die für eine zuverlässige und schnelle Ausführung der Aufgaben sorgt. Sie setzt sich aus sechs verschiedenen Arten von Prozessen mit unterschiedlichen Aufgaben zusammen und verwendet für die Kommunikation zwischen den Prozessen die für HERA – B spezifischen Protokolle `rpm` und `smc`.

Auf jeder VME-CPU werden ein `mpre_srv`- und ein `mpre_slave`-Prozeß betrieben, die alle Zugriffe auf die Hardware-Komponenten in einem Crate ausführen, wobei länger dauernde Kommandos von `mpre_slave` bearbeitet werden. Dazu gehören vor allem Monitoring- und Systemfunktionen. Das Monitoring für das Myon-Pretrigger-System basiert auf den Informationen über die Qualität der optischen Verbindungen zwischen PLB und PCU, den Zählerwerten aus den Koinzidenz-CPLDs der PCU und den Test-FIFO-Daten von PCU und PMG. Die Auswertung dieser Informationen erfolgt kontinuierlich und ohne Störung der Datenprozessierung. Die Systemfunktionen fassen die für grundlegende Aufgaben, wie z. B. das Zurücksetzen oder Initialisieren von PCUs oder PMGs, notwendigen Treiberfunktionen zusammen. Neben der Ausführung von weniger als etwa 1 s dauernden Hardware-Zugriffen und der Weitergabe von länger dauernden an `mpre_slave`, führt `mpre_srv` Kontrollfunktionen von `mpre_slave` und dem Shared Memory, das zur Kommunikation zwischen beiden Prozessen dient, durch. Das SHM wird verwendet, um Ringschlüsse zwischen drei Prozessen zu vermeiden, die auftreten können, wenn alle das `rpm`-Protokoll verwenden. Um mehrere Anforderungen für Zugriffe zwischenspeichern und ihnen verschiedene Prioritäten zuweisen zu können, ist eine FIFO-artige Struktur mit drei Hierarchie-Stufen im SHM implementiert. Untersuchungen des Zeitverhaltens haben gezeigt, daß typische Werte für das Starten von `mpre_slave` und die Initialisierungen des SHM bei weniger als 200 ms liegen und somit ausreichend schnell ausgeführt werden. Selten sind jedoch sehr große Zeitdauern, in Einzelfällen bis 30 s aufgetreten, deren Ursachen zukünftig näher untersucht werden müssen.

Die zentrale Komponente der Online-Software ist der Prozeß `MPRE_BOSS`, der die Kommunikation zwischen Prozessen innerhalb des Myon-Pretrigger-Systems und mit Prozessen außerhalb koordiniert und durch verschiedene Kontrollaufgaben einen kontinuierlichen und zuverlässigen Betrieb des Myon-Pretrigger-Systems sicherstellt. Er protokolliert das Ausführen von Zugriffen durch die sieben `mpre_slave`-Prozesse mit Hilfe von zwei internen Listen. Beim Auftreten von Timeouts werden die entsprechenden Kommandos gegebenenfalls nochmals gesendet. Abhängig vom Inhalt der Kommandos aktualisiert `MPRE_BOSS` den Systemzustand für alle PCUs und PMGs, die nach ihrem jeweiligen Hardware-Status zusammengefaßt werden. Mit Hilfe von Testnachrichten wird die Kommunikation mit den `mpre_srv`- und `mpre_slave`-Prozessen überprüft. Auf das Starten oder Beenden eines Prozesses reagiert `MPRE_BOSS` adäquat, um die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems möglichst schnell wiederherzustellen. Es wurde dargestellt, wie `MPRE_BOSS` die Kommunikation für Expertenzugriffe, für die auszuführenden Aufgaben bei CRC-Zustandsübergängen, für das Aktualisieren von PCU-Masken und mit Prozessen des FLT auf der Grundlage der ihm zur Verfügung stehenden Informationen koordiniert. Auch um die Schnittstelle zu Systemen außerhalb des Myon-Pretriggers möglichst einfach gestalten zu können, ist einer Struktur mit einem zentralen Prozeß, der interne Informationen kapselt, der Vorzug gegeben worden. Um alle dargestellten Aufgaben zuverlässig durchführen zu können, führt `MPRE_BOSS` möglichst wenige rechenzeitaufwendige Prozessierungen durch. Die Aktualisierung der PCU-Masken kann jedoch nur von `MPRE_BOSS` vorgenommen werden, da in die Prozessierung des gesamten Myon-Pretrigger-Systems eingegriffen werden muß. Die für spätere Analysen wichtigen Informationen über die Maskierung der Datenkanäle wird dauerhaft in der Datenbank gespeichert. Analysen des Zeitverhaltens bei CRC-Zustandsübergängen und bei der Aktualisierung von PCU-Masken haben gezeigt, daß durch Modifikationen der Zugriffe auf die Datenbank die Ausführung aller Aufgaben beschleunigt werden konnte. Insbesondere im Übergang CONFIGURED $\rightarrow$ READY, der zwischen 40 s und 60 s dauert, sind Verbesserungen notwendig. Dazu müssen Wege gefunden werden, die Zeit für das Laden der LUTs, die von der Größe der Dateien abhängt, zu verkürzen oder das Laden der LUTs in einem anderen Übergang durchzuführen. Damit wäre ein positiver Einfluß auf die Effizienz der Datennahme möglich, der sich durch einige wünschenswerte Verbesserungen bei den anderen Übergängen noch verstärken läßt.

Der Prozeß `mpre_monitor` sammelt die Ergebnisse der Monitoring-Aufgaben, die die `mpre_slave`-Prozesse ausführen, und stellt sie in geeigneter Weise als `rhp`-Histogramme, als Einträge in der Logdatei oder in der Datenbank dar. Aufgrund des großen Datenflusses durch das Myon-Pretrigger-System sind nur Aussagen auf statistischer Basis möglich, die dennoch wichtige Aufschlüsse über die Datenqualität ermöglichen. Fehlermeldungen und wichtige Informationen, wie z. B. Ergebnisse des Monitorings, werden von `mpre_errlog` in speziellen Fenstern gemäß ihrem Fehlerniveau dargestellt und in der Logdatei gespeichert. Um die Lokalisierung von Fehlern in von verschiedenen Programmierern erstellten Quelldateien zu erleichtern, folgen die Fehlermeldungen einem festen Format. Die menübasierte Benutzerschnittstelle für Experten, `mpre_con`, dient zur Auswahl von speziellen Funktionen und für Tests. Dazu gehört auch die Kommunikation mit Prozessen außerhalb des Myon-Pretriggers, ohne diese verwenden zu müssen. Weiterhin ist der Transfer und Vergleich von Tabellen den beiden verwendeten Formen der Datenbank, der auf Dateien basierenden und der für HERA – B spezifischen, möglich.

Die Konfiguration des Myon-Pretrigger-Systems wird mit Hilfe von Einträgen in einer Datenbank festgelegt. Dort werden auch Informationen über die Qualität der optischen Verbindungen und über die PCU-Maskierung dauerhaft gespeichert, da sie wichtige Quellen für die Beurteilung der Datenqualität sind. Bei jeder Aktualisierung der Tabelle, die die Daten der PCU-Masken enthält, wird ein neuer Schlüssel erzeugt, der eine eindeutige Zuordnung von Ereignissen zu der Version der Tabelle ermöglicht.

Mit Hilfe der beschriebenen Implementierung der Online-Software konnte das Myon-Pretrigger-System in den letzten Monaten der Datennahmeperiode im Jahr 2000 erfolgreich betrieben werden. Die in dieser Zeit gewonnenen Erfahrungen zeigen, daß Erweiterungen teilweise wünschenswert, teilweise auch erforderlich sind. Neuentwicklungen im Kommunikationsprotokoll `rpm` machen die Unterscheidung des Transfers auf der Basis von `rpm_request` oder `rpm_flood` überflüssig. Zudem erlauben sie es, zu sendende und zu empfangende Nachrichten in FIFO-artigen Zwischenspeichern abzulegen, während die beteiligten Prozesse bereits andere Aufgaben ausführen können [Ryb 01]. Dadurch können vor allem Prozesse, die einen hohen Rechenaufwand aufweisen und gleichzeitig viele `rpm`-Nachrichten empfangen oder senden, entlastet werden. Da die Blockierung der Prozesse während des Austauschens von Nachrichten aufgehoben wird, erhöht sich die Zuverlässigkeit des Protokolls. Eine Implementierung dieser neuen Funktionalität wäre vor allem für `MPRE_BOSS` und `mpre_monitor` sinnvoll, erfordert aber wesentliche Modifikationen in den Prozessen.

Bereits erwähnt wurde die Notwendigkeit, das Laden der LUTs während des CRC-Zustandsübergangs CONFIGURED $\rightarrow$ READY zu beschleunigen. Hier sind Alternativen für das Speichern der zu ladenden Daten in ASCII-Dateien zu entwickeln. Unbedingt erforderlich ist das Ausführen von Tests aller Verbindungen zwischen Hardware-Komponenten des Myon-Pretriggers und mit dem FLT bei der Initialisierung des Systems. Vorschläge für geeignete Routinen, die teilweise auf Systemtestfunktionen basieren, werden in [Bec 01] gegeben.

Bisher ist das Pixel-System nur vorläufig in der Online-Software integriert. Hierfür sind Modifikationen vor allem in `MPRE_BOSS` und `mpre_monitor` sowie in der Datenbank notwendig.

Die Monitoring-Funktionalität ist einerseits zu erweitern, andererseits soll sie bereits während der Datennahme zukünfig auch für Nicht-Experten verständliche Angaben zur Datenqualität des Myon-Pretriggers bereitstellen. Erweiterungen des Monitorings können z. B. im Kontrollieren von FIFO-Füllständen der PCUs und der Interrupts an der Schnittstelle zwischen PCU und PMG liegen. Auch Algorithmen zum Auffinden heißer Datenkanäle aus den Daten der PCU-Test-FIFOs [Bec 01] sind geeignet, um problematische Bereiche des Myon-Detektors oder des Myon-Pretriggers zu identifizieren und daraus Angaben zur Qualität der Daten abzuleiten. In allen Fällen muß jedoch kritisch geprüft werden, wie viel an zusätzlicher Datenprozessierung `mpre_monitor` ausführen kann, ohne seine sichere Funktion negativ zu beeinträchtigen.

In die bestehende Struktur der Datenbank sind die Informationen über die installierten PLBs einzufügen, um die Lokalisierung von Fehlern an der Schnittstelle zwischen PLBs und PCUs zu vereinfachen.

Wenn auch, wie dargestellt, Verbesserungen notwendig und wünschenswert sind, wurde mittels der beschriebenen Software der Sprung von der Entwicklung der Hardware-Komponenten zu einem gesamten Myon-Pretrigger-System bewältigt, das im Jahr 2000 erfolgreich für die Datennahme im HERA – B Experiment verwendet wurde.

Kapitel 5

Studien zur Funktion des Myon-Pretrigger-Systems

Im vorigen Kapitel wurde beschrieben, welche Software-Entwicklungen für den Betrieb des Myon-Pretrigger-Systems notwendig waren, um es zur Datennahme im HERA – B Experiment verwenden zu können. Es wurde dargestellt, welche Bedeutung das Monitoring zur Beurteilung der Datenqualität besitzt. Es basiert auf Informationen über den Zustand der optischen Verbindungen zwischen Pretrigger Link Board (PLB) und Pretrigger Coincidence Unit (PCU) und den Zählern in den Koinzidenz-CPLDs (Complex Programmable Logic Device) der PCU. Zudem werden die Daten der Test-FIFOs (First in First out-Datenspeicher) auf der PCU und dem Pretrigger Message Generator (PMG) ausgelesen. Der Prozeß `mpre_monitor` speichert wichtige Informationen in der Datenbank oder einer Logdatei und stellt sie in Form von Histogrammen zur Verfügung. Das Monitoring beruht aufgrund der hohen Datenraten im Myon-Pretrigger-System auf Stichproben der Daten, die vom System prozessiert werden. Es erlaubt deshalb nur Aussagen auf statistischer Basis. Die für spätere Analysen dauerhaft gespeicherten Daten hingegegen müssen i. a. zusätzlich vom First Level Trigger (FLT) und den höheren Triggerstufen akzeptiert werden, so daß keine eindeutigen Rückschlüsse auf die die Funktion des Myon-Pretriggers beschreibenden Parameter möglich sind. Zusätzlich zu den Monitoring-Daten können einigen Tabellen der Datenbank die Informationen über die Maskierung von Datenkanälen auf der PCU entnommen werden.

Da die Monitoring-Funktionen und die Prozedur zur Aktualisierung der PCU-Masken erst in den letzten Monaten der Datennahme des Jahres 2000 entwickelt wurden, sind sie noch nicht optimiert, insbesondere nicht in bezug auf eine Beurteilung der Datenqualität des Myon-Pretriggers durch Nicht-Experten. Deshalb werden in diesem Kapitel sowohl Untersuchungen zur Charakterisierung der Myon-Pretrigger-Funktion dargestellt als auch Vorschläge für hierfür in Zukunft verwendbare Prozeduren entwickelt. Zudem werden Hinweise auf noch weiter zu untersuchende Aspekte der Hardware-Komponenten und des Monitorings gegeben. Zunächst werden die Qualität der optischen Verbindungen und die Maskierung von Datenkanälen dargestellt, die beide Auswirkungen für Datenanalysen haben, da sie die effektive Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems einschränken. Ein wichtiger Parameter für die Funktion des Myon-Pretriggers innerhalb des

Triggersystems ist die Koinzidenzrate, die aus den Zählerwerten der PCUs abgeschätzt werden kann. Die Rate und ihre systematischen Fehler werden in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate am Target untersucht. Zuletzt werden weitere Möglichkeiten für das zukünftige Monitoring dargestellt.

5.1 Qualität der optischen Verbindungen

Der Zustand der optischen Verbindungen zwischen den PLBs und den PCUs wird auf der PCU ausgewertet. Dazu werden, wie in Abschnitt 3.1.2 genauer beschrieben wurde, für jede Datenübertragung vier Bits, sogenannte externe Synchronisationsbits, und Statussignale des Parallelisierungs-Bausteins überprüft. Bei einem Fehler wird die Verbindung angehalten, die Daten der zugehörigen Detektorspalte werden im Koinzidenz-CPLD nicht mehr verwendet, und das über den VME[1]-Bus lesbare LinkOK-Signal zeigt einen Fehler an. Wie in Kapitel 4 dargestellt, kann die optische Verbindung anschließend erst dann wieder verwendet werden, wenn mit Hilfe einer Funktion der Online-Software der POL-Empfänger (Pretrigger Optical Link) zurückgesetzt und neu gestartet wird. Im Monitoring ist die Überprüfung aller optischen Verbindungen nach jeweils 5 s implementiert.

Zur Beurteilung der Qualität der Datenübertragung sind Kategorien eingeführt worden, in die die Verbindungen gemäß ihrer Fehlerrate R_{Fehler} eingeteilt werden. Als Fehlerrate wird dabei der Anteil an Intervallen definiert, in dem die LinkOK-Signale kontrolliert werden und einen Fehler anzeigen. Sie hängt also von der Periodendauer der Überprüfungen ab, die während der Datennahme im Jahr 2000 immer 5 s betrug. Je länger die Periodendauer gewählt wird, desto größer wird einerseits die Wahrscheinlichkeit, daß während dieser Zeit ein Fehler auftritt. Andererseits kann die Periodendauer nicht beliebig kurz gewählt werden, da dann die vielen notwendigen VME-Zugriffe andere Monitoring-Aufgaben behindern würden.

In Tabelle 5.1 sind die verwendeten Kategorien GOOD, UNSTABLE, VERY_UNSTABLE und DEFECT definiert, und die aus der Fehlerrate und der Zeit von 5 s zwischen zwei Überprüfungen folgende mittlere Zeit $\bar{t}$ ohne Auftreten von Fehlern ist angegeben. In die Kategorie GOOD werden nur diejenigen optischen Verbindungen eingeteilt, bei denen keine Fehler oder bei weniger als 0,1 % der Überprüfungen ein Fehler auftritt. Mit der Periodendauer der Überprüfungen von 5 s folgt somit eine mittlere Zeit ohne Fehler von mehr als 83,3 Minuten für diese Kategorie, d. h. einer typischen Dauer eines Runs zur Datennahme. Bei einer Übertragungsrate von 20,8 MHz und vier überprüften Bits pro Übertragung entspricht dies einer relativen Bit-Fehlerrate von weniger als $2{,}4 \cdot 10^{-12}$. Aus der Fehlerrate für die externen Synchronisationsbits wird auf die Fehlerrate aller übertragenen Daten geschlossen. Die Kategorie INIT_DEFECT dient zur Klassifizierung der Verbindungen, für die keine sinnvolle Bestimmung von Offset-Werten, wie es in Abschnitt 4.1.3 beschrieben wurde, möglich ist. Dies ist der Fall, wenn der größte zusammenhängende Bereich, in dem bei der Einstellung keine Fehler auftreten, weniger als 15 Werte des DACs (Digital to Analog Converter) umfaßt.

[1]VERSA Module Eurocard

Tab. 5.1: Kategorien zur Einteilung der optischen Verbindungen nach der Fehlerrate R_{Fehler} oder dem bestimmten Bereich der Offset-Werte. Zusätzlich ist die mittlere Zeit $\bar{t}$, in der kein Fehler auftritt, angegeben, wenn die optischen Verbindungen nach jeweils 5 s überprüft werden.

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

Solche Verbindungen können nicht verwendet werden, da eine stabile Funktion der optischen Datenübertragung nicht möglich ist. Sie werden mit einer Fehlerrate von 100 % in die Untersuchungen einbezogen.

Die Informationen über die Fehlerraten werden alle 60 s intern im `mpre_slave`-Prozeß aktualisiert und nach jeweils 600 s an `mpre_monitor` gesendet. Dieser sammelt die Informationen von allen `mpre_slave`-Prozessen und aktualisiert bei Änderungen die Tabelle OPT_LINK der Datenbank. Zusätzlich schickt `mpre_slave` nach jeweils 300 s Informationen über die Kategorien und die Fehlerraten der Verbindungen an `mpre_errlog`, der entsprechende Einträge in der Logdatei vornimmt. Die Informationen der Datenbank über die Verbindungen der Kategorie INIT_DEFECT und die Fehlerraten aus den Logdateien sind kombiniert worden, um die Qualität der Datenübertragungen zu beurteilen. Alle im folgenden dargestellten Untersuchungen beziehen sich auf den Zeitraum vom 18.8. bis zum 25.8.2000, in dem die HERA – B spezifische Datenbank für Einträge verwendet wurde. Es werden, wenn nicht anders dargestellt, ausschließlich Daten des Pad-Systems untersucht, da der Pixel-Pretrigger nur für kurze Zeit gegen Ende der Datennahme betrieben wurde.

In Abbildung 5.1 sind die mittleren Fehlerraten der optischen Verbindungen des gesamten Systems sowie der MU3- und MU4-Spalten des Pad-Systems für die aufeinanderfolgenden Auslesen dargestellt. Eine Auslese bezieht sich dabei auf die Informationen über die Fehlerraten, die den Logdateien entnommen werden. Der zeitliche Abstand zwischen Auslesen ist nicht eindeutig bestimmt, da er nur während einer über längere Zeit andauernden Datennahme 300 s beträgt. Bei Unterbrechungen der Datennahme können aber auch Stunden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Auslesen liegen. Folglich sind Zeiträume ohne Datennahme automatisch ausgeblendet. In Abbildung 5.1 ist zu erkennen, daß die über alle Verbindungen gemittelten Fehlerraten – besonders für MU3 – deutlichen Schwankungen unterworfen sind. Der Beitrag der MU4-Verbindungen ist um etwa einen Faktor 4 größer als der der MU3-Verbindungen. Dies zeigen auch die über alle Auslesen gemittelten Werte, die in Tabelle 5.2 zusammengefaßt sind. Um die Größenordnung der Schwankungen beurteilen zu können, ist als Fehler die Standardabweichung der

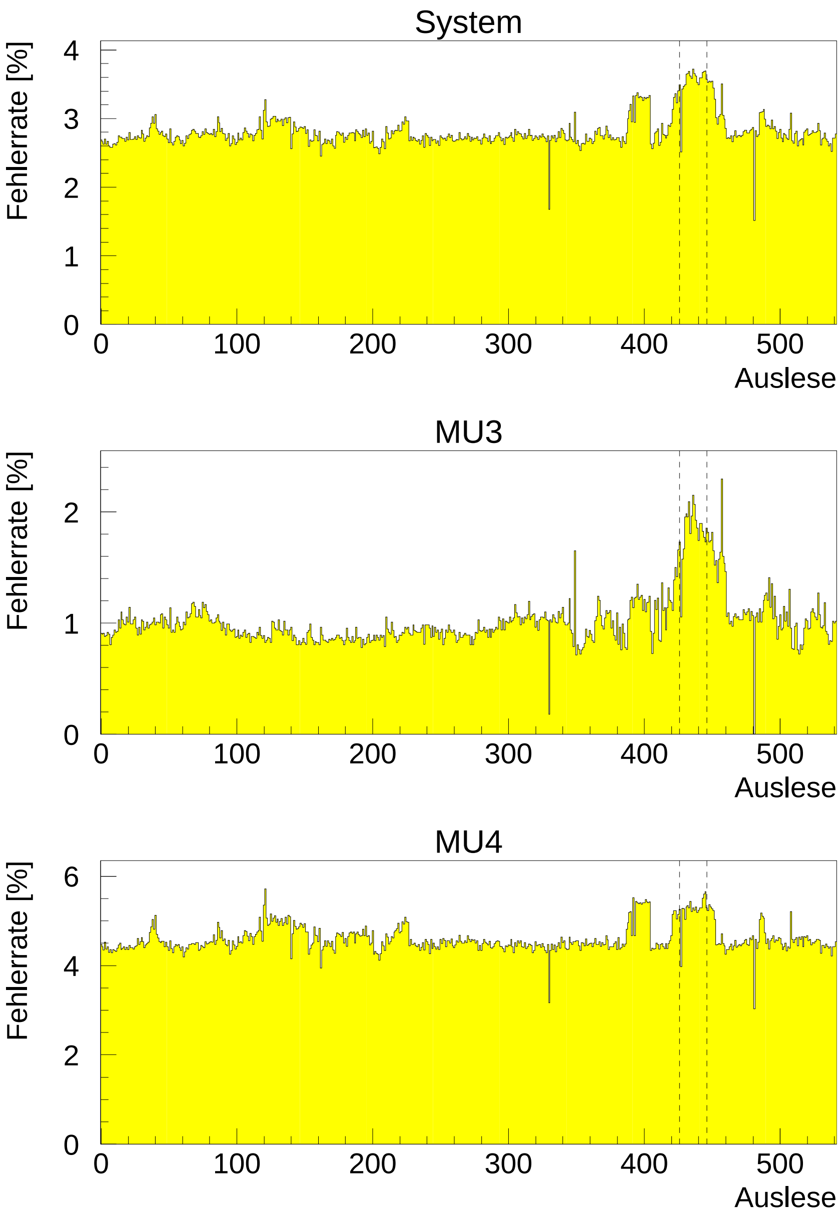

Abb. 5.1: Darstellung der mittleren Fehlerrate der optischen Verbindungen des gesamten Systems, der MU3- und der MU4-Spalten für die aufeinanderfolgenden Auslesen aus den Logdateien. Der Bereich des Raten-Scans, der in Abschnitt 5.3 beschrieben wird, ist mit zwei Linien markiert.

Einzelwerte angegeben. Einzelwerte sind in diesem Fall die über die Spaltenzahl gemittelten Fehlerraten für eine Auslese. Die absoluten Schwankungen liegen zwischen 0,2 % und 0,6 %. Zudem ist zu erkennen, daß es für MU3 und MU4 jeweils große Unterschiede zwischen der $+y$- und der $-y$-Hälfte gibt, die sich bei der Kombination der Werte für

Tab. 5.2: Mittlere Fehlerraten der optischen Verbindungen für das gesamte System sowie für die MU3- und MU4-Spalten. Zusätzlich sind die Ergebnisse getrennt für die $+y$- und die $-y$-Hälften des Myon-Systems angegeben.

Bereich	Fehlerrate in % für		
	System	MU3	MU4
alles	2,8 ± 0,2	1,0 ± 0,2	4,6 ± 0,3
$+y$	2,9 ± 0,3	0,5 ± 0,3	5,2 ± 0,6
$-y$	2,8 ± 0,3	1,6 ± 0,4	4,0 ± 0,3

die Fehlerrate des Gesamtsystems von $R_{\text{Fehler}} \approx 2{,}8\,\%$ gegenseitig kompensieren. Für MU3 gibt es in $+y$ weniger Fehler, während es für MU4 umgekehrt ist.

Ursache für diese lokalen Unterschiede ist die Verteilung der Fehlerrate auf die einzelnen optischen Verbindungen. In Abbildung 5.2 ist die über alle Auslesen im betrachteten Zeitraum gemittelte Fehlerrate für jede Verbindung einzeln gezeigt. Eine Verbindung ist eindeutig einer Spalte des Pad-Detektors zugeordnet, deren Trefferinformationen übertragen werden, und wird deshalb im folgenden mit „3:n“ für die MU3- bzw. „4:n“ für die MU4-Spalte n bezeichnet ($\mathrm{n} = 1, \ldots, 132$). Es ist deutlich zu erkennen, daß die systemweite Fehlerrate der optischen Datenübertragung durch wenige Verbindungen dominiert wird. Dies erklärt auch die Unterschiede zwischen der $+y$- und der $-y$-Hälfte, da z. B. für MU3 im $-y$-Bereich die beiden Verbindungen 3:72 und 3:84 einen viel größeren Beitrag liefern als 3:23 in $+y$. Die Ursachen für die höhere Fehlerrate in MU4 verglichen mit MU3 liegen in den vier Verbindungen der Kategorie INIT_DEFECT – davon drei in der $+y$-Hälfte – und zusätzlich den vier in DEFECT eingeteilten. Allein die Verbindungen in INIT_DEFECT tragen absolut 3,0 % zur gesamten Fehlerrate in MU4 von $R_{\text{Fehler,MU4}} = 4{,}6\,\%$ bei.

Basierend auf den dargestellten mittleren Raten werden die Verbindungen in die Kategorien aus Tabelle 5.1 eingeordnet. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 zusammengefaßt. Etwa 90 % der Verbindungen des Pad-Systems zeigen keine oder vernachlässigbar wenige Fehler, ausgedrückt durch die Kategorie GOOD. Auch die Verbindungen in UNSTABLE weisen eine für die Verwendung zur Datennahme ausreichend gute Qualität auf, im Gegensatz zu den verbleibenden etwa 6 %. Das Pixel-System konnte bislang nur für einen kurzen Zeitraum betrieben werden. Die ersten Ergebnisse deuten jedoch auf eine gute Qualität der Datenübertragungen hin.

Wie die großen Fehler in Abbildung 5.2 zeigen, muß neben der über einen bestimmten Zeitraum gemittelten Fehlerrate auch ihr Verlauf beachtet werden. In Abbildung 5.3 sind beispielhaft drei Verbindungen mit einer hohen mittleren Fehlerrate dargestellt, die aber einen unterschiedlichen Verlauf aufweisen. Die Verbindung 3:72 zeigt für mehr als die erste Hälfte der untersuchten Auslesen eine konstante Fehlerrate von 100 %, anschließend variiert sie sehr stark auf hohem Niveau. Obwohl die optische Verbindung 3:84 gemittelt in die Kategorie VERY_UNSTABLE eingeordnet ist, also eine Fehlerrate von weniger als 10 % aufweist, beschreibt dies das tatsächliche Verhalten nicht ausreichend. Für den

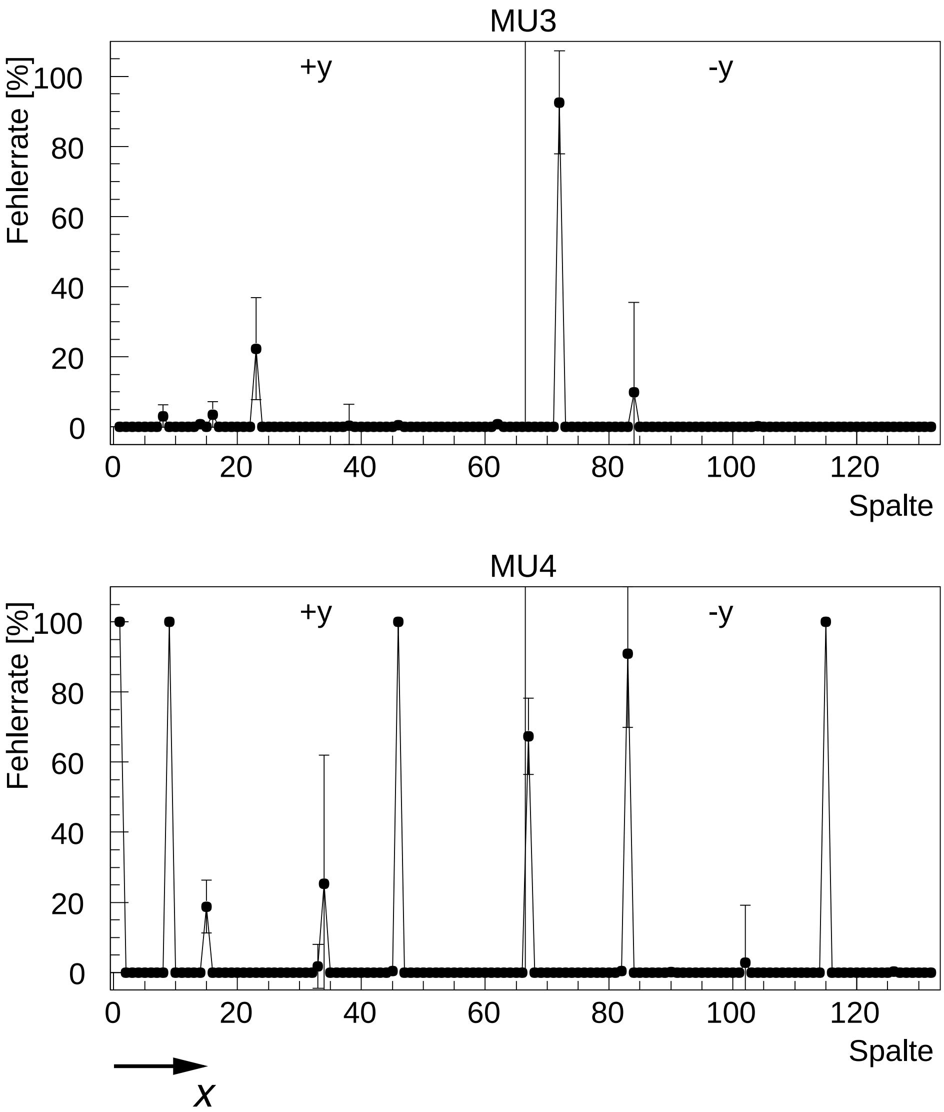

Abb. 5.2: Über alle Auslesen gemittelte Fehlerraten für die einzelnen optischen Verbindungen in MU3 und MU4. Die dargestellten Fehler entsprechen den Standardabweichungen der Einzelwerte. Die Numerierung der Spalten erfolgt gemäß der Definition in Abbildung 2.6, in der die Richtung der x-Achse umgekehrt orientiert ist.

größten Teil des untersuchten Zeitraums zeigt die Datenübertragung keine Fehler. In einem eng begrenzten Zeitraum dagegen steigt sie auf 100 % an. Ein ähnliches Verhalten, jedoch mit zwei Zeiträumen mit vielen Fehlern, zeigt die Verbindung 4:34.

Die Ursachen für solche Schwankungen zwischen einer fehlerlosen und einer Datenübertragung schlechter Qualität für einzelne Verbindungen sind bislang nicht verstanden, zumal in den dargestellten Beispielen benachbarte Kanäle keine Auffälligkeiten aufweisen. Erschwert wird die Suche nach Ursachen durch die vielen Parameter, die die Datenübertragung beeinflussen. Dies beginnt bei Unterschieden zwischen den einzelnen PLB-Kanälen der Senderseite oder den PCU-Eingangskanälen, verursacht z. B. durch

Tab. 5.3: Anzahl der optischen Verbindungen in den Kategorien aus Tabelle 5.1. Als Grundlage dienen die über den untersuchten Zeitraum vom 18.8. bis zum 25.8.2000 gemittelten Fehlerraten. Hier werden auch die Verbindungen des Pixel-Systems berücksichtigt.

Kategorie	Anzahl Verbindungen für			
	MU3 (Pad)	MU4 (Pad)	MU3 (Pixel)	MU4 (Pixel)
GOOD	121	118	15	16
UNSTABLE	6	4	1	–
VERY_UNSTABLE	3	2	–	–
DEFECT	2	4	–	–
INIT_DEFECT	–	4	–	–

Toleranzen der verwendeten Bauteile. Gleiches gilt für die POL-Sender und -Empfänger selbst. Bei den verwendeten optischen Fasern ist insbesondere die mechanische Fixierung der Steckverbindungen auf beiden Seiten sehr kritisch und kann zu Fehlern in der Übertragung führen. Zudem hängt die Qualität der Übertragung von den Einstellungen der Offset-Werte der POL-Empfänger auf der PCU ab. Für diese Größe kann ein Zusammenhang mit der Fehlerrate quantifiziert werden, da die eingestellten Werte in der Tabelle PCU_OFFSET in der Datenbank gespeichert werden. In Abbildung 5.4 ist für alle optischen Verbindungen die Fehlerrate in Abhängigkeit vom bestimmten Offset-Wert und von der Größe des Bereichs von Offset-Werten dargestellt, in dem die Verbindung beim Einstellen keine Fehler zeigte. Es ist keine klare Beziehung zwischen diesen Parametern und der Fehlerrate zu erkennen. Dies kann mit Hilfe des Korrelationskoef-

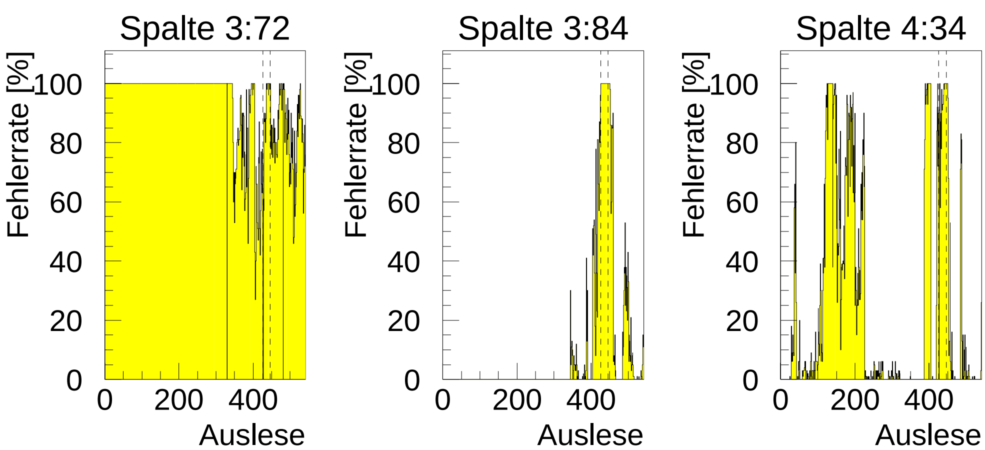

Abb. 5.3: Zeitlicher Verlauf der Fehlerrate für die Verbindungen 3:72, 3:84 und 4:34. Der Bereich des in Abschnitt 5.3 beschriebenen Raten-Scans ist hervorgehoben.

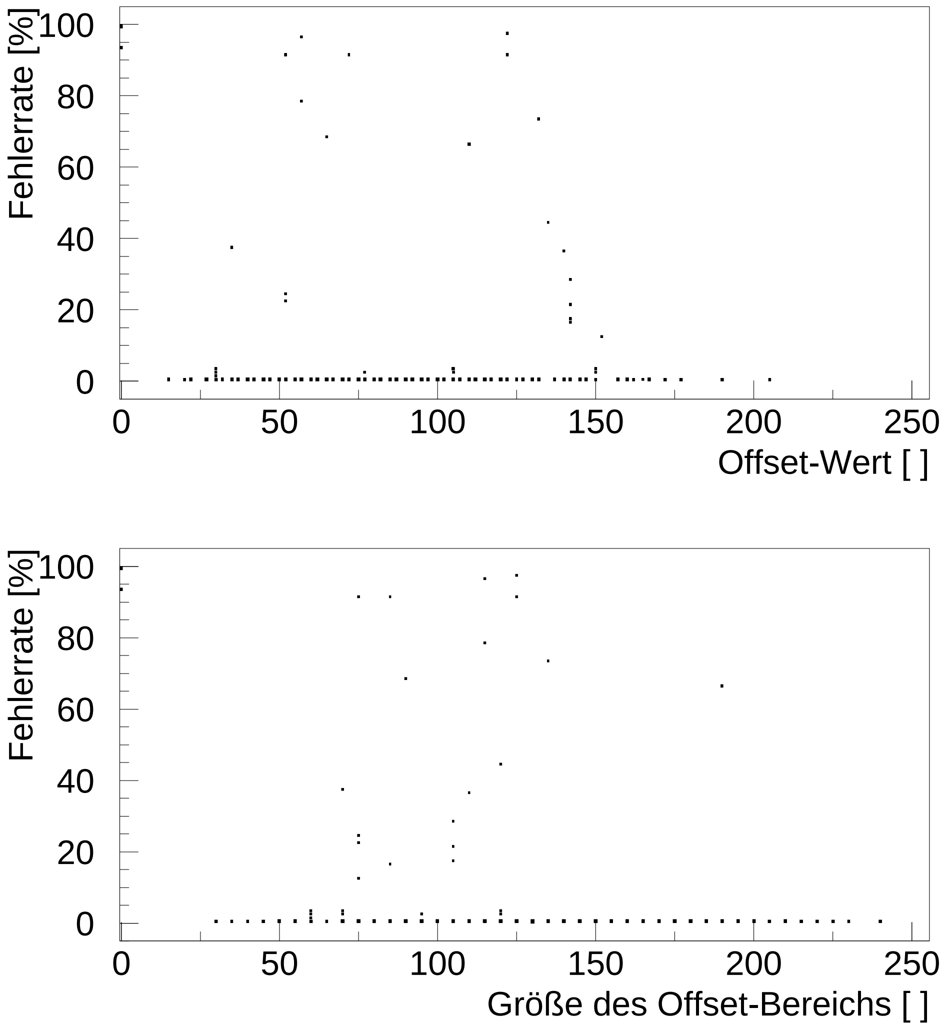

Abb. 5.4: Darstellung der Fehlerraten aller optischen Verbindungen in Abhängigkeit des eingestellten Offset-Wertes (oben) und der Größe des Bereichs von Offset-Werten, in dem bei der Einstellung keine Fehler auftraten (unten).

fizienten ρ ausgedrückt werden. Er ist definiert als

$$\rho \equiv \frac{\mathrm{Kov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{5.1}$$

zwischen x und y, wobei $\mathrm{Kov}(x,y)$ die Kovarianz zwischen den Variablen und σ_x und σ_y die jeweiligen Standardabweichungen bezeichnen. Die Ergebnisse für die beiden untersuchten Parameter lauten

$$\rho(\text{Offset-Wert}) \quad = \quad -0{,}44,$$

$$\rho(\text{Offset-Bereich}) \quad = \quad -0{,}47,$$

wobei nur diejenigen Wertepaare einbezogen werden, die eine von 0 % verschiedene Fehlerrate aufweisen. Es gibt folglich relativ schwache Korrelation zu einem Anstieg der Fehlerrate mit abnehmendem Offset-Wert bzw. kleinerem Offset-Bereich. Für die Größe des Offset-Bereichs entspräche dies der Erwartung, da eine Verbindung, die beim Einstellen nur in einem kleinen Bereich fehlerfrei funktioniert, als nicht stabil anzunehmen ist. Um eine statistisch signifikante Aussage treffen zu können, muß die Untersuchung jedoch über einen längeren Zeitraum ausgedehnt werden. Kann damit eine Korrelation nachgewiesen werden, würde dies eine Vorhersage über die Qualität der Datenübertragungen für einzelne Verbindungen bereits bei der Einstellung der Offset-Werte erlauben.

Um den negativen Einfluß von Verbindungen schlechter Qualität auf die Datennahme mit dem Myon-Pretrigger-System zu minimieren, wurden Verbesserungen vor allem in den Bereichen angestrebt, die einen großen Beitrag zur Koinzidenzrate liefern. Dies wurde in erster Linie durch das Austauschen von Komponenten, wie z. B. POL-Sendern oder -Empfängern, erreicht. Dabei wurden Verbesserungen in MU3 eine höhere Priorität gegenüber MU4 gegeben, da bei Ausfall einer MU3-Verbindung für den betroffenen Koinzidenzkanal keine Daten mehr prozessiert und keine Erfahrungen im Betrieb dieses Kanals gesammelt werden können. Dies bedeutet jedoch nicht, daß eine defekte MU4-Verbindung für die Datennahme von geringerer Bedeutung wäre. Nach dem Koinzidenzschema in Abbildung 2.9 trägt eine MU4-Spalte im Mittel ein Drittel zu einem Koinzidenzkanal bei, dies aber bei drei Koinzidenzkanälen. Sie hat somit die gleiche Bedeutung für die Prozessierung von Koinzidenzen wie eine MU3-Spalte.

Um die Bedeutung einer Verbindung zu quantifizieren, wird ihre Fehlerrate gemäß der Verteilung der Koinzidenzrate gewichtet. Eine gute empirische Beschreibung der Verteilung der Koinzidenzraten in Abhängigkeit der Spaltennummer s und der Pad-Nummer p innerhalb einer Spalte erfolgt durch die Funktion

$$R_{\text{Koinz,sim}}(s,p) = \frac{1}{N} \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{(s-33{,}5)^2 + p^2}}{5{,}5}\right), \tag{5.2}$$

die einen exponentiellen Abfall der Rate mit dem Abstand vom Protonstrahl annimmt [Bec 01]. Die Spaltennummer s wird für die $-y$-Hälfte um 66 erniedrigt, entspricht damit also dem Wertebereich für die $+y$-Hälfte. Die Normierung N wird abhängig von der untersuchten Fragestellung gewählt und unterscheidet sich für MU3 und MU4, da MU4-Spalten ein Pad weniger enthalten. Diese Verteilung erlaubt eine Abschätzung, welchen Beitrag ein Pad in MU3 bzw. MU4 zur gesamten Koinzidenzrate liefert und damit welche Bedeutung es für das System besitzt. In Abbildung 5.5 werden die Gewichte für MU3 der mittleren Koinzidenzratenverteilung für Run 17235 gegenübergestellt. Der Normierungsfaktor N wird dabei so gewählt, daß die Summe aller Gewichte der Koinzidenzrate für Run 17235 entspricht. Wie für alle in der Folge dargestellten zweidimensionalen Verteilungen von Koinzidenzraten sind die Spaltennummern der $-y$-Hälfte um 66 erniedrigt und die Pad-Nummern negativ eingetragen. Die Lücken in der Verteilung der Gewichte entsprechen den Aussparungen im Myon-Detektor für die Proton- und Elektronstrahlrohre. Beim Vergleich mit der gemessenen Koinzidenzratenverteilung sind viele lokale

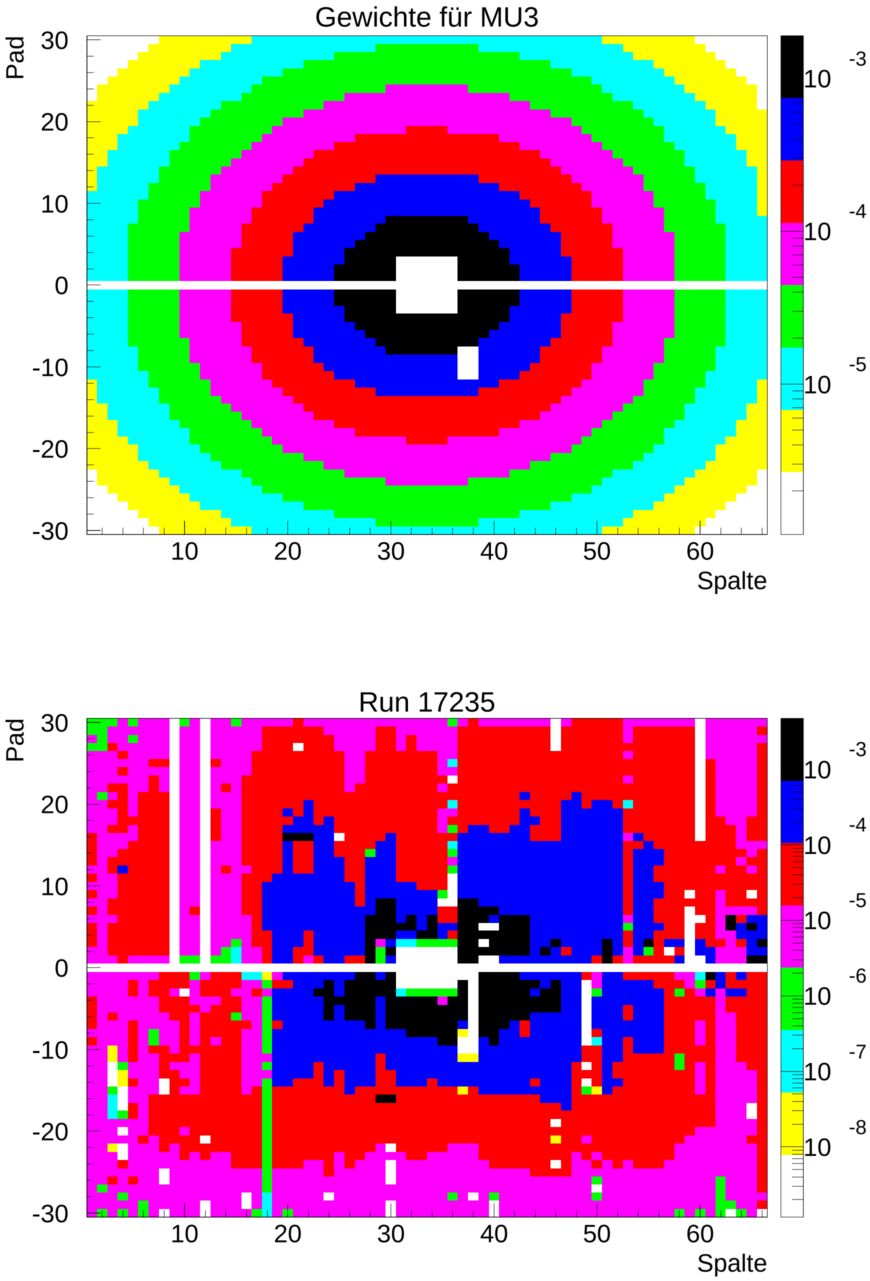

Abb. 5.5: Darstellung der Gewichte für MU3-Pads gemäß Gleichung (5.2) (oben) und der gemittelten Koinzidenzratenverteilung für Run 17235 am 23.8.2000 bei einer Wechselwirkungsrate am Target von 5 MHz (unten). Die Gewichte sind so normiert, daß ihre Summe der Koinzidenzrate für Run 17235 entspricht. Die Spaltennummern der $-y$-Hälfte sind um 66 erniedrigt und die Pad-Nummern negativ dargestellt.

Tab. 5.4: Mit simulierten Verteilungen gemäß Gleichung 5.2 gewichtete Fehlerraten der optischen Verbindungen für das gesamte System, sowie die MU3- und MU4-Spalten. Die Ergebnisse sind auch für die $+y$- und die $-y$-Hälften einzeln angegeben.

Bereich	Gewichtete Fehlerrate in % für		
	System	MU3	MU4
alles	1,6 ± 0,7	0,4 ± 0,3	2,8 ± 1,4
$+y$	2,3 ± 1,3	0,5 ± 0,4	4,0 ± 2,5
$-y$	0,9 ± 0,6	0,2 ± 0,2	1,6 ± 1,1

Unterschiede, z. B. aufgrund des Verhaltens des Myon-Detektors, von ausmaskierten Datenkanälen und nicht korrekt funktionierenden Teilen der Myon-Pretrigger-Hardware zu erkennen. Außerdem fällt die simulierte Verteilung im Randbereich stärker ab als die gemessene und beschreibt die Auswirkung des Magnetfeldes nicht. Da der Absorber hinter der MU4-Superlage den äußersten Bereich der $-x$-Seite nicht abdeckt, steigt hier die Koinzidenzrate aufgrund von Untergrundereignissen zum Rand hin leicht an. Das grundlegende Verhalten wird jedoch für die dargestellten Untersuchungen ausreichend gut beschrieben.

Für jede optische Verbindung wird die Fehlerrate mit den über alle Pads der zugehörigen Spalte summierten Gewichten gemäß Gleichung (5.2) skaliert. Der Normierungsfaktor N wird dabei für MU3 und MU4 so gewählt, daß die Summe aller Werte jeweils 132 Spalten ergibt. In Tabelle 5.4 sind die so gewonnenen Ergebnisse dargestellt. Verglichen mit den unskalierten Werten in Tabelle 5.2 ist die Fehlerrate für das Gesamtsystem mit $R_{\text{Fehler}} = 1{,}6\,\%$ deutlich kleiner, wobei es große Unterschiede zwischen $+y$ und $-y$ gibt. Sie treten sowohl für MU3 als auch MU4 auf, wobei der MU4-Anteil dominant ist. Innerhalb von MU4 wird die wesentlich höhere Fehlerrate für $+y$ im wesentlichen durch die Verbindung 4:34 bestimmt: Hier sind die Gewichte am größten. Der instabile Verlauf der Fehlerrate für diese Verbindung, dargestellt in Abbildung 5.3, begründet auch den großen Wert der Standardabweichung für die $+y$-Hälfte von MU4. In MU3 ist vor allem durch die geringe Gewichtung der Verbindung 3:72 die Fehlerrate im $-y$-Bereich deutlich gegenüber den ungewichteten Werten reduziert.

Folglich kann festgestellt werden, daß die gewählte Strategie für die Datennahmeperiode im Jahr 2000, die optischen Verbindungen für die wichtigsten Bereiche und vor allem für MU3 zu optimieren, erfolgreich war. Die gewichtete Fehlerrate von $R_{\text{Fehler}} = 1{,}6\,\%$ kann effektiv als eine Verkleinerung der Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems angesehen werden. Insbesondere für MU4 sind für die zukünftige Datennahme Verbesserungen notwendig und – wie die Werte für MU3 zeigen – auch möglich. Durch Modifikationen in der Online-Software ist es möglich, für jeden Run den Anteil fehlerhafter Datenübertragungen und ihre Verteilung über das System anzugeben. Diese Informationen sind für spätere Analysen der Daten von großer Bedeutung.

5.2 Maskierung von Datenkanälen

Analog zu fehlerhaften optischen Datenübertragungen schränken maskierte Datenkanäle des Myon-Pretriggers effektiv die Akzeptanz des Systems ein, da in den betroffenen Bereichen keine Koinzidenzen gefunden werden können. Gründe für Maskierungen sind deshalb nur gegeben, wenn Bereiche des Systems aufgrund eines fehlerhaften Verhaltens eine so hohe Rate von FLT-Nachrichten verursachen, daß die Funktion des Triggersystems eingeschränkt wird, oder wenn Bereiche so instabil sind, daß ihr Verhalten Probleme bei späteren Analysen der Daten verursachen würde und ihr Beitrag vernachlässigbar ist. Letzteres kann z. B. für optische Verbindungen mit einer hohen Fehlerrate oder großen zeitlichen Schwankungen zutreffen. Nach den in Abschnitt 5.1 dargestellten Ergebnissen erscheint dies für einige Verbindungen sinnvoll, ist aber während der Datennahme im Jahr 2000 in der Online-Software nicht implementiert gewesen.

Als Grundlage der Maskierungen dienten deshalb nur defekte Kanäle der Myon-Pretrigger-Hardware und heiße Pads. Die Prozedur zur Bestimmung und Berücksichtigung heißer Pads wurde in Abschnitt 4.2.5 beschrieben, das Speichern defekter Hardware-Kanäle in der Tabelle MASK_BP der Datenbank in Abschnitt 4.2.9. Ebenso wie für die optischen Verbindungen wird der Zeitraum vom 18.8. bis zum 25.8.2000 untersucht, da während dieser Zeit die HERA − B spezifische Datenbank verwendet wurde. Das schließt auch die Erzeugung von Schlüsseln zur eindeutigen Zuordnung von Ereignissen zu den Versionen der Tabelle PCU_MASK ein, die die jeweils verwendeten PCU-Maskierungen enthält. Da die Prozedur für das Pixel-System noch nicht implementiert war, wird im folgenden ausschließlich das Pad-System untersucht.

Die Behandlung der MU4-Spalten ist für die Maskierung komplizierter als für die optischen Verbindungen, da die kleinsten Einheiten hier Koinzidenzkanäle sind. Aufgrund des Koinzidenzschemas tragen drei MU4-Spalten zu einem Kanal bei, aber im Gegensatz zur optischen Datenübertragung kann sich das Verhalten für dieselbe MU4-Spalte bei verschiedenen Koinzidenzkanälen unterscheiden. Dies ist der Fall, wenn die Maskierung aufgrund von Defekten der Hardware erfolgt, die nach der Zuordnung der MU4-Daten zu den Koinzidenzkanälen auftreten. Bei Defekten, die im Datenfluß vor der Verteilung lokalisiert sind, oder heißen Pads sind dagegen alle drei Masken in gleicher Weise betroffen. Die Masken für einen Koinzidenzkanal einer PCU werden deshalb zunächst für MU3, MU4L, MU4M und MU4R unabhängig behandelt. Die Benennungen der MU4-Spalten sind in Abbildung 3.5 definiert. Anschließend wird über die drei Anteile für MU4 unter Berücksichtigung der jeweiligen Zahl von Pads gemittelt. Diese Zahl ist mit 3668 für MU4R kleiner als für MU4L und MU4M mit 3784 Pads: Für die Koinzidenzkanäle am Rande des Pad-Systems – zu den MU3-Spalten 1, 66, 67 und 132 – gibt es nur je zwei MU4-Spalten, und die fehlende entspricht immer dem MU4R-Beitrag. Die Verhältnisse für das ganze System werden aus dem MU3- und dem mittleren MU4-Anteil bestimmt, indem sie wieder auf die Gesamtzahl von Pads bezogen werden, d. h. 3916 im Fall von MU3.

In Abbildung 5.6 sind die auf diese Weise gemittelten Anteile maskierter Pads für das Gesamtsystem und für MU3 und MU4 separat abhängig von der Aktualisierung der Masken gezeigt. Deutlich fallen der starke Anstieg bei der Aktualisierung 130 und die

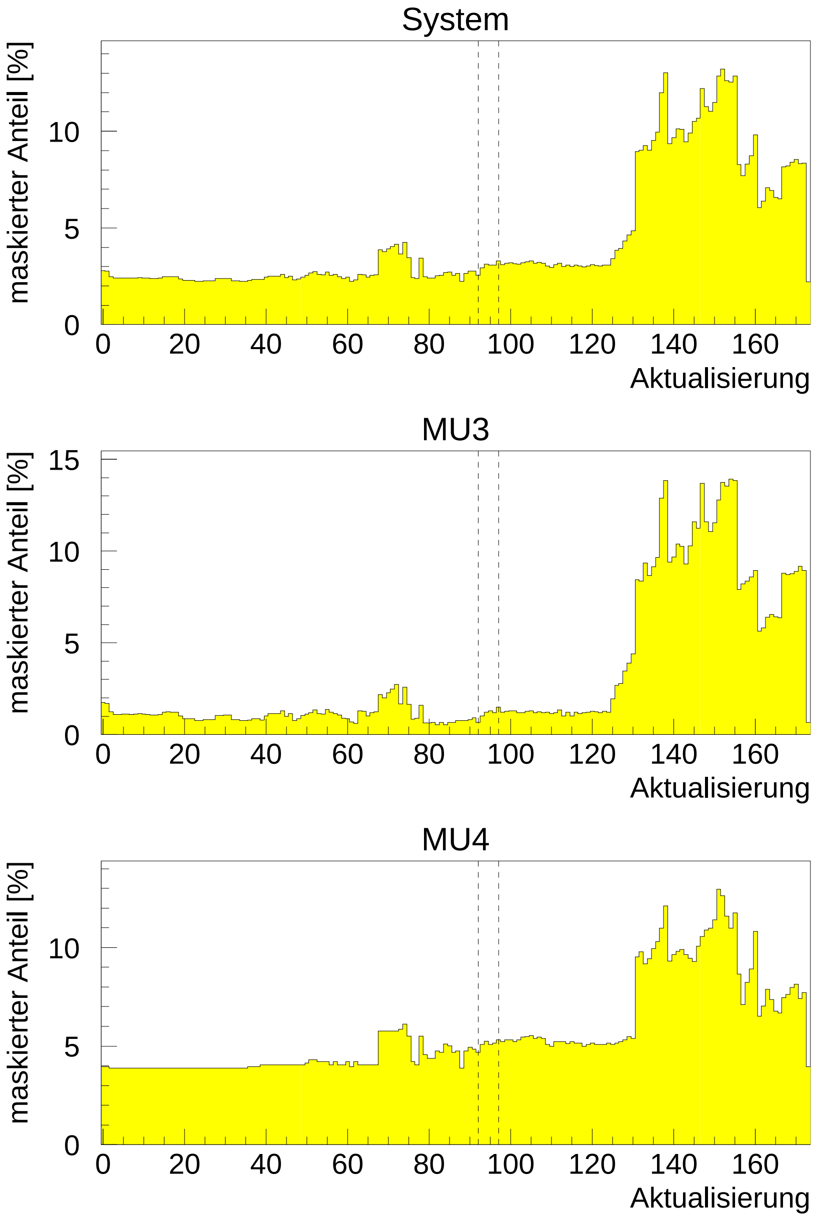

Abb. 5.6: Darstellung des mittleren Anteils maskierter Datenkanäle für das gesamte System und für MU3 und MU4 einzeln in Abhängigkeit der Aktualisierung der Masken. Der Bereich des Raten-Scans, der in Abschnitt 5.3 beschrieben wird, wird durch die beiden Linien markiert.

insgesamt größeren Schwankungen als bei der Fehlerrate der optischen Datenübertragung auf. Vor dem starken Anstieg ist der Anteil in MU3 um etwa einen Faktor 4 kleiner als der in MU4, nach dem Anstieg sind sie ungefähr gleich groß. In Tabelle 5.5 sind die über alle Aktualisierungen gemittelten Anteile zusammengefaßt. Wegen der Schwankun-

Tab. 5.5: Mittlere Anteile maskierter Datenkanäle für das gesamte System, sowie die MU3- und MU4-Spalten. Zusätzlich sind die Ergebnisse getrennt für die $+y$- und die $-y$-Hälften angegeben.

Bereich	Anteil maskierter Datenkanäle in % für		
	System	MU3	MU4
alles	4,4 ± 3,1	3,3 ± 3,9	5,7 ± 2,3
$+y$	5,8 ± 3,8	4,8 ± 5,1	7,1 ± 2,4
$-y$	3,0 ± 2,4	1,8 ± 2,7	4,3 ± 2,2

gen und des starken Anstiegs sind die Standardabweichungen der Einzelwerte, die als Fehler angegeben sind, in der Größenordnung der Mittelwerte. Es zeigt sich, daß sowohl in MU3 als auch in MU4 in der $+y$-Hälfte deutlich mehr Datenkanäle maskiert sind als in $-y$. Für das Gesamtsystem resultiert das – bei Vernachlässigung der großen Fehler – in einem etwa doppelt so großen Anteil für $+y$. Bis zu dem starken Anstieg ist der Gesamtanteil maskierter Pads mit $\mathcal{R}_{\mathrm{maskiert}} \approx 3\,\%$ vergleichbar mit der Fehlerrate der optischen Verbindungen $R_{\mathrm{Fehler}} = 2{,}8\,\%$, danach ist der Einfluß der Maskierung wesentlich stärker, etwa um einen Faktor 3.

In Abbildung 5.7 ist für zwei Aktualisierungen die Verteilung der maskierten Datenkanäle in MU3 dargestellt. Mit Aktualisierung 125 wird der Zustand vor dem Anstieg gezeigt, Aktualisierung 132 liegt zeitlich in dem Bereich des erhöhten Anteils maskierter Datenkanäle. Der Zuwachs ist im wesentlichen auf die $+x$-Hälfte beschränkt und hier vor allem auf den Rand des Systems und nahe der Trennung zwischen der $+y$- und

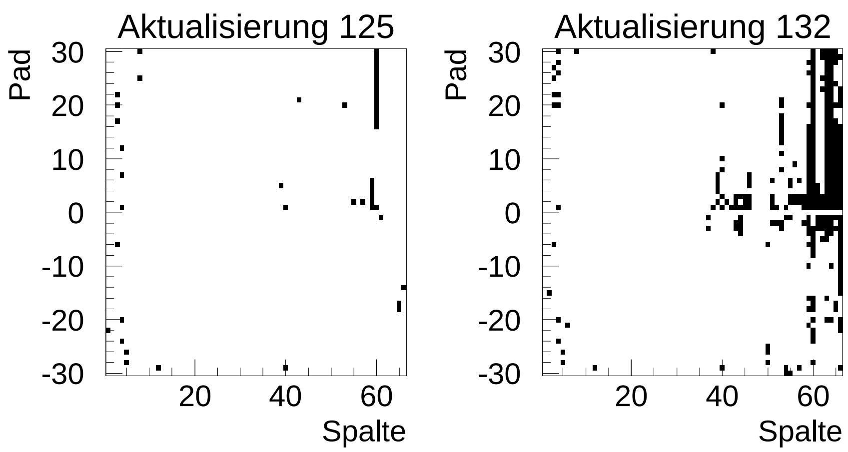

Abb. 5.7: Darstellung der maskierten MU3-Datenkanäle für die Aktualisierungen 125 und 132, direkt vor und nach dem starken Anstieg des maskierten Anteils.

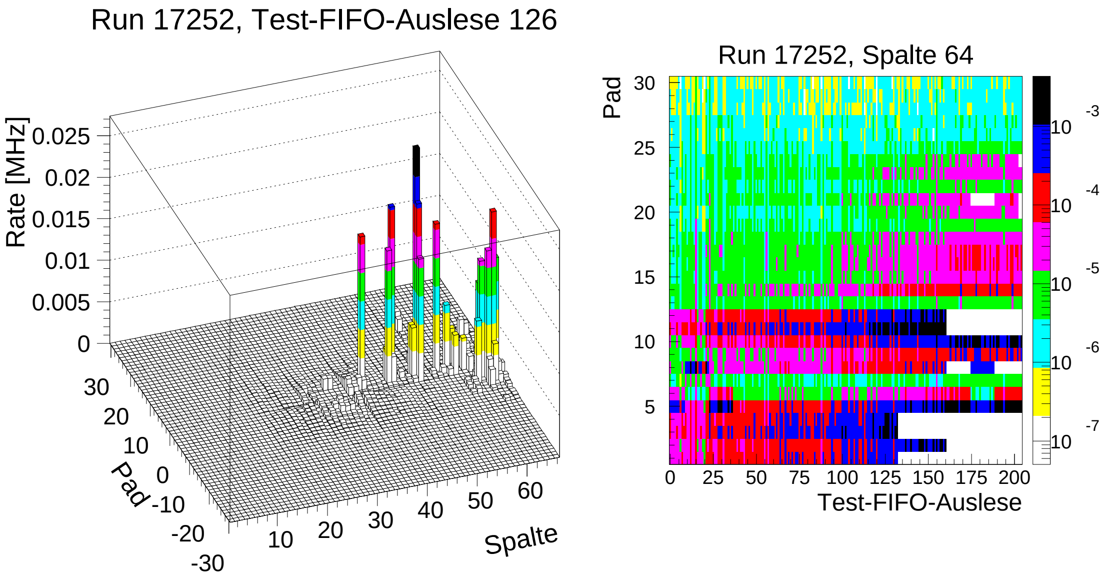

Abb. 5.8: Darstellung der Koinzidenzratenverteilung für eine Auslese der Daten der PCU-Test-FIFOs (links) und der zeitlichen Entwicklung der Koinzidenzratenverteilung für Spalte 64 (rechts). Zwischen je zwei Auslesen der Test-FIFOs liegen etwa 50 s. Die dargestellten Raten sind in MHz angegeben. Die Daten wurden während Run 17252 am 24.8.2000 bei einer Wechselwirkungsrate am Target von 2 MHz aufgezeichnet.

$-y$-Hälfte. Da in dem betroffenen Zeitraum die Maskierung nicht aufgrund von Defekten der Myon-Pretrigger-Hardware verändert wurde und der Effekt auf einer kurzen Zeitskala auftritt, kann es sich nur um Pads gehandelt haben, deren Trefferraten so weit anstiegen, daß sie vom Prozeß `dmon_mu_mpre` als heiß klassifiziert wurden. Zu dieser Zeit wurden zusätzliche Informationen des Monitorings von `mpre_monitor` in Dateien gespeichert, wie in Abschnitt 5.3 erläutert wird. Deshalb ist es möglich, die Ursache für die dynamisch einsetzende Maskierung darzustellen.

Im linken Teil von Abbildung 5.8 ist die Koinzidenzratenverteilung für eine Auslese der Daten aus den Test-FIFOs der PCUs während Run 17252 dargestellt. Diese Daten wurden bei einer Wechselwirkungsrate am Target von 2 MHz am 24.8.2000 genommen und entsprechen dem Zeitpunkt der Maskenaktualisierung 125. Verglichen mit einer Verteilung wie in den Abbildungen 4.41 oder 5.5 fällt auf, daß der Bereich nahe dem Protonstrahlrohr, der im Normalfall die höchsten Koinzidenzraten aufweist, hier kaum erkennbar ist. Statt dessen dominieren einzelne Datenkanäle in der $+x$-Hälfte die Verteilung. Die zeitliche Entwicklung der Koinzidenzraten wird anhand der Spalte 64 im rechten Teil von Abbildung 5.8 gezeigt. Das Ansteigen der Koinzidenzrate, das zum Ausmaskieren einzelner Datenkanäle führt, ist erkennbar. Es verdeutlicht gleichzeitig die Bedeutung und das gute Funktionieren der dynamischen Prozedur zur Ausmaskierung heißer Pads. Es ist ungeklärt, ob für das instabile Verhalten der Koinzidenzrate in diesem Fall Probleme mit der Ausleseelektronik des Myon-Detektors oder die spe-

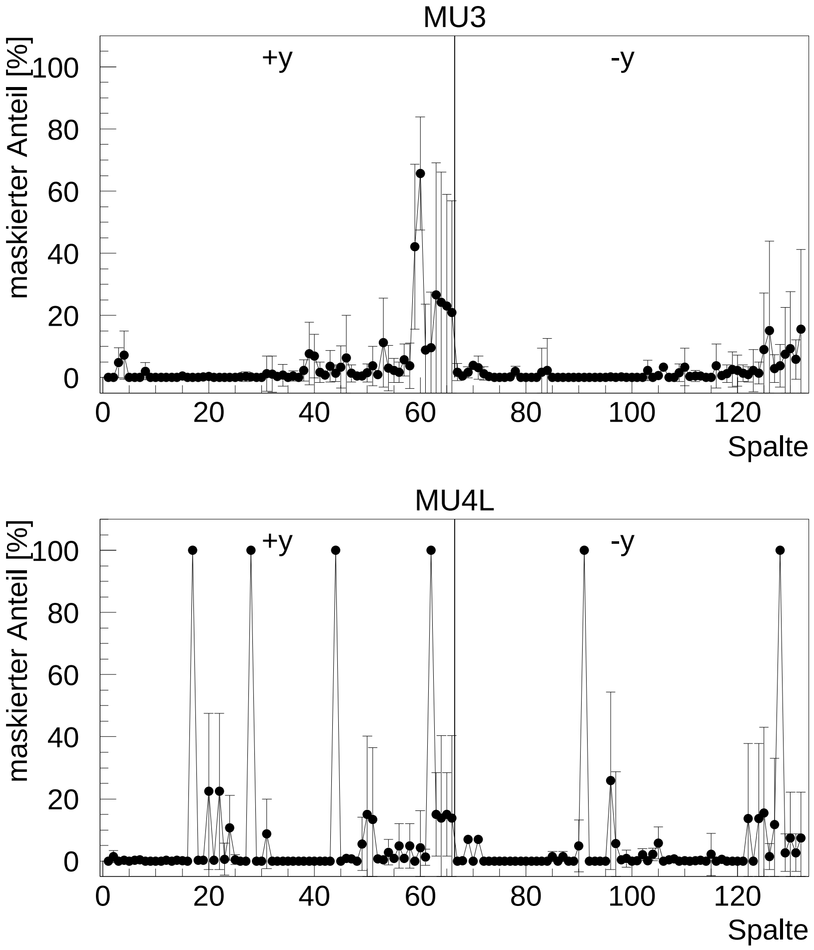

Abb. 5.9: Über alle Aktualisierungen gemittelte Anteile maskierter MU3- und MU4L-Datenkanäle für einzelne Spalten. Die dargestellten Fehler entsprechen den Standardabweichungen der Einzelwerte.

ziellen Untergrundverhältnisse des Proton- und Elektronstrahls verantwortlich waren [Nam 00a]. Zum betrachteten Zeitpunkt wurde der Elektronstrahl mit einer erniedrigten Energie von 12 GeV anstelle von 27,5 GeV betrieben und nicht mit dem Protonstrahl zur Kollision gebracht. In jedem Fall ist die Qualität der genommenen Daten negativ beeinflußt worden. Dies legt die Verwendung des Anteils maskierter Pads als einen möglichen Parameter für die Beurteilung der Datenqualität in der Online-Software nahe.

Bei einer spaltenweisen Darstellung des mittleren Anteils maskierter Datenkanäle, wie in Abbildung 5.9 für MU3 und MU4L, tritt der behandelte Bereich nahe dem $+x$-Rand des Systems für MU3 deutlich hervor. Für MU4L fallen die sechs Spalten mit einem Anteil von je 100 % auf, die durch defekte Hardware-Kanäle verursacht werden. In vier Fällen handelt es sich um Defekte, die vor der Verteilung der Daten auf die einzelnen Koinzidenzkanäle auftreten, so daß MU4L, MU4M und MU4R betroffen

Tab. 5.6: Mit simulierten Verteilungen gemäß Gleichung 5.2 gewichtete Anteile maskierter Datenkanäle für das gesamte System sowie für MU3 und MU4 einzeln. Die Ergebnisse sind auch für die $+y$- und die $-y$-Hälften einzeln aufgeführt.

Bereich	Gewichteter Anteil maskierter Datenkanäle in % für		
	System	MU3	MU4
alles	4,5 ± 2,5	2,0 ± 2,4	7,3 ± 3,3
$+y$	5,8 ± 3,0	2,9 ± 3,4	9,0 ± 3,0
$-y$	3,1 ± 2,5	1,0 ± 1,4	5,6 ± 4,3

sind. In zwei Fällen sind defekte Treiberbausteine, die für die Randspaltenübertragung verwendet werden, verantwortlich. Dies hat deshalb keine Auswirkungen auf MU4M und MU4R, für die der Anteil maskierter Datenkanäle entsprechend etwas kleiner ist. Wenn der Anteil der Maskierungen aufgrund von Hardware-Defekten von den Anteilen in Tabelle 5.5 abgezogen wird, wird in MU4 weniger maskiert als in MU3. Wie für die optischen Verbindungen wurde für die Datennahme im Jahr 2000 Verbesserungen im Bereich von MU3 eine größere Priorität eingeräumt, während die Probleme für MU4 erst für die zukünftige Datennahme im Jahr 2001 beseitigt werden können.

Da die Maskierungen in MU3 aber fast ausschließlich im äußeren Bereich liegen, der weniger zur Koinzidenzrate beiträgt, werden analog zum Vorgehen bei den optischen Verbindungen skalierte Werte berechnet. Für jeden maskierten Datenkanal werden Gewichte gemäß Gleichung (5.2) bestimmt, wobei ein solcher Normierungsfaktor N verwendet wird, daß die Summe aller Gewichte der Gesamtzahl von Pads in MU3, MU4L, MU4M bzw. MU4R entspricht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können Tabelle 5.6 entnommen werden. Die systemweiten Werte bleiben gegenüber den unskalierten Werten aus Tabelle 5.5 annähernd unverändert, genauso wie die relative Verteilung zwischen der $+y$- und der $-y$-Hälfte. Durch die Gewichtung verkleinert sich aber der Beitrag von MU3, während der von MU4 größer wird. In MU3 wird der Anteil maskierter Datenkanäle durch den oben ausführlich beschriebenen Anteil am äußeren Rand der $+x$-Seite bestimmt, der aufgrund seines relativ geringen Beitrags zur Koinzidenzrate mit kleinen Gewichten versehen ist. Dagegen gibt es, wie für MU4L in Abbildung 5.9 gezeigt, in MU4 einige maskierte Bereiche in der zentralen Region, die sehr stark gewichtet werden.

Da Verbesserungen der Situation bezüglich der Hardware-Defekte in MU4 in der Zwischenzeit bereits erreicht worden sind und Anstrengungen für ein stabileres Verhalten des Myon-Detektors und der Ausleseelektronik unternommen werden [Nam 00b, Gil 01], ist davon auszugehen, daß der Anteil maskierter Datenkanäle für den untersuchten Zeitraum von $\mathcal{R}_{\text{maskiert}} = 4,5\,\%$ in Zukunft verkleinert werden kann. Effektiv bedeutet dieser Anteil eine Verkleinerung der Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems auf 95,5 % gegenüber einem System ohne maskierte Datenkanäle. Für Analysen der Daten ist die Verteilung der Maskierungen ebenso wichtig wie der Anteil. Diese Informationen können prinzipiell von der Online-Software bereitgestellt werden, wie die dargestellten Ergebnisse zeigen.

5.3 Untersuchungen der Koinzidenzrate

Eine weitere wichtige Größe zur Charakterisierung der Funktion des Myon-Pretrigger-Systems ist – neben der Qualität der optischen Datenübertragung und der PCU-Maskierung – die Koinzidenzrate, d. h. die Rate aller zu einem bestimmten Zeitpunkt gefundenen Koinzidenzen. Sie erlaubt einerseits einen Vergleich mit erwarteten Werten, die durch Simulationen gewonnen werden können, andererseits ist sie ein wichtiger Parameter für die Funktion der ersten Triggerstufe. Sowohl die Koinzidenzrate als auch ihre räumliche und zeitliche Verteilung haben einen großen Einfluß auf die Latenzzeit des FLT. Abhängig vom Aufbau des Netzwerkes der FLT-Prozessoren und dem Austausch von Nachrichten zwischen ihnen kann diese Latenzzeit zu einer Totzeit des Triggers führen, wenn das Netzwerk durch zu viele Nachrichten innerhalb von kurzer Zeit blockiert wird.

Die Koinzidenzrate des Myon-Pretriggers ist – neben den physikalischen Prozessen – von mehreren internen und externen Parametern abhängig. Intern wird sie von der Qualität der optischen Verbindungen und dem Anteil maskierter Datenkanäle beeinflußt, die die effektive Akzeptanz einschränken und damit die Koinzidenzrate verkleinern können. Defekte Kanäle der Myon-Pretrigger-Hardware können die Rate im betroffenen Bereich und damit die Koinzidenzrate erhöhen, wenn sie noch nicht erkannt und in der Tabelle MASK_BP eingetragen sind. Zu den externen Parametern, die außerhalb des Myon-Pretriggers liegen, zählen die Wechselwirkungsrate am Target sowie das Verhalten des Myon-Detektors und der Ausleseelektronik. Solche Effekte können nur dann quantitativ in dieser Analyse berücksichtigt werden, wenn sie zu einer Veränderung der Masken führen, da z. B. Pads eine so hohe Trefferrate aufweisen, daß sie als heiß klassifiziert werden.

Im folgenden wird die Abhängigkeit der Koinzidenzrate des Pad-Systems von der Wechselwirkungsrate am Target untersucht, wobei ausschließlich Informationen des Monitorings der Online-Software verwendet werden. Da das Pixel-System während der Datennahme im Jahr 2000 noch nicht regelmäßig betrieben wurde, wird es in die folgenden Untersuchungen nicht mit einbezogen. Als Grundlage der Auswertung dienen Daten, die während eines Raten-Scans am 23. und 24.8.2000 aufgenommen wurden. Während dieses Scans ist die Wechselwirkungsrate am Target in Stufen erhöht worden. In Tabelle 5.7 sind einige Parameter der zugehörigen Runs zusammengestellt. Die Wechselwirkungsrate wurde innerhalb eines kurzen Zeitraums von weniger als zwei Stunden von 5 MHz bis 20 MHz variiert, so daß davon ausgegangen werden kann, daß das grundlegende Verhalten des Detektors konstant blieb. Zusätzlich wird der Run 17242 untersucht, der nach einer Unterbrechung für die Injektion der Proton- und Elektronstrahlen in den Speicherring mit einer Wechselwirkungsrate von 2 MHz aufgenommen wurde.

Während des Zeitraums vom 23.8.2000 bis zum Ende der Datennahme am 25.8.2000 wurden zusätzliche Informationen des Monitorings vom Prozeß `mpre_monitor` lokal in Dateien gespeichert. Dabei handelte es sich um die Daten, die sonst nur als `rhp`-Histogramme (Remote Histogramming Package) während der Datennahme zur Verfügung stehen, aber nicht dauerhaft gespeichert werden können. Da das pro Tag anfallende Speichervolumen 500 MByte betrug, konnten die Daten nur für den kurzen Zeitraum

Tab. 5.7: Wechselwirkungsrate und Zeitraum für die Runs des untersuchten Raten-Scans am 23. und 24.8.2000. Run 17242 ist abgehoben, weil er einige Stunden nach dem eigentlichen Raten-Scan aufgenommen wurde.

Run-Nummer	Wechselwirkungsrate	Zeitraum
17235	5 MHz	23.8., $22^{\underline{14}}$ – $22^{\underline{39}}$
17236	10 MHz	23.8., $22^{\underline{59}}$ – $23^{\underline{17}}$
17237	15 MHz	23.8., $23^{\underline{20}}$ – $23^{\underline{38}}$
17238	20 MHz	23.8., $23^{\underline{40}}$ – 24.8., $0^{\underline{04}}$
17242	2 MHz	24.8., $9^{\underline{40}}$ – $10^{\underline{16}}$

aufgezeichnet werden. Sie werden, zusammen mit den in der Datenbank und den Logdateien gespeicherten Informationen, für eine detaillierte Analyse der Monitoring-Daten des Raten-Scans genutzt. Außerdem dienen sie dazu, neue Prozeduren für das Monitoring abzuleiten, um aus den verfügbaren Daten neue Informationen über den Zustand und die Funktion des Myon-Pretriggers zu gewinnen.

5.3.1 Abschätzung der Koinzidenzrate mit Hilfe der PCU-Zähler

Als Basis für eine Abschätzung der Koinzidenzrate des Myon-Pretrigger-Systems können nur die beiden Zähler im Koinzidenz-CPLD der PCU dienen. Da in den nachfolgenden Triggerstufen eine weitere Reduzierung der Rate bis zum endgültigen Speichern erfolgt und keine Informationen über Normierung der vom Triggersystem akzeptierten auf die Anzahl der verworfenen Ereignisse zur Verfügung steht, ist aus diesen Daten kein Rückschluß mehr auf die Rate des Myon-Pretriggers möglich.

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wurde, wird der Koinzidenzzähler bei jedem Schreibzugriff auf die Auffang-FIFOs inkrementiert, zählt also die Zahl von Zyklen, in denen mindestens eine Koinzidenz auftritt. Der Zykluszähler wird bei der Prozessierung jeden Zyklus um eins erhöht und dient somit zur Normierung. Aus dem Verhältnis beider Werte kann für jeden Koinzidenzkanal eine Koinzidenzrate R_{Koinz} gemäß

$$R_{\mathrm{Koinz}}[\mathrm{MHz}] \equiv 20{,}8 \cdot \frac{\text{Wert des Koinzidenzzählers}}{\text{Wert des Zykluszählers}} \tag{5.3}$$

abgeschätzt werden. Die mittlere Frequenz der Prozessierung von Zyklen – und damit die maximale so abgeschätzte Koinzidenzrate – beträgt 20,8 MHz. Wenn innerhalb eines Zyklus mehr als eine Koinzidenz auftritt, wird dies vom Koinzidenzzähler nicht berücksichtigt. Deshalb wird die wirkliche Koinzidenzrate je häufiger dies auftritt, desto mehr systematisch unterschätzt. Um die Rate für das gesamte Myon-Pretrigger-System aus den Werten der einzelnen Koinzidenzkanäle kombinieren zu können, muß die Größe dieses Effektes abgeschätzt werden.

Dies kann auf drei prinzipiell unterschiedliche Weisen erfolgen. Bei Verwendung von Monte Carlo-Simulationsrechnungen über die Verteilung von Koinzidenzen im Myon-

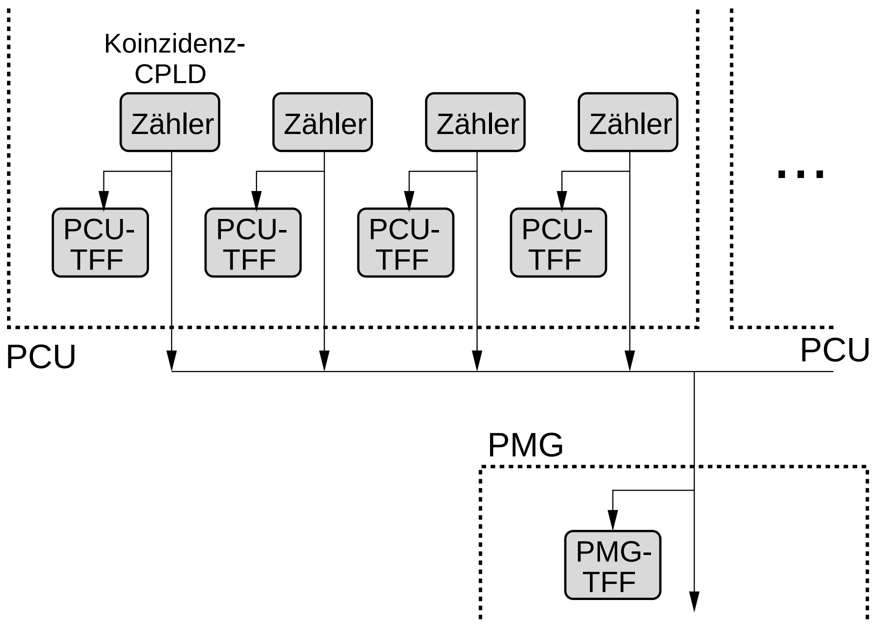

Abb. 5.10: Schematische Darstellung der Quellen für Monitoring-Informationen für ein Segment, d. h. zwei PCUs und ein PMG. Eine PCU ist aus Darstellungsgründen nur angedeutet. Es stehen die acht Koinzidenz- und Zykluszähler der Koinzidenz-CPLDs, die acht PCU-Test-FIFOs (PCU-TFF) und der PMG-Test-FIFO (PMG-TFF) für das Monitoring zur Verfügung.

Pretrigger-System bleiben Unsicherheiten, inwieweit die Simulation die wirkliche Situation beschreibt. Für die Rekonstruktion von Myon-Spuren gibt es z. B. deutliche Diskrepanzen zwischen der Simulation und Messungen [Fom 00]. Auch mit Hilfe von gespeicherten Daten kann untersucht werden, wie häufig mehr als eine Koinzidenz im selben Zyklus auftritt. Wie oben erwähnt, mußten diese Daten jedoch alle Triggerstufen durchlaufen. Dadurch können sowohl Ereignisse, die Koinzidenzen enthalten, verworfen werden als auch spezielle Klassen von Ereignissen angereichert werden, die viele Treffer und viele Koinzidenzen im Myon-System aufweisen. Bei Ereignissen mit vielen Treffern gibt es mehr kombinatorische Möglichkieten, diese zu Spuren zu kombinieren, und sie können deshalb besonders von der ersten und zweiten Triggerstufe angereichert werden.

Aufgrund dieser Unsicherheiten wird eine Methode angewendet, die ausschließlich auf den Informationen des Monitorings der Online-Software beruht. Neben den Zählern der Koinzidenz-CPLDs gibt es auf den Hardware-Modulen keine weitere Quelle für absolute Ratenmessungen. Deshalb werden Verhätnisse von Koinzidenzraten verwendet, die aus den Daten der PMG-Test-FIFOs gewonnen werden können. In Abbildung 5.10 sind schematisch die verwendbaren Quellen für Daten des Monitorings für ein Segment der Myon-Pretrigger-Hardware dargestellt. Auf zwei PCUs stehen für jeden der acht Koinzidenzkanäle die beiden Zähler und der Test-FIFO zur Verfügung. Am Ausgang des zugehörigen PMGs befindet sich parallel zum Fluß der prozessierten Daten ebenfalls ein Test-FIFO. In den darin enthaltenen FLT-Nachrichten ist die Information, in welcher MU3-Spalte die zugehörige Koinzidenz aufgetreten ist, im Parameter ξ kodiert [Ger 98].

Daraus kann auf den PCU-Koinzidenzkanal, von dem die Daten prozessiert worden sind, geschlossen werden. Dies ist unabhängig vom verwendeten Typ der Look-up Table (LUT) des PMGs möglich, da für PHYS_MM- und PHYS_SM-LUTs dieselbe Kodierung von ξ verwendet wird. Diese beiden Typen von LUTs wurden in Abschnitt 4.2.5 beschrieben. Aus den Daten des PMG-Test-FIFOs kann folglich das Verhältnis der Koinzidenzen zwischen allen angeschlossenen PCU-Koinzidenzkanälen abgeleitet werden. Dieses Verhältnis ist nicht von der systematischen Unterschätzung der Koinzidenzrate durch die Zähler auf der PCU betroffen, da jede Koinzidenz – unabhängig davon, ob sie als einzige in einem Zyklus auftritt oder nicht – zu einem Eintrag im PMG-Test-FIFO für PHYS_SM-LUTs bzw. drei Einträgen für PHYS_MM-LUTs führt. Da für LUTs vom Typ PHYS_MM bei mehr als 99 % der Koinzidenzen drei FLT-Nachrichten pro Koinzidenz erzeugt werden, ändert sich das Verhältnis der Koinzidenzkanäle durch die Erzeugung mehrerer Nachrichten nicht.

Um die Größe der systematischen Unterschätzung der wirklichen Koinzidenzrate untersuchen zu können, wird zusätzlich das Verhältnis der Koinzidenzkanäle auf der Basis der Zählerwerte für die einzelnen Kanäle gebildet. Da dieses Verhältnis im Gegensatz zu dem auf den ξ-Werten basierenden Verhältnis von der Ratenunterschätzung betroffen ist, kann ihre Größe aus einem Vergleich beider Werte bestimmt werden. Eine notwendige Voraussetzung hierfür besteht darin, daß sich die Raten der PCU-Kanäle, die mit demselben PMG verbunden sind, deutlich unterscheiden. Wenn alle Koinzidenzkanäle ähnliche Raten aufweisen, ist die systematische Unterschätzung bei allen ungefähr gleich, so daß die beiden zu vergleichenden Verhältnisse keine Abweichungen aufweisen.

Für jeden PMG werden zwei Verhältnisse berechnet, das ξ-Verhältnis und das Zählerverhältnis. Das ξ-Verhältnis $\mathcal{R}_\xi$ für eine Spalte s, deren zugehöriger Koinzidenzkanal mit dem PMG verbunden ist, ist definiert als

$$\mathcal{R}_\xi(s) \equiv \frac{\xi\text{-Anteil}(s)}{\text{größter } \xi\text{-Anteil auf PMG}} \quad . \tag{5.4}$$

Dabei bezeichnet ein Anteil hier – wie auch im folgenden – den Quotienten aus dem Wert für eine Spalte und allen Werten für den PMG. Die Normierung auf den größten ξ-Anteil, der auf einem PMG auftritt, ist gewählt worden, da so ein Bezug auf Koinzidenzkanäle mit problematischem Verhalten am besten vermieden werden kann. Dieses zeigt sich oft durch eine besonders niedrige Rate von Koinzidenzen. Das Zählerverhältnis $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$ wird gemäß

$$\mathcal{R}_{\text{Zähler}}(s) \equiv \frac{\text{Zähler-Anteil}(s)}{\text{Zähler-Anteil der Spalte mit größtem } \xi\text{-Anteil auf PMG}} \tag{5.5}$$

auf dieselbe Spalte, d. h. denselben Koinzidenzkanal normiert wie $\mathcal{R}_\xi$. Zum Vergleich der beiden Verhältnisse wird das Doppelverhältnis

$$\mathcal{R}_{\xi/\text{Zähler}}(s) \equiv \frac{\mathcal{R}_\xi(s)}{\mathcal{R}_{\text{Zähler}}(s)} \tag{5.6}$$

herangezogen.

In Abbildung 5.11 sind beispielhaft für PMG 10 das ξ- und das Zählerverhältnis sowie das Doppelverhältnis für die Runs des Raten-Scans dargestellt. Die Identifikationsnummer eines PMGs setzt sich aus der Nummer des Crates, in dem es installiert

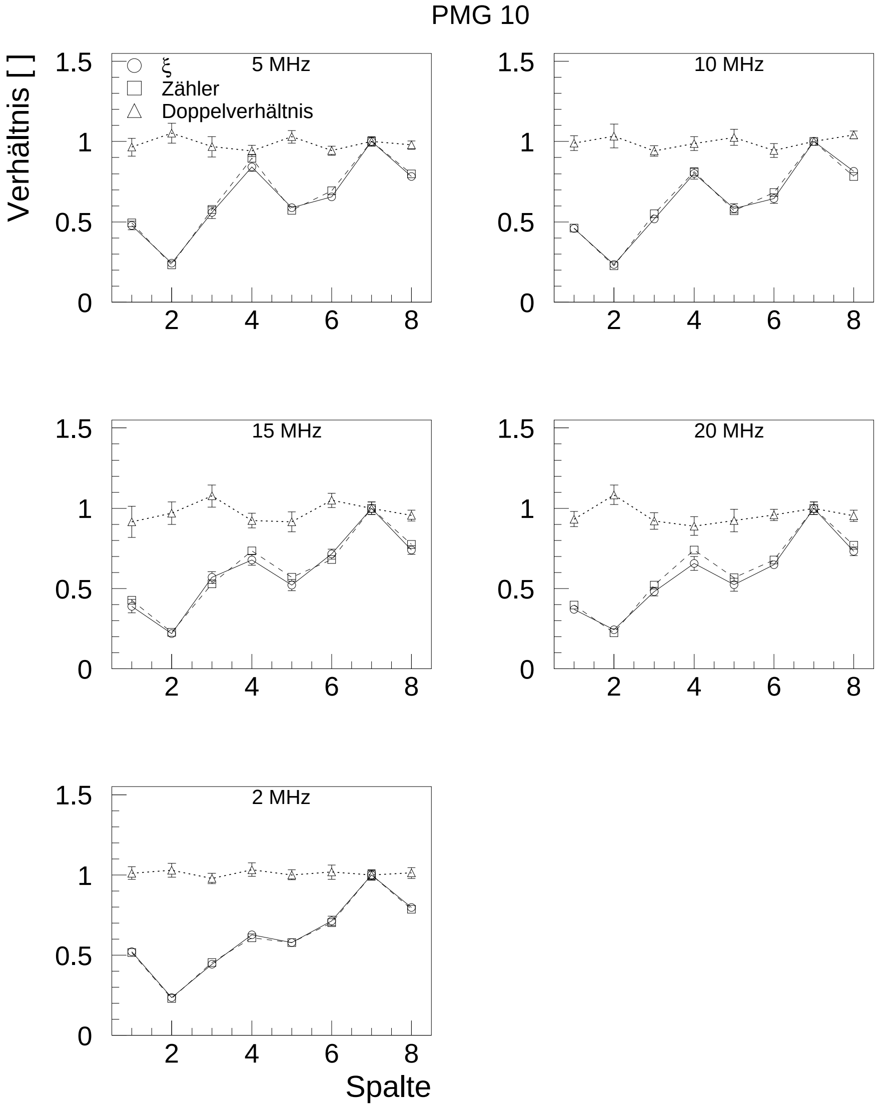

Abb. 5.11: ξ-, Zähler- und Doppelverhältnis für PMG 10 für alle Runs des Raten-Scans. Die angeschlossenen PCU-Kanäle prozessieren Koinzidenzen für die Spalten 1 bis 8.

ist, und der Segment-Nummer zusammen. PMG 10 ist in Crate 1 in Segment 0 eingebaut und prozessiert, wie aus der Zuordnung der Myon-Pretrigger-Hardware zu den Detektoreinheiten in Abbildung 3.14 ersichtlich ist, die Koinzidenzinformationen für die Spalten 1 bis 8. Zwischen Spalte 2 mit dem kleinsten Wert für $\mathcal{R}_\xi$ und Spalte 7 mit dem größten Wert, der definitionsgemäß 1 beträgt, liegt etwa ein Faktor 4, d. h. die Unterschiede in den Raten sind ausreichend groß, um eine systematische Unterschätzung der Koinzidenzraten beobachten zu können. Für alle Runs stimmen die Verläufe von $\mathcal{R}_\xi$ und $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$ innerhalb der Fehler überein. Als Fehler werden die Standardabweichungen der Mittelwerte angegeben. Da ein PMG-Test-FIFO nur 128 FLT-Nachrichten enthält, sind

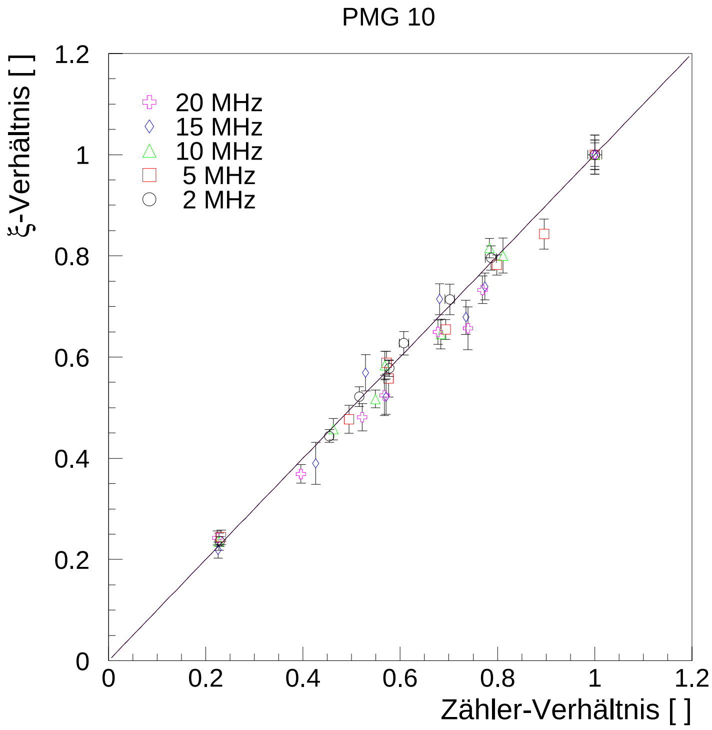

Abb. 5.12: Darstellung des ξ-Verhältnisses in Abhängigkeit vom Zählerverhältnis für PMG 10 für alle Runs des Raten-Scans. Die eingezeichnete Gerade entspricht der Erwartung für eine vollständige Korrelation.

die statistischen Schwankungen und damit die relativen Fehler für $\mathcal{R}_\xi$ deutlich größer als diejenigen für $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$. Sie dominieren auch den Fehler des Doppelverhältnisses, das gut mit 1 übereinstimmt. Es ist also kein deutlicher systematischer Unterschied zwischen den Verhältnissen beobachtbar. Dies wird auch in Abbildung 5.12 deutlich, in der für PMG 10 $\mathcal{R}_\xi$ gegen $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$ für alle untersuchten Runs aufgetragen ist. Innerhalb der Fehler stimmen alle Werte mit den erwarteten überein, die bei einer vollständigen Korrelation zwischen beiden Verhältnissen angenommen werden, wenn also der systematische Effekt vernachlässigt werden kann.

Zur Quantifizierung der Korrelation zwischen $\mathcal{R}_\xi$ und $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$ wird für jeden PMG und für jeden Run der Korrelationskoeffizient ρ nach Gleichung (5.1) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Deutliche Abweichungen von einer vollständigen Korrelation, d. h. $\rho = 1$, sind bei den PMGs 21, 30, 40 und 62 für alle Runs, für einige Runs auch bei den PMGs 20 und 51 zu beobachten. Die anderen 12 PMGs zeigen eine sehr starke Korrelation. Um unterscheiden zu können, ob diese Abweichungen in der systematischen Ratenunterschätzung begründet liegen oder andere Ursachen haben, werden nähere Untersuchungen durchgeführt.

Eine genauere Zuordnung der Abweichungen zu Koinzidenzkanälen erlaubt Abbildung 5.14, in der die Doppelverhältnisse aller PMGs für Run 17235 bei einer Wech-

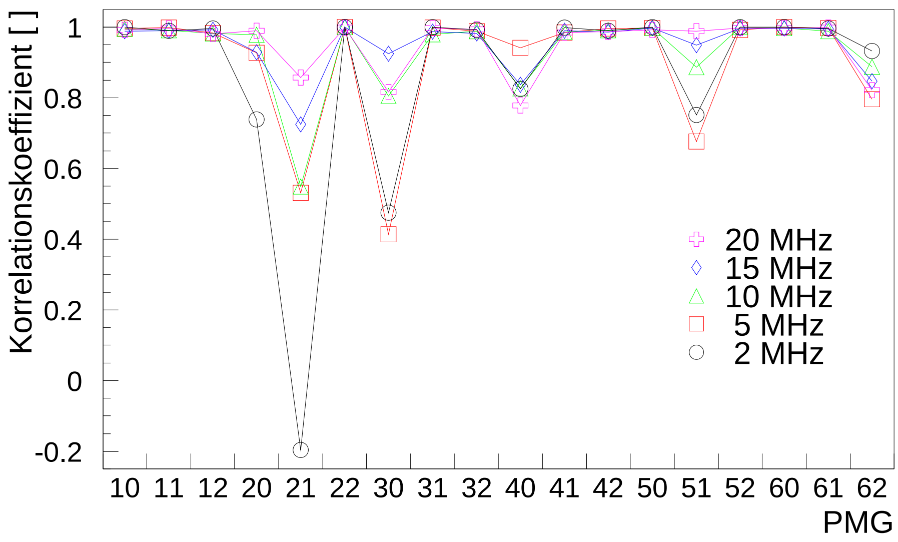

Abb. 5.13: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Korrelation zwischen $\mathcal{R}_\xi$ und $\mathcal{R}_{\text{Zähler}}$ für jeden PMG und jeden Run.

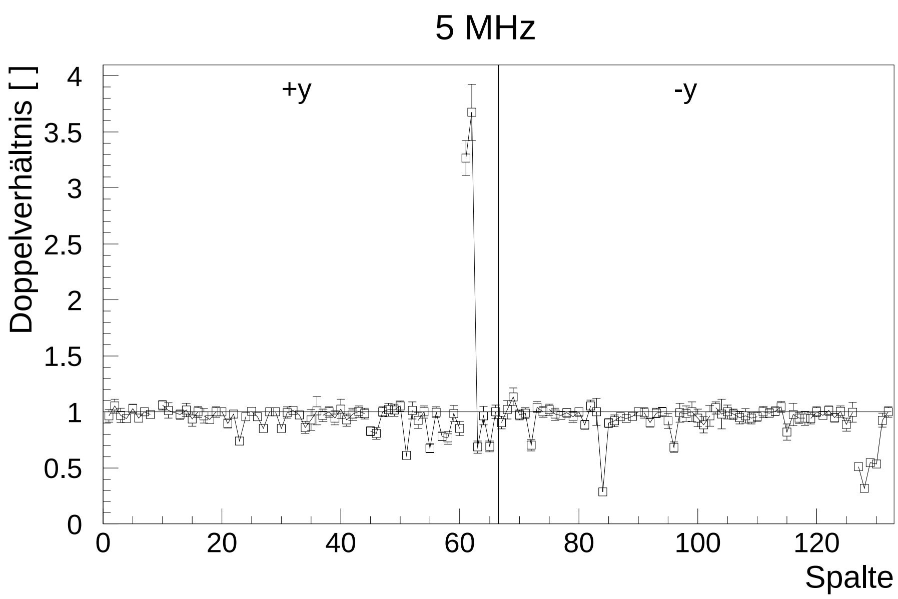

Abb. 5.14: Darstellung der Doppelverhältnisse aller PMGs für Run 17235, der bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz aufgenommen wurde. Die zu jeweils einem PMG gehörenden Werte sind miteinander verbunden.

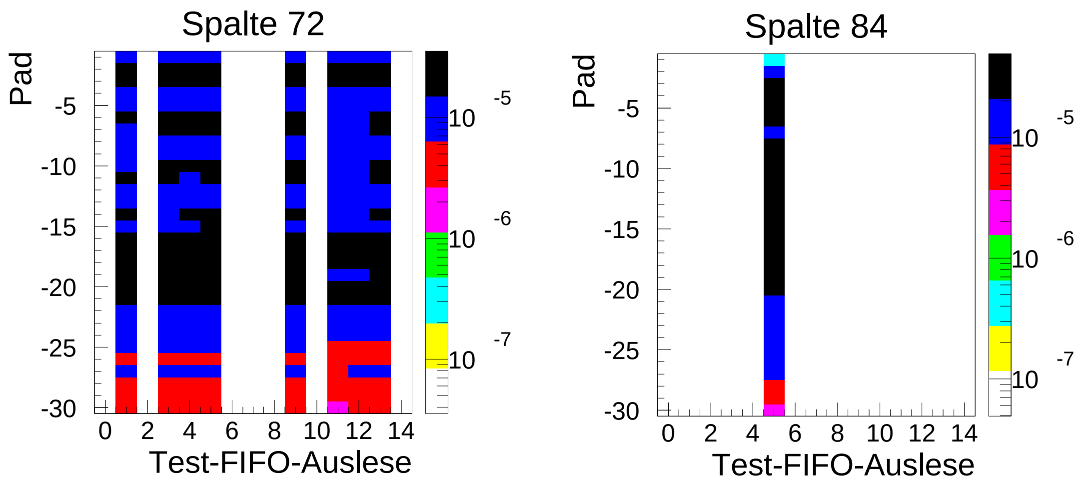

Abb. 5.15: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Koinzidenzratenverteilung für die Spalten 72 und 84 für Run 17235. Die Daten für eine dargestellte Auslese der PCU-Test-FIFOs sind über fünf einzelne Auslesen summiert, die alle 10 s durchgeführt werden. Die Zeitabstände der Auslesen der PCU-TestFIFOs betragen also 50 s. Die dargestellten Koinzidenzraten sind in MHz angegeben.

selwirkungsrate von 5 MHz zusammengefaßt sind. Die deutlichsten Abweichungen von $\mathcal{R}_{\xi/\text{Zähler}} = 1$ sind im äußeren Bereich des Pad-System auf der $+x$-Seite zu beobachten, für die Spalten 53 bis 66 der $+y$-Hälfte und 127 bis 132 der $-y$-Hälfte. Dies entspricht den PMGs 20, 21 und 51. Bei einer Auswertung der von `mpre_monitor` herausgeschriebenen zusätzlichen Informationen fallen für diesen Bereich große Schwankungen der Raten auf, obwohl sich die Maskierung im untersuchten Zeitraum nur geringfügig ändert. Bei der Auswertung der Maskierungen in Abschnitt 5.2 wurden für einen anderen Zeitraum in diesem Bereich Instabilitäten beobachtet, die von der Ausleseelektronik des Myon-Detektors herrühren können. Deshalb liegt die Annahme nahe, daß der äußerste Bereich in $+x$-Richtung sich auch während des Raten-Scans instabil verhielt. Aus diesem Grund wird dieser Bereich für die Untersuchung der systematischen Ratenunterschätzung nicht berücksichtigt.

Weitere deutliche Abweichungen von $\mathcal{R}_{\xi/\text{Zähler}} = 1$ weisen auch die Spalten 23, 72 und 84 auf. Für die beiden letztgenannten ist in Abbildung 5.15 beispielhaft die zeitliche Entwicklung der Koinzidenzratenverteilung für Run 17235 aus den Daten der PCU-Test-FIFOs dargestellt, Spalte 23 zeigt ein analoges Verhalten. Für Spalte 72 fehlen Daten für sechs, für Spalte 84 sogar für 13 der insgesamt 14 Auslesen der Test-FIFOs. Dies rührt entweder daher, daß der Test-FIFO nicht vollständig gefüllt war und deshalb nicht ausgelesen wurde, oder daher, daß der Wert des Koinzidenzzählers 0 war. Nach der Auslese des Test-FIFOs werden die Zähler im zugehörigen Koinzidenz-CPLD für kurze Zeit betrieben, um den Skalierungsfaktor bestimmen zu können. Dieser wird verwendet, um die Einträge einzelner Koinzidenzkanäle für globale Verteilungen gegeneinander zu gewichten. Die Koinzidenzraten der Spalten 23, 72 und 84, die aus dem

Verhältnis der Zähler gewonnen werden, zeigen kein auffälliges Verhalten verglichen mit ihren Nachbarspalten.

Für den Unterschied zu den Daten des PCU-Test-FIFOs gibt es zwei mögliche Erklärungen. Einerseits kann die Zeitdauer, in der die Zähler für die Bestimmung des Skalierungsfaktors betrieben werden, so kurz gewählt worden sein, daß in dieser Zeit keine Koinzidenzen auftreten. Wenn der Skalierungsfaktor deshalb 0 ist, können für die Test-FIFO-Auslese keine Daten dargestellt werden. Andererseits kann eine fehlerhafte optische Verbindung das vollständige Füllen des Test-FIFOs verhindern. Dann werden aus diesem Grund keine Daten dargestellt. Wenn die Verbindung zumindest so lange funktioniert, daß beim eigenständigen Monitoring der Zählerwerte überhaupt Koinzidenzen auftreten, werden die Absolutwerte der Zähler durch den Ausfall der Datenübertragung verkleinert, ihr Verhältnis bleibt aber unbeeinflußt. In der jetzigen Form des Monitorings kann zwischen den beiden Erklärungsmöglichkeiten ohne Hinzunahme zusätzlicher Informationen nicht unterschieden werden. Deshalb müssen zukünftig zusätzlich zum Verhältnis der Zählerwerte auch ihre Absolutwerte einbezogen werden. Aus den Untersuchungen der optischen Datenübertragung in Abschnitt 5.1 ist bekannt, daß die Verbindungen 3:23, 3:72 und 3:84 während des Raten-Scans mit hohen Fehlerraten behaftet waren, wie unter anderem Abbildung 5.3 zu entnehmen ist. Somit kann davon ausgegangen werden, daß in diesem Fall die zweite Erklärungsmöglichkeit zutrifft.

Der beschriebene Effekt führt zu einer Überschätzung der Koinzidenzrate, wenn zu ihrer Bestimmung die Zählerwerte verwendet werden. Dies kann vermieden werden, wenn statt dessen aus den Werten des Monitorings der PCU-Test-FIFOs Koinzidenzraten berechnet werden. Dazu werden die Beiträge aller Pads für eine Spalte, d. h. einen Koinzidenzkanal, summiert und die Gesamtrate als Summe der 132 Einzelwerte bestimmt. In Abbildung 5.16 ist für jede Spalte s die Differenz

$$\Delta R_{\mathrm{Koinz}}(s) \equiv R_{\mathrm{Koinz}}(\text{Zähler})(s) - R_{\mathrm{Koinz}}(\text{PCU-Test-FIFO})(s) \quad , \tag{5.7}$$

normiert auf $R_{\mathrm{Koinz}}(\text{Zähler})(s)$, dargestellt. Abweichungen treten besonders deutlich für einzelne Spalten auf. Diese zeigen immer höhere Werte auf Basis der Zähler als aus den PCU-Test-FIFOs. Mit Hilfe der Ergebnisse der Untersuchungen zu den optischen Verbindungen können sie mit den fehlerbehafteten Datenübertragungen für die Spalten 4:15, 3:16, 3:23, 4:33, 4:34, 4:67, 3:72, 4:83 und 3:84 erklärt werden. Aufgrund des Koinzidenzschemas wirken sich die Fehler der Verbindungen für MU4-Spalten auf drei Koinzidenzkanäle aus. Abweichungen zu kleineren Raten aus den Zählerwerten treten nur für den bereits als instabil beschriebenen äußersten Rand des Systems in $+x$-Richtung auf.

Weitere deutliche Abweichungen des Doppelverhältnisses von 1 sind in Abbilding 5.14 für die Spalten 51 und 96 zu erkennen. Sie lassen sich nicht mit fehlerhaften optischen Datenübertragungen oder Instabilitäten des Myon-Detektors oder der Ausleseelektronik erklären. In Abbildung 5.17 sind die Verteilungen der Koinzidenzraten der Spalte 51 und ihrer Nachbarspalte 52 für die Auslesen der PCU-Test-FIFOs dargestellt. Beide weisen im inneren Bereich nahe dem Protonstrahlrohr, also bei kleinen Pad-Nummern, nebeneinanderliegende Pads auf, die hohe relative Koinzidenzraten zeigen. Verglichen mit der Spalte 52, deren Doppelverhältnis unauffällig ist, liegen die absoluten Raten

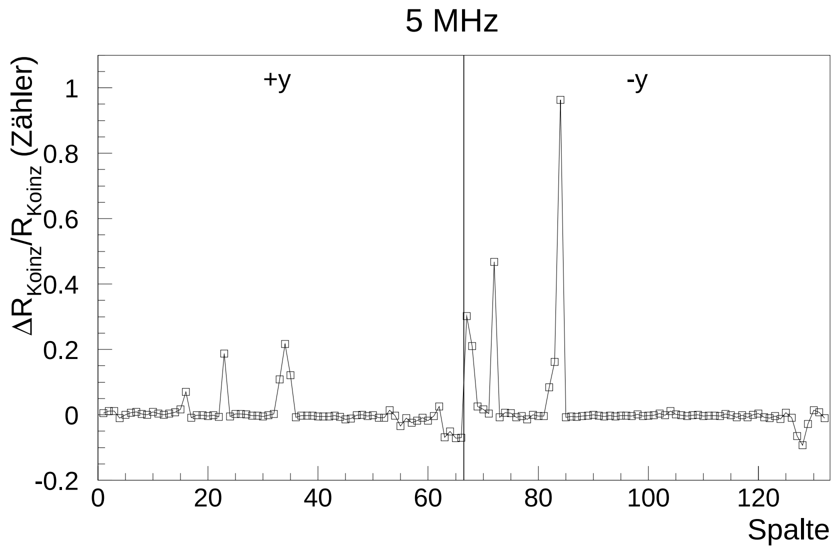

Abb. 5.16: Spaltenweise Verteilung der Differenz der Koinzidenzraten $\Delta R_{\mathrm{Koinz}}$ auf Basis der Zählerwerte und aus den Daten der PCU-Test-FIFOs, normiert auf die Raten basierend auf den Zählern.

dieser Pads in Spalte 51 jedoch um etwa eine Größenordnung höher. Ein aufgrund dieser Ratenverteilung im selben Zyklus unterschätzter Wert des Koinzidenzzählers kann für das Doppelverhältnis von $\mathcal{R}_{\xi/\mathrm{Z\ddot{a}hler}} < 1$ verantwortlich gemacht werden. Das Zählerverhältnis ist auf die Spalte mit dem höchsten ξ-Verhältnis normiert, für die deshalb mit der relativ größten Unterschätzung der Rate durch den Koinzidenzzähler zu rechnen ist. Folglich weisen andere Spalten derselben PMG eine geringere Unterschätzung und damit einen im Vergleich zum ξ-Verhältnis größeres Zählerverhältnis auf. Nach Gleichung (5.6) führt dies zu einem Doppelverhältnis $\mathcal{R}_{\xi/\mathrm{Z\ddot{a}hler}} < 1$. Die absoluten Raten der Pads in Spalte 51 von maximal etwa 3 kHz lassen eine systematische Unterschätzung der Raten sehr unwahrscheinlich erscheinen. Aber zum einen sind diese Werte selbst von dem systematischen Effekt betroffen, also unterschätzt, zum anderen zeigen Analysen, daß sehr oft benachbarte Pads im gleichen Ereignis zu Koinzidenzen führen [Ada 01b]. Solche korrelierten Effekte machen eine Unterschätzung auch bei einer relativ kleinen mittleren Rate wahrscheinlich. Für Spalte 96 und ihre Nachbarspalten können analoge Aussagen gemacht werden.

Um die systematische Unterschätzung der Koinzidenzrate quantifizieren zu können, wird für jede Rate eine χ^2-Anpassung einer Konstanten a_0 an das Doppelverhältnis $\mathcal{R}_{\xi/\mathrm{Z\ddot{a}hler}}$ auf Basis der Daten der PCU-Test-FIFOs durchgeführt. Die Werte mit erklärbaren Abweichungen aufgrund anderer Effekte, wie Instabilitäten des Myon-Detektors oder der Ausleseelektronik oder fehlerbehafteter optischer Verbindungen, werden dabei nicht verwendet. Für Run 17242 werden zusätzlich die Daten zweier PMGs aus der Anpassung herausgenommen, bei denen für diesen Run auf eine Spalte normiert würde, die Probleme aufweist. Die Ergebnisse der Anpassungen sind in Tabelle 5.8 zusammen-

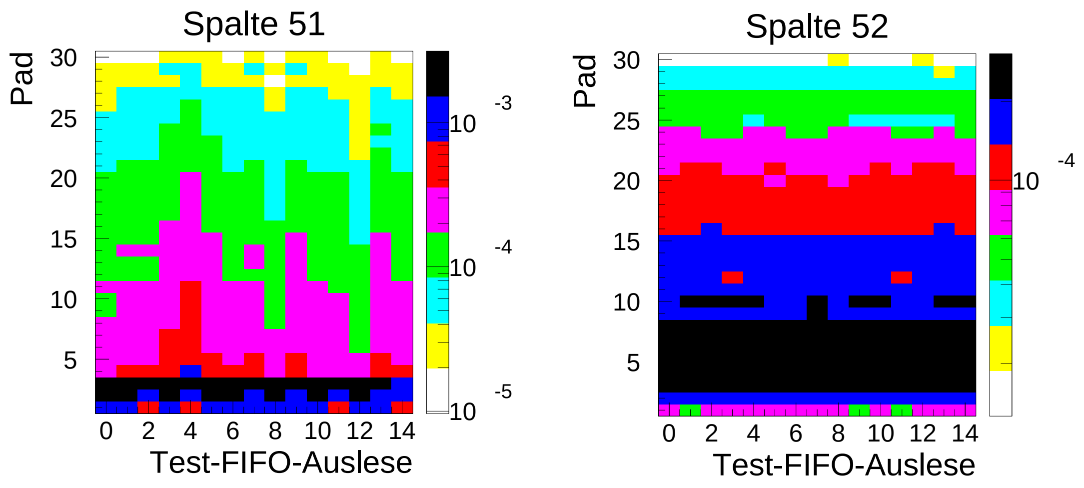

Abb. 5.17: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Koinzidenzratenverteilung für die Spalten 51 und 52 für Run 17235. Die dargestellten Koinzidenzraten sind in MHz angegeben.

gefaßt. Sie zeigen, daß das Doppelverhältnis für alle Runs etwa 3 % unter $\mathcal{R}_{\xi/\mathrm{Z\ddot{a}hler}} = 1$ liegt, aber keine Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate erkennbar ist. Die Qualität der Anpassungen ist – besonders für $R_{\mathrm{WW}} = 20\,\mathrm{MHz}$ – nicht gut, da das Verhältnis von χ^2 und der Anzahl der Freiheitsgrade der Anpassung deutlich größer als 1 ist. Dies kann damit erklärt werden, daß die systematische Unterschätzung der Koinzidenzrate durch die Zählerwerte keinen gleichmäßig über alle Spalten verteilten Effekt darstellt. Vielmehr tritt er sehr stark lokal auf, wie am Beispiel von Spalte 51 gezeigt wurde. Im Rahmen der Fragestellung wird der Effekt jedoch global betrachtet, da seine Auswirkung auf die summierte Koinzidenzrate für das gesamte System untersucht wird.

Tab. 5.8: Ergebnisse der χ^2-Anpassung einer Konstanten a_0 an die Doppelverhältnisse für die Runs des Raten-Scans bei verschiedenen Wechselwirkungsraten R_{WW}. Der Fehler von a_0 ergibt sich aus der Anpassungsrechnung. Die Qualität der Anpassung wird durch das Verhältnis von χ^2 und der Anzahl der Freiheitsgrade der Anpassung charakterisiert.

R_{WW} [MHz]	a_0	χ^2 / Anzahl Freiheitsgrade
2	0,9771 ± 0,0044	185,6 / 92
5	0,9660 ± 0,0041	317,1 / 106
10	0,9705 ± 0,0045	269,6 / 106
15	0,9760 ± 0,0049	206,9 / 106
20	0,9537 ± 0,0039	970,0 / 106

Die Unterschätzung der Koinzidenzrate kann mit Hilfe eines veränderten Monitorings zukünftig auf direktere Weise als oben beschrieben analysiert werden. Dazu ist es notwendig, nicht nur Informationen in Form von Histogrammen zur Verfügung zu haben, sondern auch zeitlich kohärente Informationen, d. h. Daten in der Abfolge und Zusammensetzung, wie sie in den Test-FIFOs enthalten sind. Aus den aufeinanderfolgenden Koinzidenzdaten wäre es dann sehr genau möglich, zu bestimmen, wie häufig mehr als eine Koinzidenz im selben Zyklus auftritt. Eine solche Möglichkeit bietet die aktuelle Implementierung des Monitorings nicht, da bisher das Ansammeln einer großen Menge von Daten, wie es effizienter in Form von Histogrammen möglich ist, im Vordergrund stand. Für systematische Studien sollte dies in Zukunft durch zeitlich kohärente Informationen ergänzt werden.

5.3.2 Die Koinzidenzrate in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate

Die Bestimmung der gesamten Koinzidenzrate des Myon-Pretrigger-Systems wird auf zwei verschiedene Arten vorgenommen. Zum einen werden die Koinzidenzraten, die für die 132 PCU-Kanäle des Pad-Systems einzeln bestimmt werden, summiert. Wie zuvor dargelegt wurde, sind sie von der systematischen Unterschätzung der wirklichen Koinzidenzrate durch die Zählerwerte betroffen. Da die so bestimmte Gesamtrate diejenige Größe ist, die ohne detaillierte Untersuchungen bereits während der Datennahme zur Verfügung steht, wird sie hier zum Vergleich aufgeführt.

Die Beeinflussung der Koinzidenzrate durch die systematische Unterschätzung und die internen Parameter, d. h. die Qualität der optischen Datenübertragung und die Maskierung von Datenkanälen, kann durch die dargestellten detaillierten Untersuchungen abgeschätzt werden. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, werden die Koinzidenzraten für die einzelnen Spalten aus den Daten der PCU-Test-FIFOs anstelle der Zählerwerte bestimmt, um das Verhalten fehlerhafter optischer Verbindungen zu berücksichtigen. Da für die gegenseitige Gewichtung der Koinzidenzkanäle Skalierungsfaktoren benutzt werden, die aus Zählerwerten bestimmt werden, sind diese Werte ebenfalls von der systematischen Ratenunterschätzung betroffen. Diese wird mit Hilfe der in Tabelle 5.8 aufgelisteten Parameter für jeden Run einzeln korrigiert. Zudem werden die gewichteten Anteile maskierter Datenkanäle für die Runs des Raten-Scans berücksichtigt, die wie in Abschnitt 5.2 beschrieben bestimmt werden. Mit ihnen werden die Koinzidenzraten so skaliert, daß dies einem System ohne Maskierungen entspricht. Die so erhaltene Koinzidenzrate stellt die beste auf der Grundlage von Monitoring-Informationen mögliche Abschätzung der wirklichen Koinzidenzrate eines Myon-Pretrigger-Systems ohne maskierte Datenkanäle dar. Eine Analyse des Verhaltens des Myon-Detektors und der Ausleseelektronik ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, wenn es nicht zu einer Maskierung führt. Als externer Parameter wird nur die Wechselwirkungsrate einbezogen.

In Tabelle 5.9 sind die Ergebnisse für die Koinzidenzraten auf Basis der Zähler und die skalierten Werte basierend auf den PCU-Test-FIFOs zusammengefaßt, in Abbildung 5.18 sind sie graphisch dargestellt. Die Ergebnisse der skalierten Daten liegen um

Tab. 5.9: Ergebnisse für die Koinzidenzrate R_{Koinz} des Myon-Pretrigger-Systems in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate R_{WW} für die Runs des Raten-Scans. Es sind die Werte auf der Basis der Zähler und aus den Daten der PCU-Test-FIFOs angegeben. Für letztere werden zusätzlich die Ratenunterschätzung und die Maskierung berücksichtigt. Der gewichtete Anteil maskierter Datenkanäle ist für jeden Run aufgeführt. Als Fehler für R_{Koinz} sind die Standardabweichungen der Mittelwerte angegeben.

R_{WW} [MHz]	R_{Koinz} [MHz]		gewichteter Anteil
	Zähler	PCU-Test-FIFO, skaliert	maskierter Kanäle
2	$0{,}213 \pm 0{,}001$	$0{,}231 \pm 0{,}004$	4,93 %
5	$0{,}563 \pm 0{,}001$	$0{,}607 \pm 0{,}005$	4,69 %
10	$1{,}155 \pm 0{,}002$	$1{,}222 \pm 0{,}009$	4,69 %
15	$1{,}861 \pm 0{,}005$	$1{,}933 \pm 0{,}021$	4,60 %
20	$2{,}631 \pm 0{,}004$	$2{,}790 \pm 0{,}020$	4,51 %

4 % bis 8 % über den nicht skalierten aus den Zählerwerten bestimmten. Die Verringerung der Raten durch Verwenden der Daten der PCU-Test-FIFOs fällt also weniger ins Gewicht als die Erhöhung wegen der Ratenunterschätzung und der Maskierung. Da die skalierten Werte durch die begrenzte Anzahl von Auslesen der PCU-Test-FIFOs größeren statistischen Schwankungen unterworfen sind als die Zählerwerte, sind ihre Fehler größer. Die Absolutwerte stimmen gut mit Monte Carlo-Simulationsrechnungen für inelastische Ereignisse überein, die 0,42 Koinzidenzen pro Bunch Crossing im Pad-System bei einer Wechselwirkungsrate von $R_{\text{WW}} = 20\,\text{MHz}$ erwarten, also eine Koinzidenzrate von 4,4 MHz [Ada 01b]. Dieser Wert liegt etwa 58 % über dem gemessenen. Dies kann jedoch zu einem großen Teil mit der mittleren Effizienz des Myon-Detektors für das Pad-System im betrachteten Zeitraum erklärt werden, die, einschließlich aller defekten Kanäle, für MU3 75 % und für MU4 68 % betrug [HER 00a]. Da für eine Koinzidenz Treffer in den beiden Superlagen MU3 und MU4 notwendig sind, kann die Detektoreffizienz für Koinzidenzen vereinfachend mit Produkt beider Werte von 51 % abgeschätzt werden.

Für die Funktion der ersten Triggerstufe ist nicht nur die gesamte Koinzidenzrate von Bedeutung, sondern auch ihre Verteilung auf die Hardware-Komponenten des FLT. Die Ausgänge der PMGs des Pad-Systems sind mit zwei Track Finding Units (TFU) verbunden, einer für die $+y$- und einer für die $-y$-Hälfte. Wie in Abbildung 5.18 ersichtlich, weist der $-y$-Bereich eine etwas höhere Rate auf, die relativen Unterschiede zu $+y$ sind aber kleiner als 10 %. Durch die Skalierung mit den gewichteten Anteilen der maskierten Datenkanäle wird diese Differenz kleiner, da der maskierte Anteil für $+y$ größer ist. Die Ausgangsrate von FLT-Nachrichten kann aus der Koinzidenzrate durch Multiplikation mit einem Faktor 3 abgeschätzt werden, da, wie bereits dargelegt, im Pad-System mehr als 99 % der Koinzidenzen zu drei FLT-Nachrichten führen. Bei der für den Beginn der Datennahme im Jahr 2001 vorgesehenen nominellen Wechselwirkungsrate von 5 MHz ist

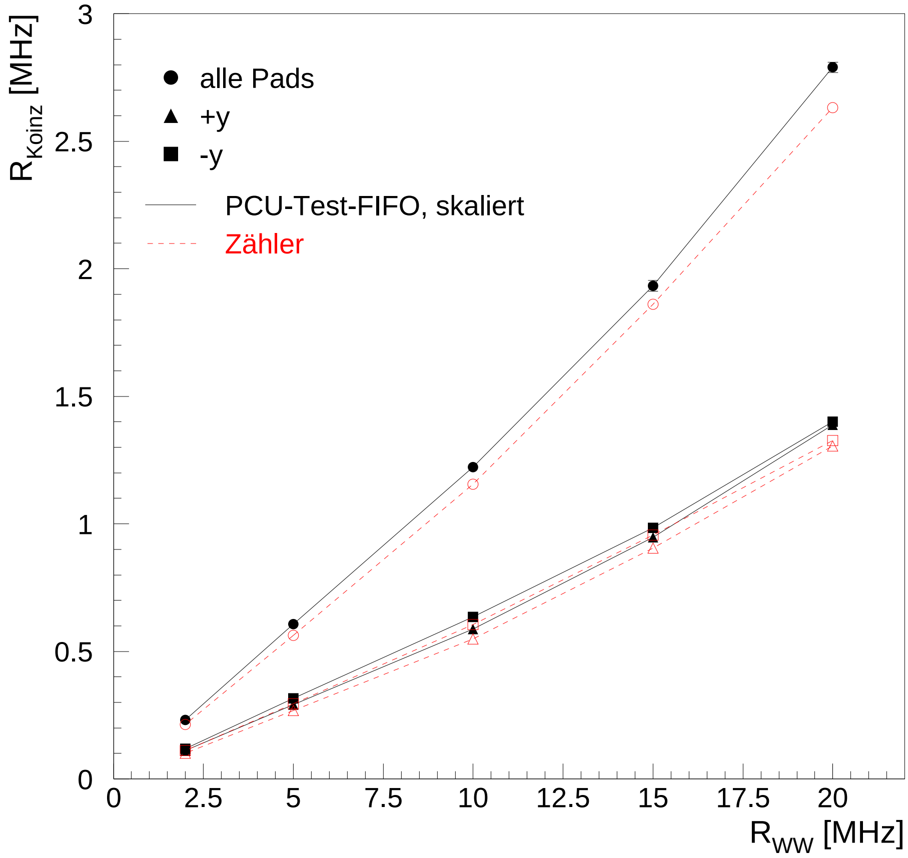

Abb. 5.18: Darstellung der Koinzidenzrate R_{Koinz} des Myon-Pretrigger-Systems in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate R_{WW} für die Runs des Raten-Scans. Es sind die Werte aus den Zählern und die skalierten Werte aus den Daten der PCU-Test-FIFOs gezeigt. Alle Daten sind auch getrennt für die $+y$- und $-y$-Hälfte dargestellt.

somit eine FLT-Nachrichtenrate von $R_{\mathrm{Nachr}} \approx 1{,}8\,\mathrm{MHz}$ zu erwarten, bei einer Effizienz des Pad-Detektors von 100 % auch bis zu 3,6 MHz.

Der Anstieg der Koinzidenzrate mit der Wechselwirkungsrate ist stärker als linear, was der Erwartung entspricht. In einfacher Näherung steigt die Anzahl der Myon-Spuren ebenso linear wie der Untergrund. Durch die Koinzidenzbildung wird der Anteil des kombinatorischen Untergrundes zwar deutlich reduziert, wächst aber quadratisch an, da zwei Superlagen des Myon-Detektors verwendet werden. Der mehr als lineare Anstieg zeigt sich in einigen Bereichen des Systems deutlicher als in anderen. Dies zeigt Abbildung 5.19, in der die unskalierten Koinzidenzraten aus den Daten der PCU-Test-FIFOs, spaltenweise auf den Wert für $R_{\mathrm{WW}} = 5\,\mathrm{MHz}$ normiert, dargestellt sind. Der bereits mehrfach erwähnte Bereich am äußersten Rand in $+x$-Richtung zeigt auch hier ein instabiles Verhalten. Neben einzelnen fehlerhaften optischen Verbindungen sind dies

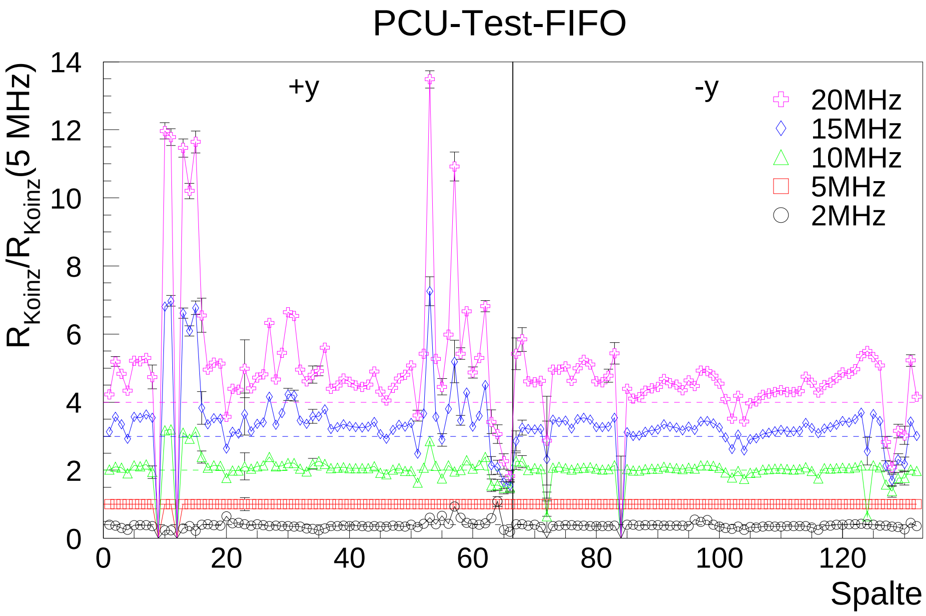

Abb. 5.19: Spaltenweise Darstellung der Koinzidenzraten aus den Daten der PCU-Test-FIFOs, die nicht skaliert sind. Alle Werte sind auf die Koinzidenzrate der Spalte für $R_{\mathrm{WW}} = 5\,\mathrm{MHz}$ bezogen. Die eingezeichneten Linien entsprechen der Erwartung bei einer linearen Abhängigkeit von R_{WW}.

die einzigen Spalten, deren Raten weniger als linear ansteigen.

Mit zunehmender Wechselwirkungsrate zeigen die Regionen um die Spalten 10 bis 15 und 55 bis 60 einen auffällig großen Anstieg der Raten. Wie an der Größe der Fehler erkennbar ist, sind die Raten hier großen Schwankungen unterworfen. Die Ursache für dieses Verhalten kann aber auch in einer relativ zu kleinen Koinzidenzrate einzelner Spalten für die Normierung bei $R_{\mathrm{WW}} = 5\,\mathrm{MHz}$ liegen. Dies kann aus Abbildung 5.20 abgeleitet werden, die die mittlere Zeit $t_{\mathrm{TFF\,voll}}$ bis zum vollständigen Füllen des PCU-Test-FIFOs für jede Spalte angibt. Die mittlere Zeit für das Auftreten von 4096 Koinzidenzen wird aus den Raten für jede Spalte s gemäß

$$t_{\mathrm{TFF\,voll}}(s) \equiv \frac{4096}{R_{\mathrm{Koinz}}(s)} \tag{5.8}$$

bestimmt. Die Koinzidenzraten werden aus den Zählerwerten bestimmt, da für die Untersuchung dieses Parameters des PCU-Test-FIFOs von diesem unabhängige Informationen benötigt werden. Für den oben erwähnten Bereich der Spalten 15 bis 20 ist $t_{\mathrm{TFF\,voll}}$ am größten, d. h. die Koinzidenzraten sind hier – besonders für die Wechselwirkungsraten von 2 MHz und 5 MHz – sehr klein. Für diese Wechselwirkungsraten wird gerade im äußeren Bereich des Systems die Periode für das Auslesen der Test-FIFOs durch den `mpre_slave`-Prozeß von 10 s deutlich überschritten. Um einen Verlust der der Daten dieser Spalten zu vermeiden, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Entweder müssen aus den Test-FIFOs auch dann die enthaltenen Daten ausgelesen werden, wenn sie nicht

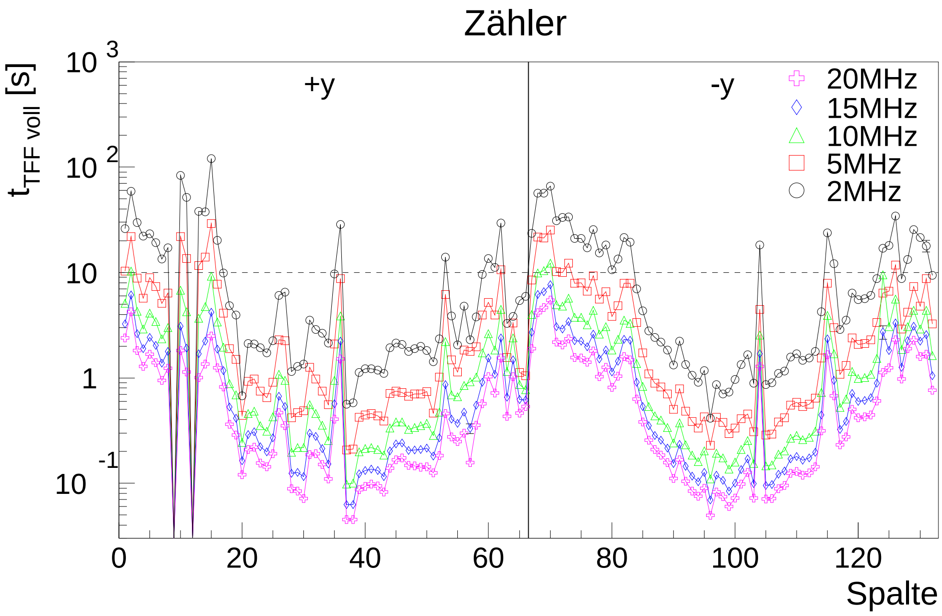

Abb. 5.20: Spaltenweise Verteilung der mittleren Zeit $t_{\mathrm{TFF\,voll}}$ bis zum vollständigen Füllen des PCU-Test-FIFOs für die Runs des Raten-Scans. Die Zeiten werden aus den Zählerwerten abgeleitet. Die Spalten 9 und 12 tragen aufgrund von Defekten der Myon-Pretrigger-Hardware nicht bei. Die eingezeichnete gestrichelte Linie stellt die maximal erlaubte Zeitdauer von 10 s dar.

voll sind, oder die Periode für die Auslese muß modifiziert werden. Da dann die Periode sowohl von der Spalte als auch der Wechselwirkungsrate abhängen müßte, sollte die erste Möglichkeit implementiert werden. Wenn der Test-FIFO nicht vollständig gefüllt ist, sollte er zukünftig durch eine Modifikation der entsprechenden Monitoring-Funktion dennoch ausgelesen werden, bis er leer ist. So gehen diese Informationen nicht verloren.

Die dargestellten Untersuchungen zeigen, daß zur Untersuchung der Koinzidenzrate des Myon-Pretrigger-Systems verschiedene Effekte berücksichtigt werden müssen, deren Untersuchung mit dem bestehenden Monitoring sehr aufwendig ist. Deshalb sind Modifikationen sinnvoll, um z. B. zeitlich kohärente Daten zur Verfügung zu stellen und die Unterschiede zwischen den Werten der Zähler und der PCU-Test-FIFOs zu vermeiden. Wenn der Anteil maskierter Datenkanäle und die mittlere Fehlerrate der optischen Datenübertragung klein sind und der Effekt der sytematischen Ratenunterschätzung – wie für die Runs des Raten-Scans – konstant ist, kann die Koinzidenzrate mit den Zählerwerten bis auf eine Abweichung von etwa 10 % abgeschätzt werden. Weitere Veränderungen des Monitorings, wie bei der Periode zum Auslesen der PCU-Test-FIFOs, sollten ebenfalls implementiert werden.

5.4 Mögliche Erweiterungen des Monitorings

Zusätzlich zu den in diesem und dem vorigen Kapitel bereits gemachten Vorschlägen für Erweiterungen des Monitorings gibt es weitere Möglichkeiten, die Funktion des Myon-Pretriggers genauer zu überwachen und die Qualität der Datennahme zu beurteilen.

Verteilung der BX-Nummer

Die Verteilung der BX-Nummer (Bunch Crossing) hat sich während des Betriebs des Myon-Pretrigger-Systems als gut geeignete Informationsquelle für die Lokalisierung von Hardware-Defekten erwiesen. Die FLT-BX-Nummer, verkürzt als BX-Nummer bezeichnet, wird vom Fast Control System (FCS) erzeugt und besteht aus acht Bits, d. h. sie deckt einen Bereich von 256 Werten ab. Die physikalische BX-Nummer, die die Position der Protonpakete im Speicherring HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) eindeutig bezeichnet, kann 220 verschiedene Werte annehmen. Es wird erwartet, daß die Verteilung der BX-Nummer einen flachen Verlauf aufweist, da sie nicht mit der physikalischen BX-Nummer korreliert ist. Wenn aber z. B. ein bestimmter Wert der physikalischen BX-Nummer besonders häufig auftritt, impliziert dies eine Struktur der BX-Verteilung, da der größte gemeinsame Teiler der Wertebereiche beider Größen 4 ist. Eine Abweichung von einer flachen Verteilung der BX-Nummer kann nur mit möglichen Defekten in Verbindung gebracht werden, wenn sie nicht durch Auffälligkeiten für die Verteilung der physikalischen BX-Nummer verursacht wird.

In Abbildung 5.21 sind die BX-Verteilungen für fünf Koinzidenzkanäle gezeigt, die Auffälligkeiten aufweisen. Die Daten stammen aus dem Monitoring der PCU-Test-FIFOs und sind während Run 17235 aufgezeichnet, für den keine Besonderheiten in der Verteilung der physikalischen BX-Nummer auftraten. Dies wurde mit Hilfe von Histogrammen der Target-Gruppe überprüft, die zur Beurteilung der Datenqualität gespeichert wurden. Somit wird eine flache BX-Verteilung erwartet. Der Koinzidenzkanal zu Spalte 4 weist eine deutliche Überhöhung des Anteils für $BX = 0$ auf, für Spalte 69 treten die Einträge bei $BX = 31$ und allen weiteren BX-Nummern im Abstand von 32 deutlich häufiger auf. Die Ursache dieses Verhaltens kann z. B. in einem Defekt eines Serialisierung-Bausteins auf dem zugehörigen PLB-Kanal oder eines Parallelisierungs-Bausteins auf der PCU liegen. In den beiden Beispielen zeigt sich das auffällige Verhalten nicht für die benachbarten Koinzidenzkanäle, so daß nur der Fluß der MU3-Daten untersucht werden muß. Für einige der insgesamt 12 Koinzidenzkanäle, für die dies beobachtet wird, sind bereits Reparaturen erfolgt, andere müssen noch untersucht werden. Die anderen 120 Koinzidenzkanäle weisen eine flache BX-Verteilung auf.

Für die Spalten 124 bis 126 kann eine untereinander ähnliche BX-Verteilung beobachtet werden. Jeweils 8 BX-Nummern in Folge weisen deutlich mehr Einträge auf als die davorliegenden und nachfolgenden 8 BX-Nummern. Da drei benachbarte Koinzidenzkanäle in gleicher Weise betroffen sind, ist die Ursache in einem Fehlverhalten für die Daten der MU4-Spalte 4:125 zu suchen. Zusätzlich ist für den Koinzidenzkanal zu Spalte 125 der Eintrag für $BX = 0$ erhöht, so daß es auch einen Defekt in der Spalte 3:125 geben muß.

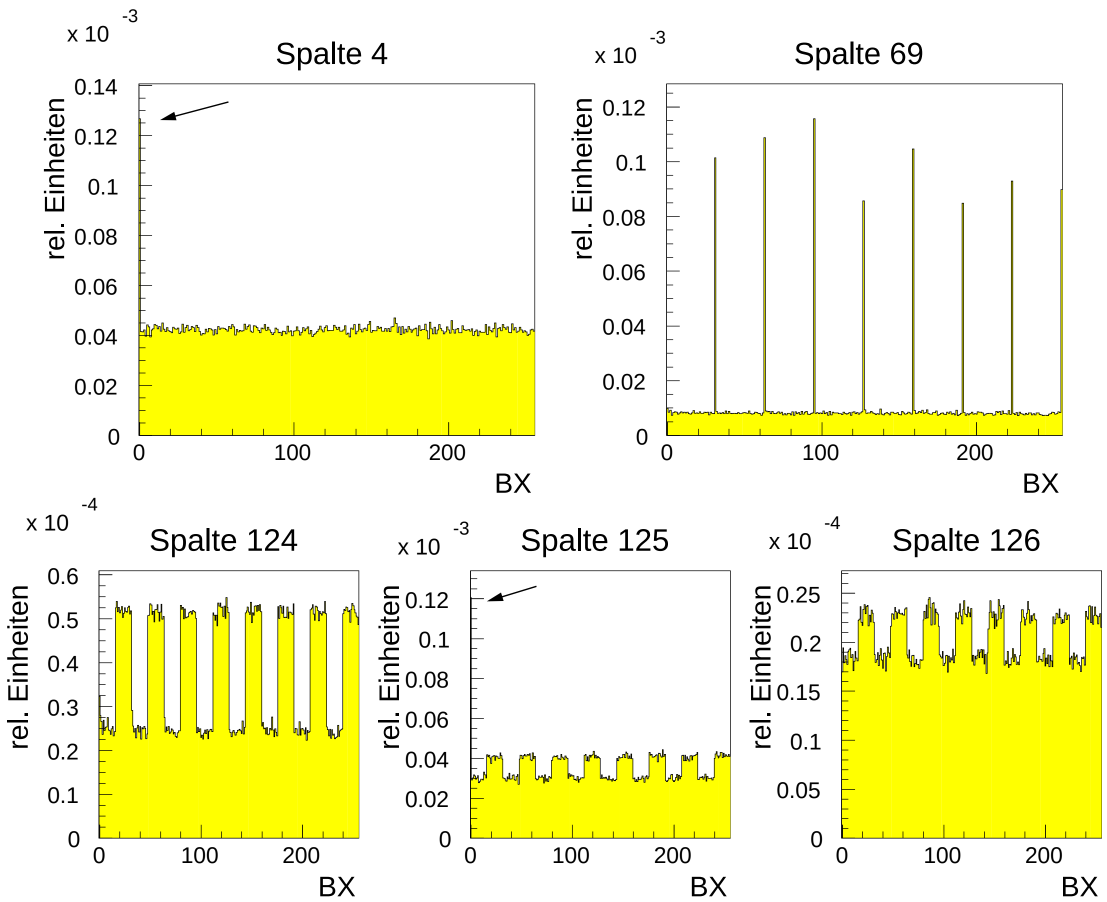

Abb. 5.21: Verteilung der BX-Nummern für die Koinzidenzkanäle zu den Spalten 4, 69 und 124 bis 126 während Run 17235 bei einer Wechselwirkungsrate von 5 MHz. Die Daten stammen aus dem Monitoring der PCU-Test-FIFOs. Überproportional viele Einträge für BX = 0 sind durch Pfeile hervorgehoben.

Die dargestellten Beispiele zeigen, daß aus der Verteilung der BX-Nummern Rückschlüsse auf mögliche Defekte der Hardware gezogen werden können. Da solche Auffälligkeiten, z. B. wegen instabiler Lötstellen, auch erst nach einiger Zeit des Betriebs der Hardware auftreten können, ist eine regelmäßige Kontrolle der Verteilungen sinnvoll. Um nicht während der gesamten Datennahme alle BX-Verteilungen der 132 Koinzidenzkanäle ständig kontrollieren zu müssen, wäre eine automatisierte Kontrolle der Histogramme, die Auffälligkeiten erkennt, hilfreich. Diese müßte jedoch die Verteilung der physikalischen BX-Nummer einbeziehen, um hierdurch hervorgerufene Strukturen nicht als Fehler zu erkennen. Zudem müßte der Algorithmus alle dargestellten Arten von Abweichungen erkennen.

Neben einer Möglichkeit, defekte Hardware-Komponenten zu identifizieren, erlauben die BX-Verteilungen eine Aussage über die Qualität der Daten. Erfahrungswerte im Betrieb des Myon-Pretrigger-Systems zeigen, daß mit der Auffälligkeit oft eine falsche Zuordnung der BX-Nummer zu den Koinzidenzen verbunden ist. Da die Daten deshalb in der ersten Triggerstufe verloren gehen, führt dies zu einer Verringerung der Effizienz des Triggers. Aus der Abweichung von einer flachen Verteilung und dem mit seiner Koinzidenzrate gewichteten Beitrag eines Koinzidenzkanals könnte ein Parameter berechnet werden, der für eine Charakterisierung der Datenqualität herangezogen werden kann. Ob er geeignet ist, ein Fehlverhalten des Myon-Pretrigger-System effizient und sicher anzuzeigen, muß in Zukunft noch untersucht werden.

Impulsverteilung

Bislang wurde in erster Linie das Monitoring beschrieben, das auf Informationen der PCUs basiert. Da die Implementierung der regelmäßigen Auslese der PMG-Test-FIFOs erst zum Ende der Datennahme im Jahr 2000 hin erfolgte, gibt es bislang nur wenig Erfahrung. Außerdem sind die Informationen der FLT-Nachrichten schwieriger zu interpretieren als die Koinzidenzdaten der PCU-Test-FIFOs, zumal die Parameter der Nachrichten teilweise vom Typ der verwendeten Look-up Table abhängen.

Vergleichsweise einfach verständlich ist die in der Nachricht für den FLT enthaltene Abschätzung des Impulses für eine gefundene Koinzidenz. Mit zunehmendem Abstand vom Protonstrahlrohr nimmt der angenommene Impuls ab, da die Myonen mit großem Impuls nur wenig vom Magnetfeld abgelenkt werden und deshalb im inneren Bereich nahe dem Strahlrohr nachgewiesen werden. In Abbildung 5.22 ist für jeden PMG der $+y$-Hälfte des Pad-Systems die Verteilung der Impulsabschätzungen für Run 17235 gezeigt. Die Zuordnung der PMGs zu den Detektorspalten ist in Abbildung 3.14 dargestellt. In Abbildung 5.22 ist die Abfolge der PMGs in positiver x-Richtung eingezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Impulse vom Rand des Detektors, der PMG 10 entspricht, zur Mitte hin zunehmen. Die größten Werte werden für PMG 32 erreicht, die den mittleren Teil um das Protonstrahlrohr abdeckt. Zum Rand des Detektors auf der $+x$-Seite hin werden die Impulse wieder kleiner. Dieser Verlauf entspricht der Erwartung.

Um die Informationen über die Impulse genauer untersuchen zu können, werden sie zunächst aus der Form, in der sie in der FLT-Nachricht enthalten sind, d. h. als sieben Bits umfassende Werte, mit einer universellen Übersetzungsfunktion in Einheiten von GeV/c transformiert [Ger 98]. Außerdem werden die Informationen der 18 PMGs des Pad-Systems zu einer gemeinsamen Impulsverteilung kombiniert. Da die Histogramme aller PMGs jeweils auf die Gesamtzahl ausgelesener FLT-Nachrichten normiert sind, d. h. uanbhängig von der Rate prozessierter Nachrichten auf dem PMG, müssen sie gegeneinander gewichtet werden. Dazu werden die Koinzidenzraten aus den Zählerwerten der jeweils zugehörigen PCUs verwendet. Für jeden PMG werden alle Koinzidenzwerte summiert und ihr Anteil an der gesamten Rate berechnet. Mit diesem Anteil werden die Beiträge der PMGs skaliert und in einem Histogramm zusammengefaßt. Dies ist im oberen Teil von Abbildung 5.23 dargestellt. Zum Vergleich ist im unteren Teil die Impulsverteilung für Daten aus einer Monte Carlo-Simulation inelastischer Ereignisse für eine Wechselwirkungsrate von 5 MHz gezeigt, die mit Hilfe einer Simulation des Myon-Pretriggers erstellt wurde [Ada 01a]. Beide Verteilungen stimmen gut überein, wobei der Mittelwert der Verteilung aus den Monitoring-Daten mit $p_{\mathrm{Monitor}} = 35{,}5\,\mathrm{GeV/c}$ etwas kleiner ist als $p_{\mathrm{Sim}} = 38{,}0\,\mathrm{GeV/c}$. Dies wird vor allem durch die beiden mit Pfeilen gekennzeichneten Beiträge verursacht. Sie kommen zustande, da einzelne heiße Pads

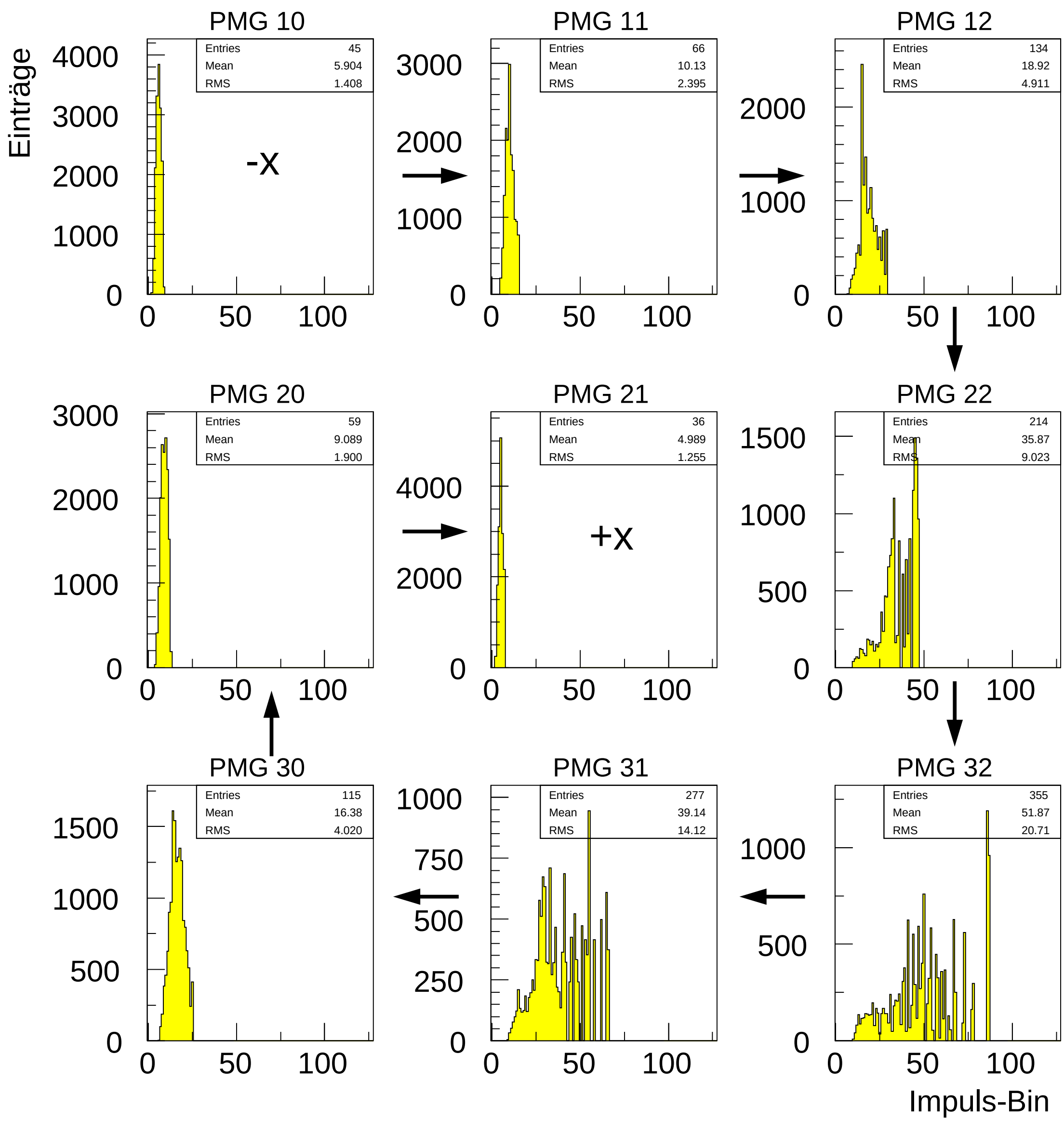

Abb. 5.22: Verteilungen des vom Myon-Pretrigger abgeschätzten Impulses für die PMGs der $+y$-Hälfte für Run 17235. Der Impuls ist als sieben Bits umfassender Wert in der Kodierung für den FLT angegeben. Die Abfolge der PMGs in positiver x-Richtung ist durch Pfeile markiert.

aufgrund eines Fehlers in der Maskierungs-Prozedur nicht ausmaskiert wurden. In der Koinzidenzratenverteilung für Run 17235 im unteren Teil von Abbildung 5.5 sind die hohen Raten für Pad 16 in den Spalten 20 bis 22 (entspricht dem linken Pfeil in Abbildung 5.23) und 95 und 96 (entspricht dem rechten Pfeil) deutlich zu erkennen.

Mit Hilfe der dargestellten Methode ist es möglich, von den anderen Triggerstufen unbeeinflußte Impulsverteilungen der Koinzidenzen des Myon-Pretrigger-Systems bereits während der Datennahme zu erstellen. Diese Prozedur kann auch auf andere Parameter der FLT-Nachrichten erweitert werden. Im zukünftigen Betrieb des Myon-Pretrigger-Sy-

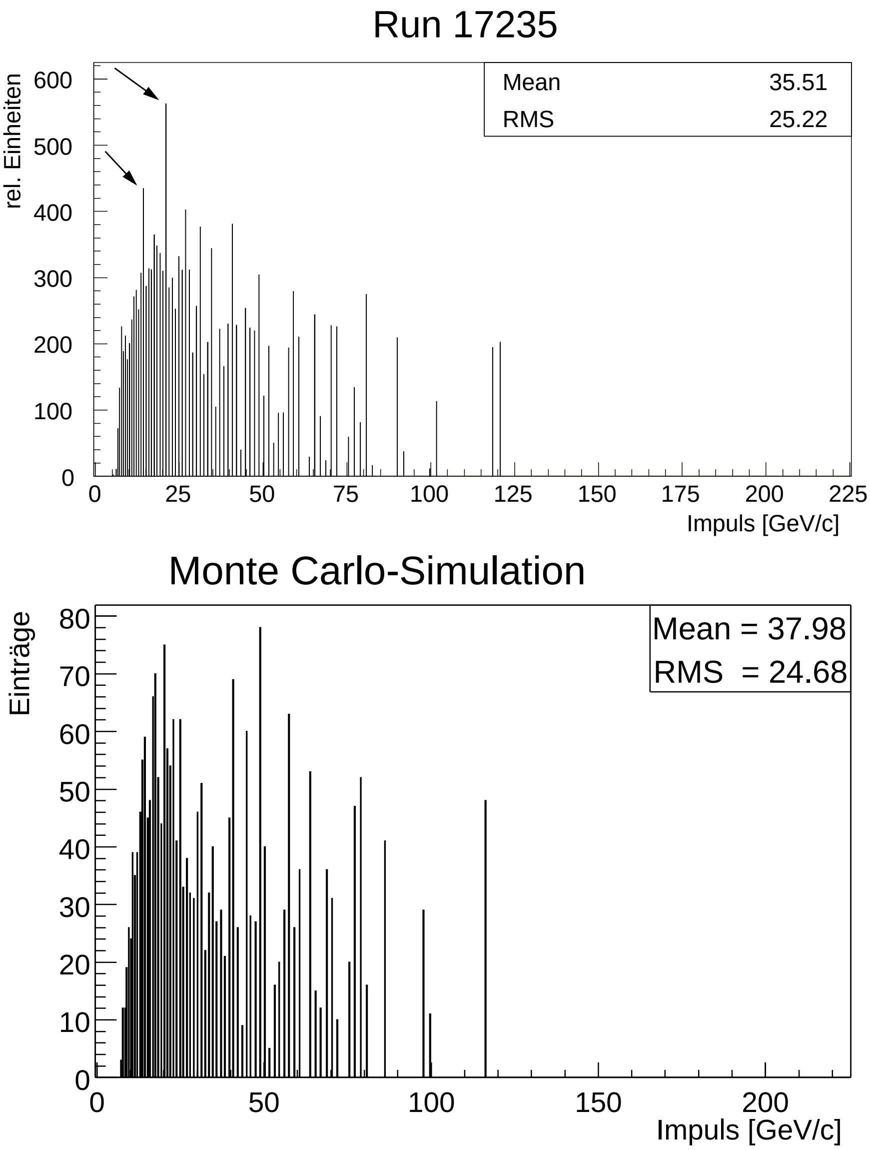

Abb. 5.23: Darstellung der Impulsverteilung aus den kombinierten Daten der PMG-Test-FIFOs für Run 17235 (oben) und aus einer Monte Carlo-Simulation inelastischer Ereignisse für eine Wechselwirkungsrate von 5 MHz, mit Hilfe einer Simulation des Myon-Pretriggers erstellt [Ada 01a]. Die Mittelwerte (Mean) und Streuungen (RMS) der beiden Verteilungen stimmen gut überein. Die beiden Pfeile im oberen Diagramm markieren Einträge, die durch fälschlicherweise nicht ausmaskierte heiße Pads hervorgerufen werden.

stems müssen die so erstellten Verteilungen über einen längeren Zeitraum auf mögliche Zusammenhänge untersucht werden, um eine mögliche Korrelation mit der Qualität der Datennahme mit dem Myon-Pretrigger-System auszuarbeiten. Dies könnte dann in die Erweiterungen des Monitorings einbezogen werden.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden grundlegende Parameter untersucht, die die Funktion des Myon-Pretrigger-Systems charakterisieren. Hierzu wurden ausschließlich Informationen des Monitorings der Online-Software herangezogen. Da dieses erst in der Endphase der Datennahme des Jahres 2000 implementiert wurde und deshalb noch nicht optimiert war, werden hier auch Vorschläge für Erweiterungen und Veränderungen erarbeitet.

Gemäß der Qualität der optischen Datenübertragung zwischen PLBs und PCUs, bestimmt durch die Fehlerrate, wird jede Verbindung in eine bestimmte Kategorie eingeteilt. Aus den Daten der Logdateien werden die Fehlerraten der Verbindungen für den Zeitraum vom 18.8. bis zum 25.8.2000 abgeleitet. Im Mittel wird eine Fehlerrate von $R_{\text{Fehler}} = 2{,}8\,\%$ für das gesamte System berechnet, die durch den deutlich größeren Anteil in MU4 dominiert wird. Die beobachteten Schwankungen der Fehlerraten sowie die Unterschiede zwischen den $+y$- und $-y$-Hälften und zwischen MU3 und MU4 sind auf das Verhalten einzelner Verbindungen zurückzuführen und kein globaler Effekt: Diese Verbindungen machen nur etwa einen Anteil von $6\,\%$ aus. Anhand einiger Beispiele wurde gezeigt, daß der zeitliche Verlauf der Fehlerrate großen Schwankungen mit Übergängen zwischen $0\,\%$ und $100\,\%$ auf kleinen Zeitskalen unterworfen sein kann.

Um solche Verbindungen bereits bei der Einstellung erkennen zu können, wird die Korrelation der Fehlerrate mit den beiden in der Datenbank verfügbaren Informationen über den eingestellten Offset-Wert und der Größe des zusammenhängenden Bereichs, in dem die Verbindung bei der Einstellung keinen Fehler zeigte, bestimmt. Es wird eine schwache Korrelation zu höheren Fehlerraten bei kleinen Werten beider Größen festgestellt.

Fehlerhafte optische Datenübertragungen führen zu einer effektiven Reduzierung der Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems, da Eingangsdaten der PCUs verloren gehen. Für eine Abschätzung dieses Effekts werden die einzelnen Pads in MU3 und MU4 mit Gewichten skaliert, die ihren Beitrag zur Koinzidenzbildung charakterisieren. Die so bestimmten gewichteten Fehlerraten zeigen einen kleineren Gesamtwert von $R_{\text{Fehler}} = 1,6\,\%$ und einen relativ noch geringeren Anteil für MU3 als die ungewichteten. Dies ist erklärbar, da während der Datennahmeperiode im Jahr 2000 Verbesserungen in MU3 und dort besonders im inneren Bereich mit hohen Koinzidenzraten die höchste Priorität eingeräumt wurde. Zukünftige Verbesserungen für MU4 und damit auch eine Reduzierung der Fehlerrate für das System sind realistisch.

Die Maskierung von Datenkanälen aufgrund von Defekten der Myon-Pretrigger-Hardware oder heißen Pads des Myon-Detektors hat eine ähnliche Bedeutung wie die Fehler der optischen Datenübertragung für spätere Analysen der Daten. Sie schränkt ebenfalls effektiv die Akzeptanz des Myon-Pretriggers in den betroffenen Bereichen ein. Für den untersuchten Zeitraum vom 18.8. bis zum 25.8.2000 wird der Anteil maskierter Datenkanäle für das gesamte System zu $\mathcal{R}_{\text{maskiert}} = 4{,}4\,\%$ bestimmt, wobei sowohl für MU3 als auch MU4 – und damit auch für das Sytem – in der $+y$-Hälfte deutlich mehr Datenkanäle ausmaskiert sind. Analog zu den optischen Verbindungen zeigt MU3 einen geringeren Anteil der Maskierung als MU4.

Die untersuchten Werte sind relativ größeren Schwankungen unterworfen als die

Fehlerraten der optischen Datenübertragungen. Für MU3 und MU4 steigt der Anteil maskierter Datenkanäle zu einem bestimmten Zeitpunkt um etwa einen Faktor 3 an. Nähere Untersuchungen ergeben, daß der Anstieg der Maskierung durch ein instabiles Verhalten des Myon-Detektors bzw. der Ausleseelektronik im äußeren Bereich des Systems auf der $+x$-Seite ausgelöst wird. Bei der spaltenweisen Untersuchung des Anteils maskierter Datenkanäle trägt dieser Bereich vor allem für MU3 sehr stark bei, in MU4 dominieren dagegen defekte Hardware-Kanäle des Myon-Pretriggers.

Auch für die Maskierung werden gewichtete Anteile berechnet, um quantitative Aussagen über den Einfluß eines maskierten Kanals auf die Prozessierung von Koinzidenzen machen zu können. Der gesamte Anteil maskierter Datenkanäle bleibt gegenüber dem unskalierten Wert mit $\mathcal{R}_{\mathrm{maskiert}} = 4{,}5\,\%$ fast unverändert. Da für die Datennahme im Jahr 2000 bevorzugt Defekte der Hardware im inneren Bereich von MU3 beseitigt wurden, dominiert der gewichtete Beitrag von MU4 den Gesamtwert noch deutlicher. Durch die bereits erfolgten Reparaturen der Defekte der Hardware, die zu den Maskierungen für MU4 führten, ist in Zukunft mit einer Reduzierung des MU4-Anteils und damit auch des Gesamtwertes zu rechnen.

Aus den gewichteten Ergebnissen für die Fehlerraten der optischen Datenübertragung und die maskierten Anteile kann für den untersuchten Zeitraum eine effektive Akzeptanz des Myon-Pretrigger-Systems von 93,9 % gegenüber einem System mit fehlerfreier Datenübertragung und ohne Maskierungen abgeschätzt werden. Hier werden Bereiche vernachlässigt, in denen sowohl Fehler der Datenübertragung als auch Maskierungen auftreten. Da beide Effekte auf einen kleinen Teil der Hardware-Kanäle beschänkt sind, ist dies zulässig. Die dargestellten Analysen, die ausschließlich auf Monitoring-Informationen und Datenbankeinträgen beruhen, zeigen, daß diese Zahlenwerte zukünftig bereits innerhalb der Online-Software berechnet werden können. Da eine Einschränkung der Akzeptanz einen negativen Einfluß auf die Qualität der prozessierten Daten hat, können sie zur Beurteilung der Datenqualität herangezogen werden.

Auch die Koinzidenzrate des Myon-Pretriggers erlaubt Aussagen über seine Funktion, vor allem innerhalb des Trigger-Systems. Die Bestimmung der Koinzidenzrate und ihr Verlauf in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate wird für die Daten eines Raten-Scans ausschließlich mit Monitoring-Informationen untersucht. Die einzige Möglichkeit zur Bestimmung von Raten auf den Hardware-Modulen des Myon-Pretriggers bieten die Koinzidenz- und Zykluszähler für jeden Koinzidenzkanal der PCUs. Der Koinzidenzzähler unterschätzt jedoch die wirkliche Koinzidenzrate systematisch, da die Zahl der Zyklen gezählt wird, in denen mindestens eine Koinzidenz auftritt. Treten mehrere auf, wird der Koinzidenzzähler dennoch nur um eins erhöht.

Mit Hilfe der Daten der PMG-Test-FIFOs wird diese Ratenunterschätzung durch Überprüfen der Konsistenz mit den Zählerwerten untersucht. Für jeden Koinzidenzkanal wird aus dem PMG-Test-FIFO und aus den Zählern jeweils ein Verhältnis bestimmt. Aus der Korrelation zwischen beiden Verhältnissen und ihrem Quotienten, dem Doppelverhältnis $\mathcal{R}_{\xi/\mathrm{Z\ddot{a}hler}}$, werden Rückschlüsse auf Koinzidenzkanäle gewonnen, die für die Untersuchungen nicht berücksichtigt werden können. Dies sind Bereiche mit einem instabilen Verhalten des Myon-Detektors und fehlerbehaftete optische Verbindungen. Für letztere spiegeln die Zählerwerte eine korrekte Funktion vor, weshalb die Koinzidenzraten statt dessen aus den Daten der PCU-Test-FIFOs bestimmt werden.

Aus der Anpassung einer Konstanten an die Doppelverhältnisse für jeden Run des Raten-Scans wird die Größe der systematischen Ratenunterschätzung bestimmt. Sie beträgt etwa 3 %, wobei die Qualität der Anpassung nicht gut ist. Dies entspricht der Erwartung, da eine Konstante einen auf einigen Koinzidenzkanälen sehr viel stärker auftretenden Effekt als auf anderen nicht perfekt beschreibt. Für die Berücksichtigung der Unterschätzung der gesamten Koinzidenzrate ist er jedoch geeignet. Eine bessere Möglichkeit, diesen Effekt zu untersuchen, kann zukünftig geschaffen werden, wenn das Monitoring zeitlich kohärente Informationen zusätzlich zu Daten in Form von Histogrammen zur Verfügung stellt.

Die Ergebnisse für die Koinzidenzraten aus den Zählerwerten werden in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsrate mit den skalierten Werten aus den Daten der PCU-Test-FIFOs verglichen. Die Skalierung bezieht sowohl die Ratenunterschätzung als auch die Anteile maskierter Datenkanäle ein. Die skalierten Koinzidenzraten sind etwa 4 % bis 8 % größer als die unskalierten. Der mehr als lineare Anstieg der Koinzidenzrate mit der Wechselwirkungsrate und die absoluten Werte stimmen gut mit den Erwartungen überein. Wegen der drei FLT-Nachrichten pro Koinzidenz für das Pad-System wird für eine Wechselwirkungsrate von 5 MHz eine Nachrichtenrate von $R_{\mathrm{Nachr}} \approx 1{,}8\,\mathrm{MHz}$ erwartet.

Aus der spaltenweisen Verteilung der Koinzidenzraten kann auf die mittlere Zeit für das vollständige Füllen des PCU-Test-FIFOs geschlossen werden. Die Ergebnisse zeigen, daß vor allem für kleine Wechselwirkungsraten die Periode für das Auslesen der FIFOs für einige Koinzidenzkanäle zu kurz ist. Hier ist eine Modifizierung des Monitorings notwendig, um die Daten dieser Kanäle nicht zu verlieren.

Für Erweiterungen des Monitorings der Online-Software von einer im wesentlichen darstellenden Funktion zu einer stärker auswertenden hin werden – neben den bereits zuvor dargestellten – zwei weitere Vorschläge erarbeitet. Die Verteilung der BX-Nummer für jeden Koinzidenzkanal bietet eine gute Möglichkeit, auf einfache Weise Defekte der Hardware und deshalb ineffiziente Bereiche des Systems zu identifizieren. Eine automatisierte Erkennung dieser Kanäle könnte als weitere Informationsquelle für die Beurteilung der Datenqualität dienen.

Als Beispiel für die Auswertung von Parametern der FLT-Nachrichten aus den Daten der PMG-Test-FIFOs wird die Impulsverteilung dargestellt. Mit Hilfe der Zählerwerte der PCUs können die Beiträge verschiedener PMGs gegeneinander gewichtet werden. So wird ein Impulsspektrum ohne Beeinflussung durch andere Triggerstufen verfügbar, das eine weitere Möglichkeit für Aussagen über die Datenqualität bietet.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Das Myon-Pretrigger-System des HERA – B Experimentes dient zur Anreicherung von Ereignissen, die Myon-Spuren enthalten. Es ist modular aus etwa 100 speziell entwickelten Elektronik-Modulen aufgebaut. In dieser Arbeit wurde die Entwicklung von Software dargestellt, die den Betrieb und Tests von einzelnen Modulen bis hin zum gesamten System ermöglicht. Mit den Informationen des in der Software implementierten Monitorings wurden Parameter untersucht, die die Funktion des Systems beschreiben. Zudem wurden Vorschläge für Erweiterungen des Monitorings erarbeitet.

Alle Zugriffe auf die Hardware-Module des Myon-Pretriggers werden mit Hilfe von Treiberfunktionen ausgeführt, die bezüglich ihrer Komplexität vom Schreiben oder Lesen einzelner Register bis hin zur Ausführung komplexer Prozeduren reichen, wie z. B. die Einstellung der optischen Verbindungen oder das Auslesen von Test-FIFOs. Sowohl die Software zum Betrieb von Einzelkomponenten als auch die Online-Software für das gesamte System basieren auf diesen Treiberfunktionen. Für automatisierte Tests von Einzelkomponenten und Minimalsystemen in flexibler Konfiguration der Hardware sind Systemtestfunktionen entwickelt worden. Sie basieren auf dem Vergleich der Daten aus Test-FIFOs mit Referenzdateien, die zuvor für ein korrekt funktionierendes System erstellt werden. Um die Funktionalität der Software nutzen zu können, wurde eine Benutzerschnittstelle bereitgestellt, die sowohl Auswahlmenüs als auch Steuerskripte für häufig zu wiederholende Abfolgen von Funktionen umfaßt.

Die entwickelte Online-Software garantiert einen zuverlässigen und effizienten Betrieb des in die Datennahmeumgebung des HERA – B Experimentes integrierten Myon-Pretrigger-Systems. Die Online-Software setzt sich aus sechs verschiedenen Arten von Prozessen mit spezialisierten Aufgaben zusammen.

Alle Zugriffe auf die Hardware-Module eines Crates werden von den Prozessen `mpre_srv` und `mpre_slave` durchgeführt, wobei letzterer länger dauernde und kontinuierliche Funktionen, wie z. B. Monitoring-Aufgaben, übernimmt. Die beiden Prozesse kommunizieren über einen gemeinsamen Speicherbereich, das Shared Memory. Dessen Verfügbarkeit kontrolliert `mpre_srv` ebenso wie die Funktion von `mpre_slave` regelmäßig. Durch Untersuchungen des Zeitverhaltens konnte gezeigt werden, daß die Initialisierung der Prozesse und ihrer Kommunikation mittels des Shared Memory in der Regel ausreichend schnell ausgeführt werden.

Von zentraler Bedeutung für die Online-Software ist der Prozeß `MPRE_BOSS`. Er führt Kontrollaufgaben aus, die eine zuverlässige Funktion des Myon-Pretrigger-Systems gewährleisten. Dazu gehören die Protokollierung von Kommandos, die `mpre_slave`-Prozesse erhalten, und Reaktionen darauf, wenn diese nicht in einer vorgegebenen Zeit ausgeführt werden. Zudem aktualisiert `MPRE_BOSS` interne Informationen über den Systemzustand der Hardware-Komponenten, kontrolliert mit Hilfe von Testnachrichten die Kommunikation mit allen `mpre_srv`- und `mpre_slave`-Prozessen und sorgt für eine möglichst schnelle Wiederaufnahme der Aufgaben von Prozessen der Online-Software, die neu gestartet werden. Die Kommunikation zwischen den Prozessen der Online-Software und mit Prozessen außerhalb des Myon-Pretriggers, wie z. B. denen der Datennahmeumgebung oder der ersten Triggerstufe, wird von `MPRE_BOSS` koordiniert. Für die Aufgaben, die bei Zustandsübergängen der Central Run Control auszuführen sind, und die Aktualisierung der Maskierungen der Pretrigger Coincidence Unit wurden Untersuchungen über die jeweils benötigte Zeit dargestellt. Hier wurden bereits während der Datennahme im Jahr 2000 Verbesserungen erzielt, aber insbesondere beim Laden der Look-up Tables des Pretrigger Message Generators ist zukünftig eine weitere Verkürzung notwendig.

Das Sammeln, Darstellen und Speichern von Monitoring-Informationen wird vom Prozeß `mpre_monitor` durchgeführt. Für die Ausgabe von Fehlermeldungen und weiteren wichtigen Informationen sowie ihr Speichern in einer Logdatei ist `mpre_errlog` zuständig. Außerhalb der Datennahme kann das System mit Hilfe der Benutzerschnittstelle `mpre_con` gesteuert werden. Für die Einstellungen der Online-Software, die Konfiguration der Hardware-Module und das dauerhafte Speichern von für spätere Analysen relevanten Daten wurde eine Struktur von Tabellen einer Datenbank entworfen.

Verbesserungen der für die Datennahme im Jahr 2000 erfolgreichen Implementierung der Online-Software beziehen sich in erster Linie auf die Anwendung von Modifikationen des HERA – B spezifischen Kommunikationsprotokolls, die vollständige Integration des Pixel-Systems, Erweiterungen der Monitoring-Funktionalität durch Hinzunahme von Informationen oder neu entwickelte Algorithmen und die Vervollständigung der Datenbankstruktur.

Aus den Monitoring-Informationen der Online-Software wurden Parameter bestimmt, die die Funktion des Myon-Pretriggers beschreiben, und Vorschläge für Erweiterungen der bisherigen Struktur des Monitorings erarbeitet.

Die Untersuchungen der optischen Datenübertragungen zwischen Pretrigger Link Board und Pretrigger Coincidence Unit zeigen, daß wenige Verbindungen hohe Fehlerraten aufweisen, die z. T. großen Schwankungen unterworfen sind. Eine schwache Korrelation von hohen Fehlerraten mit kleinen eingestellten Offset-Werten bzw. mit kleinen Bereichen von Offset-Werten, in denen die Verbindungen bei ihrer Einstellungen funktionierten, wurde nachgewiesen. Dies kann zukünftig eine frühzeitige Identifizierung problematischer Verbindungen ermöglichen. Wenn jede Verbindung mit ihrem Beitrag zur gesamten Koinzidenzrate gewichtet wird, beträgt die mittlere Fehlerrate – und die daraus folgende effektive Verringerung der Akzeptanz des Myon-Pretriggers – für das gesamte System 1,6 %. Realistische Verbesserungen vor allem der Verbindungen für MU4 führen zu der Annahme, daß diese Fehlerrate zukünftig reduziert werden kann.

Maskierungen von Datenkanälen wurden während der Datennahme im Jahr 2000 entweder aufgrund von als heiß klassifizierten Pads oder von Defekten der Myon-Pretrigger-Hardware durchgeführt. In dem untersuchten Zeitraum stieg der Anteil maskierter Datenkanäle zu einem bestimmten Zeitpunkt um etwa das Dreifache an. Dies konnte auf Instabilitäten des Myon-Detektors bzw. der Ausleseelektronik zurückgeführt werden, die vor allem im Randbereich der MU3-Superlage zu einer großen Zahl heißer Pads führten. Um die Maskierungen nach ihrem Beitrag zur Koinzidenzrate bewerten zu können, werden die maskierten Bereiche – wie auch für die optischen Verbindungen – gewichtet. Der so skalierte Gesamtanteil maskierter Datenkanäle von 4,5 % wird sehr stark von defekten Hardware-Kanälen des Myon-Pretriggers für MU4 bestimmt, die in der Zwischenzeit repariert wurden. Zusammen mit den Verbesserungen bei der optischen Datenübertragung ist zu erwarten, daß die aus beiden Anteilen zusammengefaßte effektive Akzeptanz des Myon-Pretriggers von 93,9 % in Zukunft weiter erhöht werden kann.

Aus Zählerwerten für jeden Kanal der Pretrigger Coincidence Units kann eine Abschätzung der Koinzidenzrate des Myon-Pretrigger-Systems abgeleitet werden. Da diese Zähler höchstens eine Koinzidenz pro Zyklus berücksichtigen, wird die wirkliche Rate systematisch unterschätzt. Durch Untersuchungen der Konsistenz mit Ratenverhältnissen, die auf der Basis von Daten des Pretrigger Message Generators bestimmt werden und nicht von der Ratenunterschätzung betroffen sind, konnte eine auf das gesamte System umgelegte Unterschätzung der wirklichen Koinzidenzrate von etwa 3 % bestimmt werden. Die Analysen ergaben zudem Hinweise auf notwendige Verbesserungen des Monitorings der Zählerwerte und zeigten die Bedeutung zeitlich kohärenter Daten für eine zukünftige direktere Bestimmung der Ratenunterschätzung auf.

Die Koinzidenzraten wurden, in Abhängigkeit der Wechselwirkungsrate, sowohl direkt aus den Zählerwerten bestimmt als auch unter Einbeziehung der systematischen Unterschätzung der Raten und der Maskierung von Datenkanälen im untersuchten Zeitraum. Die aus den Zählerwerten bestimmten Koinzidenzraten liegen bis zu 8 % unter den skalierten. Beide zeigen einen mehr als linearen Anstieg mit der Wechselwirkungsrate und Absolutwerte, die mit den Erwartungen gut übereinstimmen, wenn die Effizienz des Myon-Detektors berücksichtigt wird. Die spaltenweise Verteilung der Koinzidenzraten und der daraus ableitbaren Füllzeit der Test-FIFOs der Pretrigger Coincidence Unit zeigt, daß in diesem Bereich Modifikationen des Monitorings notwendig sind, um einen Verlust von Daten zu vermeiden.

Es wurden weitere Vorschläge erarbeitet, um von einem überwiegend die Funktion beschreibenden Monitoring zu einem zusätzlich die Datenqualität analysierenden zu gelangen. Sie basieren auf den Verteilungen der Bunch Crossing-Nummer bzw. Parametern der Nachrichten für die erste Triggerstufe, dargestellt am Beispiel der Impulsabschätzung für Koinzidenzen.

Mit den in dieser Arbeit dargestellten Entwicklungen gelang es, das Myon-Pretrigger-System in das HERA – B Experiment zu integrieren, in Betrieb zu nehmen und während der Datennahmeperiode im Jahr 2000 eine zuverlässige Funktion zu erreichen. Mit der Implementierung der vorgeschlagenen Verbesserungen, insbesondere für das Monitoring, wird es möglich sein, die bereits hohe Qualität der prozessierten Daten weiter zu steigern.

Anhang A

VME-Schnittstellen von PCU und PMG

Die VME[1]-Zugriffe für die beiden Systemkomponenten Pretrigger Coincidence Unit (PCU) und Pretrigger Message Generator (PMG) werden im folgenden detailliert dargestellt. Beschreibungen für die Testmodule Pretrigger FED Simulation Board (PFEDS) und Pretrigger Message Multiplexer (PMM) finden sich an anderer Stelle [Kol 99, Rie 99].

Alle VME-Zugriffe für die PCU und den PMG verwenden 16-Bit-Adressen und 16 Datenbits (A16 D16-Zugriffe). Die Aufteilung des VME-Adreßraumes in einem Crate ist in Abbildung A.1 dargestellt. Jeweils einem PMG und einem Koinzidenzkanal, entweder von einer PCU-Hauptkarte oder einer PCU-Mezzaninkarte, wird ein Adreßraum von 1024 (hexadezimal 0x400) Adressen zugeordnet. Die freien Bereiche stehen für Testmodule, z. B. Pretrigger FED Simulator (PFEDS), PLB Test Board (PLB-T) oder Pretrigger Message Multiplexer (PMM), zur Verfügung. Zu der Grundadresse, d. h. der niedrigsten Adresse des Adreßraumes, wird eine VME-Adresse addiert, die die jeweilige Funktion auf der Komponente auswählt.

VME-Schnittstelle der PCU

In Tabelle A.1 sind alle verfügbaren VME-Zugriffe für einen Koinzidenzkanal der Pretrigger Coincidence Unit (PCU) aufgeführt [Kol 00].

Tab. A.1: VME-Adreßbelegung eines PCU-Koinzidenzkanals [Kol 00]. Die Zugriffe werden nach Schreib- („w“ für engl. write) und Lesezugriffen („r“ für engl. read) unterschieden.

Zugriff		Adresse (hex.)	Art des Zugriffs
Masken-Register MU3,	CN = 0	0x000	r/w
Masken-Register MU4L,	CN = 0	0x002	r/w
Masken-Register MU4M,	CN = 0	0x004	r/w

Fortsetzung auf der nächsten Seite

[1]VERSA Module Eurocard

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

Zugriff	Adresse (hex.)	Art des Zugriffs
Masken-Register MU4R, CN = 0	0x006	r/w
Masken-Register MU3, CN = 1	0x008	r/w
Masken-Register MU4L, CN = 1	0x00a	r/w
Masken-Register MU4M, CN = 1	0x00c	r/w
Masken-Register MU4R, CN = 1	0x00e	r/w
Board-Kommando-Register	0x010	r/w
FLEX-Kommando-Register	0x012	r/w
Modus-Register	0x014	r/w
DAC-Register 1/5 (im Koinzidenz-CPLD)	0x016	r/w
DAC-Register 2/6 (im Koinzidenz-CPLD)	0x018	r/w
DAC-Register 3/7 (im Koinzidenz-CPLD)	0x01a	r/w
DAC-Register 4/8 (im Koinzidenz-CPLD)	0x01c	r/w
Zyklus-Zähler, unteres Wort	0x01e	r/-
Zyklus-Zähler, oberes Wort	0x020	r/-
Koinzidenz-Zähler, unteres Wort	0x022	r/-
Koinzidenz-Zähler, oberes Wort	0x024	r/-
Flag-Register	0x026	r/-
Kopie des Eingangs-Registers für BX	0x028	r/-
Kopie des Eingangs-Registers für MU3	0x02a	r/-
Kopie des Eingangs-Registers für MU4L	0x02c	r/-
Kopie des Eingangs-Registers für MU4M	0x02e	r/-
Kopie des Eingangs-Registers für MU4R	0x030	r/-
Alle Masken-Register für CN = 0	0x03a	-/w
Alle Masken-Register für CN = 1	0x03c	-/w
Alle Masken-Register	0x03e	-/w
DAC 1/5	0x080	-/w
DAC 2/6	0x080	-/w
DAC 3/7	0x080	-/w
DAC 4/8	0x080	-/w
Test-FIFO	0x100	r/-

Die wichtigsten Funktionen der Kommando- und Status-Register sind in Abschnitt 3.1.2 beschrieben worden. Alle Masken-Register können einzeln beschrieben und zurückgelesen werden. Daneben können auch alle Masken eines Zyklus oder beider Zyklen mit einem einzigen Zugriff gesetzt werden, wenn dieselben Daten in die Register geschrieben werden sollen.

Die DAC-Register dienen dazu, den gleichen Wert speichern zu können, der auf den entsprechenden DAC geschrieben wird. Die Numerierung der vier Kanäle der DACs entspricht den Nummern der optischen Verbindungen, wie sie in Abbildung 3.4 eingezeichnet sind: Die MU4-Verbindungen werden mit 1 bis 4, die MU3-Verbindungen mit 5 bis 8 bezeichnet. Der erste DAC-Kanal in Tabelle A.1 bezieht sich auf Koinzidenzkanal 1, der zweite auf Koinzidenzkanal 4. Für Mezzanin-Karten haben diese VME-Zugriffe keine Auswirkungen, da es dort keine DACs gibt.

Die beiden Zähler müssen in jeweils zwei Teilen ausgelesen werden, da sie 32 Bits umfassen, aber nur 16 Bits pro VME-Zugriff transferiert werden können. Die Kopien der Eingangs-Register dienen zur Auslese der DPRAMs mittels der CPLD-Eingangs-Register.

VME-Schnittstelle des PMGs

In Tabelle A.2 sind die VME-Zugriffe für den Pretrigger Message Generator (PMG) aufgelistet [Rie 00]. Der Zugriff zum Zurücksetzen des PMGs bewirkt, daß alle CPLDs zurückgesetzt werden und alle Einträge des Kommando-Registers gelöscht werden. Die wichtigsten Einstellungen von Kommando- und Status-Register sind in Abschnitt 3.1.3 beschrieben worden. Beim Auftreten von Fehlern im Protokoll der Schnittstelle zwischen PCU und PMG können alle Anzeigen dieser Fehler durch den Befehl zum Löschen des Interrupt-Flags gelöscht werden. Mit geeigneten Einstellungen der DAV- (Data Available) und Daten-Register können im Schnittstellen-CPLD Testmuster erzeugt werden. Die Werte im DAV-Register entsprechen dabei den PCU-Koinzidenzkanälen, deren Serialisierungs-FIFOs die Koinzidenzdaten enthalten, das Daten-Register enthält die Koinzidenzdaten selbst.

Mit Hilfe des 18 Bits umfassenden LUT-Adreßzählers kann jede beliebige Adresse der Look-up Table (LUT) beschrieben oder zurückgelesen werden. Wenn zum Laden der Daten für die LUT die vier jeweils 16 Bits enthaltenden Worte einer Adresse nacheinander geschrieben oder gelesen werden, wird der LUT-Adreßzähler nach dem vierten Zugriff automatisch um 1 erhöht. Somit muß nur vor dem ersten Zugriff ein Zurücksetzen des Adreßzählers erfolgen, danach wird die korrekte Adresse intern auf dem PMG eingestellt. Die Daten des PMG-Test-FIFOs müssen mit zwei Zugriffen gelesen werden, da sie 20 Bits enthalten und mit einem VME-Zugriff nur 16 Bits übertragen werden können.

Tab. A.2: VME-Adreßbelegung des PMGs [Rie 00]. Die Zugriffe werden nach Schreib- („w“ für engl. write) und Lesezugriffen („r“ für engl. read) unterschieden.

Zugriff	Adresse (hex.)	Art des Zugriffs
Zurücksetzen des PMG	0x00	-/w
Status-Register	0x00	r/-
Kommando-Register	0x02	r/w
Löschen des Interrupt-Flags	0x04	-/w
DAV-Register	0x06	r/w
Daten-Register	0x10	r/w
LUT-Adreßzähler, unteres Wort	0x14	r/w
LUT-Adreßzähler, oberes Wort	0x16	r/w
Zurücksetzen des LUT-Adreßzählers	0x18	-/w
LUT-Daten[15:0]	0x20	r/w

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

Zugriff	Adresse (hex.)	Art des Zugriffs
LUT-Daten[31:16]	0x22	r/w
LUT-Daten[47:32]	0x24	r/w
LUT-Daten[47:32] und Erhöhen des LUT-Adreßzählers um 1	0x26	r/w
Zurücksetzen des Test-FIFOs	0x30	-/w
Lesen der Test-FIFO-Daten[15:0]	0x30	r/-
Lesen der Test-FIFO-Daten[19:16]	0x32	r/-

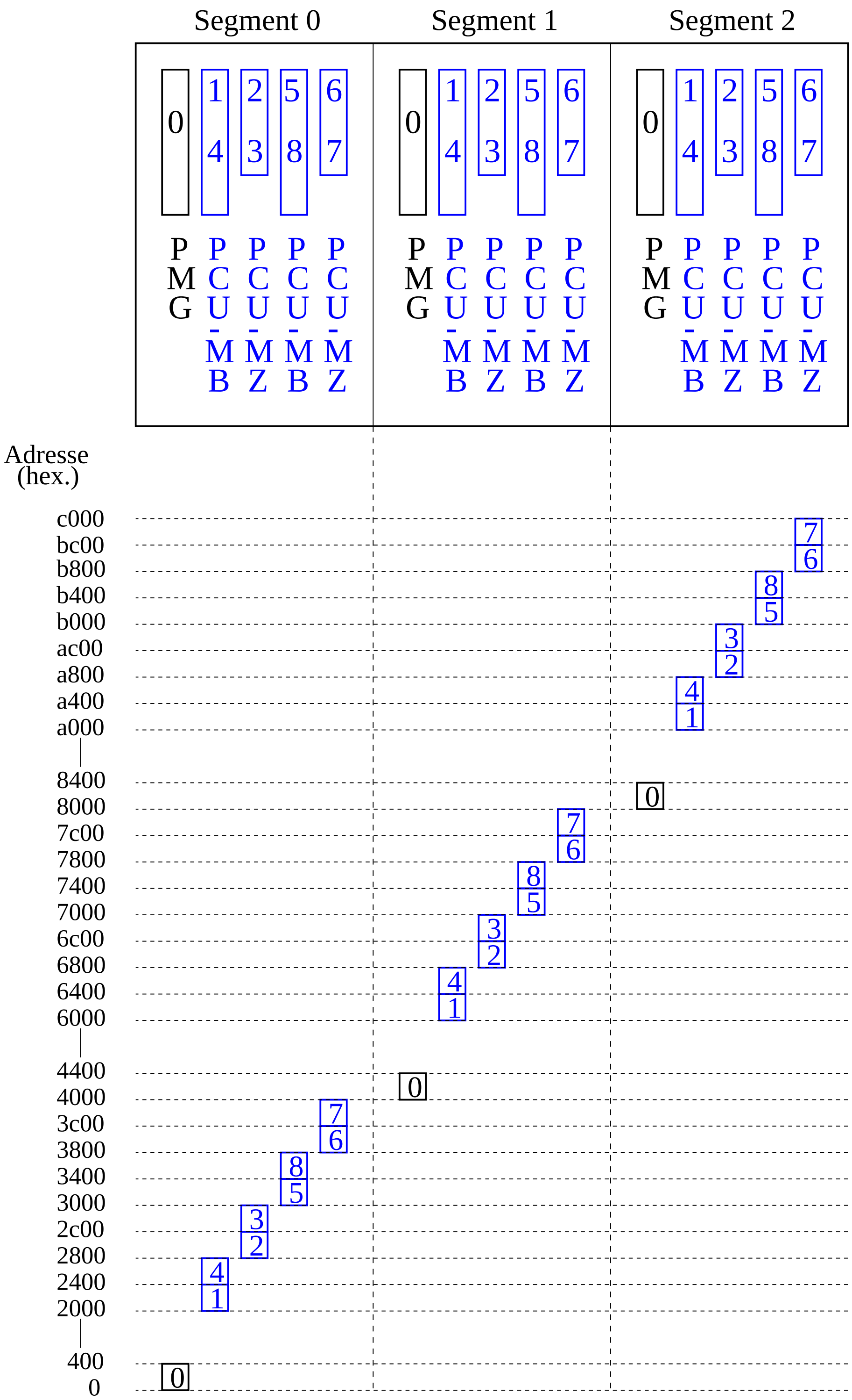

Abb. A.1: Aufteilung des VME-Adreßraumes innerhalb eines Crates (nach [Kol 00]). Die Koinzidenzkanäle von PCU-Hauptkarten (PCU-MB) und PCU-Mezzaninkarten (PCU-MZ) besitzen jeweils einen eigenen Adreßraum.

Anhang B

Übersicht der Treiberfunktionen für die Myon-Pretrigger-Hardware

In den Tabellen B.1 bis B.4 werden die Treiberfunktionen für die Zugriffe auf die Hardware-Module des Myon-Pretriggers, Pretrigger FED Simulator (PFEDS), Pretrigger Coincidence Unit (PCU), Pretrigger Message Generator (PMG) und Pretrigger Message Multiplexer (PMM) aufgeführt. Zudem wird eine kurze Beschreibung der Funktion gegeben; eine ausführliche Beschreibung findet sich in [Sch 99c].

Tab. B.1: Treiberfunktionen für PFEDS-Module und eine Beschreibung ihrer Funktion.

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
`pfeds_ResetPFEDS`	Zurücksetzen des PFEDS und des angeschlossenen PLBs
`pfeds_ResetPLB`	Zurücksetzen des angeschlossenen PLBs ohne Zurücksetzen des PFEDS
`pfeds_ResetRAMs`	Zurücksetzen der Datenspeicher für die Simulation von FED-Daten
`pfeds_LoadPatFile`	Laden der zu simulierenden FED-Daten aus einer Datei in die Datenspeicher
`pfeds_StartSimOne`	Starten der Simulation mit einem PFEDS
`pfeds_StartSimMulti`	Starten der Simulation mit mehreren PFEDS
`pfeds_StopSim`	Stoppen der Simulation
`pfeds_ReadChannel`	Auslesen der Datenspeicher, die die zu simulierenden FED-Daten enthalten
`pfeds_WriteComReg1`	Beschreiben des Kommando-Registers 1
`pfeds_ReadComReg1`	Auslesen des Kommando-Registers 1
`pfeds_WriteComReg2`	Beschreiben des Kommando-Registers 2
`pfeds_ReadComReg2`	Auslesen des Kommando-Registers 2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
`pfeds_RW`	Allgemeiner Schreib- oder Lesezugriff

Tab. B.2: Treiberfunktionen für PCU-Module und eine Beschreibung ihrer Funktion.

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
`pcu_WriteBoardComReg`	Beschreiben des Board-Kommando-Registers
`pcu_ReadBoardComReg`	Auslesen des Board-Kommando-Registers
`pcu_EnableFLEXPipe`	Starten/Stoppen der Prozessierung des Koinzidenz-CPLDs
`pcu_ClearFLEXPipe`	Löschen der Daten im Koinzidenz-CPLD
`pcu_ClearDelayPipe`	Löschen der Daten in der Verzögerungsstufe
`pcu_ResetHandshakeFSM`	Zurücksetzen des Zustandsautomaten für die Schnittstelle zum PMG
`pcu_ResetSerialFSM`	Zurücksetzen des Zustandsautomaten für die Serialisierung der Koinzidenz-Daten von den Auffang-FIFOs in den Serialisierungs-FIFO
`pcu_ResetTestFifo`	Zurücksetzen des Test-FIFOs
`pcu_ResetSerialFifo`	Zurücksetzen des Serialisierungs-FIFOs
`pcu_ResetZeroSupprFifo`	Zurücksetzen der Auffang-FIFOs
`pcu_SetFifoLoad`	Möglichkeit zum Ändern der programmierbaren Füllstandsanzeigen des Serialisierungs-FIFOs
`pcu_ResetLink`	Zurücksetzen der optischen Verbindungen
`pcu_WriteFLEXComReg`	Beschreiben des FLEX-Kommando-Registers
`pcu_ReadFLEXComReg`	Auslesen des FLEX-Kommando-Registers
`pcu_WriteReduceMode`	Einstellung des Modus für die Vorskalierung (Reduzier-Modus)
`pcu_InhibitMode`	Ein-/Ausschalten der Verarbeitung der Inhibit-BX-Signale
`pcu_EnableCounters`	Gleichzeitiges Starten oder Stoppen von Koinzidenz- und Zykluszähler
`pcu_ClearCounters`	Zurücksetzen von Koinzidenz- und Zykluszähler
`pcu_WriteCopyInput`	Setzen der Vergleichsadresse für die Auslese der Dual Ported RAMs
`pcu_WriteModeReg`	Beschreiben des Modus-Registers
`pcu_ReadModeReg`	Auslesen des Modus-Registers
`pcu_WriteComparisonBX`	Setzen der BX-Nummer, deren Daten im Reduzier-Modus 7 ausschließlich prozessiert werden sollen

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
`pcu_ReadComparisonBX`	Auslesen der BX-Nummer, deren Daten im Reduzier-Modus 7 ausschließlich prozessiert werden sollen
`pcu_WriteFifoOffset`	Setzen des Wertes, auf den die programmierbaren Füllstandsanzeigen des Serialisierungs-FIFOs gesetzt werden sollen
`pcu_ReadFifoOffset`	Auslesen des Wertes, auf den die programmierbaren Füllstandsanzeigen des Serialisierungs-FIFOs gesetzt werden sollen
`pcu_ReadFlagReg`	Auslesen des Flag-Registers
`pcu_ReadLinkOK`	Auslesen der LinkOK-Signale
`pcu_ReadCounters`	Auslesen von Koinzidenz- und Zykluszähler
`pcu_ReadDACReg`	Auslesen der DAC-Register
`pcu_WriteDAC`	Beschreiben der DACs und der DAC-Register
`pcu_WriteMaskReg`	Beschreiben der Masken-Register
`pcu_ReadMaskReg`	Auslesen der Masken-Register
`pcu_ReadTestFifo`	Auslesen des Test-FIFOs
`pcu_OffsetRange`	Bestimmen der Offset-Werte für die optischen Verbindungen
`pcu_InitLink`	Initialisieren der optischen Verbindungen
`pcu_ReadDPR`	Auslesen der Dual Ported RAMs
`pcu_RW`	Allgemeiner Schreib- oder Lesezugriff

Tab. B.3: Treiberfunktionen für PMG-Module und eine Beschreibung ihrer Funktion.

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
`pmg_Reset`	Zurücksetzen des PMGs
`pmg_ReadStatusReg`	Auslesen des Status-Registers
`pmg_WriteComReg`	Beschreiben des Kommando-Registers
`pmg_ReadComReg`	Auslesen des Kommando-Registers
`pmg_Run`	Starten/Stoppen der Datenprozessierung des PMGs
`pmg_InternalTest`	Unabhängiger Test des PMGs
`pmg_ClearInterruptFlag`	Löschen der Anforderung eines Interrupts
`pmg_WriteDAVTestReg`	Beschreiben des DAV-Test-Registers, das bei der Erzeugung von Testmustern die PCU-Koinzidenzkanäle mit gültigen Daten angibt
`pmg_ReadDAVTestReg`	Auslesen des DAV-Test-Registers, das bei der Erzeugung von Testmustern die PCU-Koinzidenzkanäle mit gültigen Daten angibt

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
pmg_WriteDataTestReg	Beschreiben des Daten-Test-Registers, das bei der Erzeugung von Testmustern Koinzidenzdaten enthält
pmg_ReadDataTestReg	Auslesen des Daten-Test-Registers, das bei der Erzeugung von Testmustern Koinzidenzdaten enthält
pmg_LoadLUT	Laden der Look-up Table
pmg_ReadLUT	Auslesen der Look-up Table
pmg_ReadTestFifo	Auslesen des Test-FIFOs
pmg_ResetTestFifo	Zurücksetzen des Test-FIFOs
pmg_RW	Allgemeiner Schreib- oder Lesezugriff

Tab. B.4: Treiberfunktionen für PMM-Module und eine Beschreibung ihrer Funktion.

Treiberfunktion	Kurzbeschreibung
pmm_Reset	Zurücksetzen des PMMs
pmm_ReadStatusReg	Auslesen des Status-Registers
pmm_WriteComReg	Beschreiben des Kommando-Registers
pmm_ReadComReg	Auslesen des Kommando-Registers
pmm_Run	Starten/Stoppen der Datenprozessierung des PMMs
pmm_EnableChannels	Auswahl der Eingangsschnittstellen, die mit PMGs verbunden sind
pmm_ReadTestFifo	Auslesen des Test-FIFOs
pmm_ResetTestFifo	Zurücksetzen des Test-FIFOs
pmm_RW	Allgemeiner Schreib- oder Lesezugriff

Abkürzungsverzeichnis

Für das HERA – B Experiment spezifische Abkürzungen sind hervorgehoben.

4LT	**4th Level Trigger**
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BOOTP	Bootstrap Protocol
BX	**Bunch Crossing**
CKM(-Matrix)	Cabibbo-Kobayashi-Maskawa(-Matrix)
CPLD	Complex Programmable Logic Device
CPU	Central Processing Unit
CRC	**Central Run Control**
DAC	Digital to Analog Converter
DAQ	**Data Acquisition**
DAV	**Data Available**
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
DPRAM	Dual Ported Random Access Memory
ECAL	**Electromagnetic Calorimeter**
EVC	**Event Control**
FCS	**Fast Control System**
FED	**Front End Driver**
FIFO	First in First out
FLT	**First Level Trigger**
HERA	Hadron-Elektron-Ring-Anlage
LUT	Look-up Table
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
LVDS-MUX	**LVDS-Multiplexer**
MSGC	Microstrip Gaseous Chamber
NFS	Network File System
PC	Personal Computer
PCU	**Pretrigger Coincidence Unit**
PECL	Positive Emitter Coupled Logic
PFEDS	**Pretrigger FED Simulation Board**

PLB	**Pretrigger Link Board**
PLB-T	**PLB Test Board**
PMB	**Pixel Mapping Board**
PMG	**Pretrigger Message Generator**
PMM	**Pretrigger Message Multiplexer**
POL	**Pretrigger Optical Link**
RAM	Random Access Memory
RICH	**Ring Imaging Čerenkov Hodoscope**
`rhp`	**Remote Histogramming Package**
RoI	**Region of Interest**
`rpm`	**Really Powerful Messaging**
SHM, `shm`	Shared Memory
SLB	**Second Level Buffer**
SLT	**Second Level Trigger**
`smc`	**State Machine Control**
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDU	**Trigger Decision Unit**
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
TFU	**Track Finding Unit**
TLB	**Trigger Link Board**
TLT	**Third Level Trigger**
TPU	**Track Parameter Unit**
TRD	**Transition Radiation Detector**
TTL	Transistor-Transistor Logic
VME	VERSA Module Eurocard
VCSEL	Vertical Cavity Surface-Emitting Laser

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Abt 93] I. Abt et al.
The H1 Detector at HERA
DESY–93–103, Juli 1993

[Ada 99] M. Adams
Persönliche Mitteilung, Oktober 1999

[Ada 01a] M. Adams
Persönliche Mitteilung, Mai 2001

[Ada 01b] M. Adams
Dissertation, Universität Dortmund, in Vorbereitung, 2001

[Alb 87] H. Albrecht et al.
Observation of B^0-$\overline{\mathrm{B}^0}$ *Mixing*
Phys. Lett. **B192** (1987) 245

[Ale 99a] R. Aleksan in: T. Ferbel (Hrsg.)
Techniques and Concepts of High Energy Physics X
NATO Science Series C **534** (1999) 487

[Ale 99b] T. Alexopoulos et al.
Measurement of the $b\bar{b}$ *Cross Section in 800 GeV/c Proton-Silicon Interactions*
Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 41

[ALT 00] ALTERA® Corporation
FLEX 10K Embedded Programmable Logic Family
Datenblatt, Version 4.02, Mai 2000

[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: Padua 2000, Computing in High Energy and Nuclear Physics, 469

[BAB 98] The BaBar Collaboration (P.F. Harrison (Hrsg.) et al.)
The BaBar Physics Book – Physics at an Asymmetric B Factory
SLAC-R-504, Oktober 1998

[Bau 00] C. Bauer et al.
The HERA – B Vertex Detector System
Nucl. Instr. Methods **A453** (2000) 103

[Bec 99] Die Programmierung der Online-Software erfolgte in einer Zusammenarbeit von P. Bechtle, M. Böcker und dem Autor.
1999/2000

[Bec 01] P. Bechtle
Inbetriebnahme des HERA – B Myon-Pretrigger-Systems
Diplomarbeit, Universität Dortmund, März 2001

[Big 89] I.I. Bigi et al. in: C. Jarlskog (Hrsg.)
CP Violation: Advanced Series on Directions in High Energy Physics
Band 3, 1. Auflage, World Scientific Publ., Singapore 1989, 175

[Bla 96] R. Blair et al.
The CDF II Detector – Technical Design Report
FERMILAB-Pub-96-390-E, Oktober 1996

[Bou 95] D. Boutigny et al.
BaBar – *Technical Design Report*
SLAC-R-457, März 1995

[Bru 98] M. Bruinsma, J. Hogenbirk, O. Steinkamp
Documentation on the First Level Trigger Linkboard
Internes HERA – B Dokument 98-066, 1.4.1998

[Buc 99] M. Buchler et al.
Design and Operation of Front-End Electronics for the HERA – B Muon Detector
IEEE Trans. Nucl. Sci **46** (1999) 126

[Buc 01] M. Buchler
Persönliche Mitteilung, März 2001

[Bur 94] A. J.Buras, M.E. Lautenbacher, G. Ostermaier
Waiting for the Top Quark Mass, $K^+ \to \pi^+\nu\overline{\nu}, B_S^0\text{-}\overline{B_S^0}$ *Mixing and CP Asymmetries in B-Decays*
Phys. Rev. **D50** (1994) 3433

[Cab 63] N. Cabibbo
Unitary Symmetry and Leptonic Decays
Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531

[Cap 00] M. Capeans (for the HERA – B Outer Tracker Group)
Status of the Outer Tracker for the HERA – B Experiment
Nucl. Instr. Methods **A446** (2000) 317

[CET 00] CETIA®
CETIA PowerEngine – 4th Generation VMPC4b
Produktbeschreibung, Version 3e, Januar 2000

[Che 95] M.T. Cheng et al.
BELLE – Technical Design Report

KEK-Report 95-1, April 1995

[Chr 64] J. H. Christenson et al.
Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson
Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 138

[Col 77] J. C. Collins, D. E. Soper
Angular Distribution of Dileptons in High-Energy Hadron Collisions
Phys. Rev. **D16** (1977) 2219

[Con 89] J. S. Conway et al.
Experimental Study of Muon Pairs Produced by 252-GeV Pions on Tungsten
Phys. Rev. **D39** (1989) 92

[Cru 98] C. Cruse
Entwicklung und Untersuchung von Komponenten zur Datenübertragung für den Myon-Pretrigger des HERA – B Experimentes
Diplomarbeit, Universität Dortmund, März 1998

[D0 96] The D0 Collaboration
The D0 Upgrade – The Detector and Its Physics
FERMILAB-Pub-96-357-E, 30.7.1996

[DES 00] Abteilung Presse und Öffentlichkeitsarbeit, DESY, Hamburg (2000)

[Dre 70] S. D. Drell, T.-M. Yan
Massive Lepton Pair Production in Hadron-Hadron Collisions at High Energies
Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 316

[Ehr 00] K. Ehret
Commissioning of the HERA – B Internal Target: Using the HERA Proton Ring as a B-Factory
Nucl. Instr. Methods **A446** (2000) 190

[Fal 86] S. Falciano et al.
Angular Distributions of Muon Pairs Produced by 194-GeV/c Negative Pions
Z. Phys. **C31** (1986) 513

[Fla 00] J. Flammer
Track Parameter Unit Documentation
Internes Dokument, HERA – B FLT-Gruppe, 26.9.2000

[Fom 97] B. Fominykh, S.Nowak
HERA – B Muon Detector in HBGEAN Versions 04-04 and 05-01
Internes HERA – B Dokument 97-075, 3.4.1997

[Fom 00] B. Fominykh
HERA – B OTR-Muon Alignment and Efficiency of Muon Chambers
Internes HERA – B Dokument 00-108, 22.6.2000

[Fri 57] J. I. Friedman, V. L. Telegdi
Nuclear Emulsion Evidence for Parity Nonconservation in the Decay Chain $\pi^+ - \mu^+ - e^+$
Phys. Rev. **105** (1957) 1681

[Fri 74] J. Friedman
Data Analysis Techniques for High Energy Particle Physics
in: Proceedings of the 1974 CERN School of Computing, November 1974

[Fri 97] S. Frixione et al. in: A. J. Buras, M. Lindner (Hrsg.)
Heavy Flavours II
1. Auflage, World Scientific Publ., Singapore 1998, 609

[Ful 98] T. Fuljahn et al.
Concept of the First Level Trigger for HERA – B
Trans. Nucl. Sci. **45** (1998) 1782

[Ful 99a] T. Fuljahn
Aufbau und Charakterisierung des schnellen Kontrollsystems für das Experiment HERA – B
Dissertation, Universität Hamburg, Mai 1999

[Ful 99b] T. Fuljahn
Documentation of FCS Software
Internes Dokument, HERA – B DAQ-Gruppe, Version 3.1, 15.9.1999

[Gar 57] R. L. Garwin, L. M. Lederman, 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

[Ger 98] E. Gerndt et al.
Description of Messages and Process-Logic for the First Level Trigger of HERA – B
Internes Dokument, HERA – B FLT-Gruppe, 8.9.1998

[Ger 00a] E. Gerndt
HERA – B Pretrigger and FLT Latency
Internes HERA – B Dokument 00-013, 14.2.2000

[Ger 00b] E. Gerndt
HERA – B Pretrigger and FLT Board Connection, V 3.1
Internes HERA – B Dokument 00-080, 4.4.2000

[Gil 01] Y. Gilitsky, T. Kvaratskheliia
New Muon Chamber Readout Electronics – Summary of Test Beam Results
Internes HERA – B Dokument 01-058, 20.4.2001

[Glä 97] J. Gläß, A. Wurz
Detector Data Transmission to the First Level Trigger of HERA – B
Internes HERA – B Dokument 97-011, Januar 1997

[Glä 98] J. Gläß, A. Wurz
HERA – B FLT Message Transfer Module
Internes Dokument, Lehrstuhl für Informatik V, Universität Mannheim, 28.5.1998

[Glä 00] J. Gläß, A. Wurz
HERA – B FLT Message Transfer Module LVDS
Internes Dokument, Lehrstuhl für Informatik V, Universität Mannheim, 11.2.2000

[Gro 00] D. E. Groom et al. (Particle Data Group)
Review of Particle Physics
Eur. Phys. Jour. **C15** (2000) 1

[Gua 88] M. Guanziroli et al.
Angular Distributions of Muon Pairs Produced by Negative Pions on Deuterium and Tungsten
Z. Phys. **C37** (1988) 545

[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 99] R. Harr
The MUON Pixel Mapping Board
Internes Dokument, Department of Physics and Astronomy, Wayne Sate University, Detroit, 25.6.1999

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

[Her 96] H. Herold
UNIX-Systemprogrammierung
1. Auflage, Addison-Wesley Verlag, Bonn 1996

[HER 90] The HERMES Collaboration
A Proposal to Measure the Spin Dependent Structure Function of the Neutron and the Proton at HERA
DESY–PRC 90–01

[HER 00a] The HERA – B Collaboration
HERA – B – Report on Status and Prospects
DESY–PRC 00/04, Oktober 2000

[HER 00b] The HERA – B Collaboration
HERA – B Physics in 2001/2002
Brief an das DESY-Direktorat, 1.12.2000

[Hus 00] U. Husemann
Muon Pretrigger Standalone Analysis: Looking at Real Data
Vortrag, Muon Reconstruction and Analysis Meeting, Universität Dortmund, 2.2.2000

[Hus 01] U. Husemann
Prospects of Drell-Yan Physics with the HERA – B Detector
Diplomarbeit, Universität Dortmund, März 2001

[İşs 01] S. İşsever
Entwicklung des Target-Steuersystems für das HERA – B-Experiment und Untersuchung der Eigenschaften des Targetbetriebs am HERA-Speicherring

Dissertation, Universität Dortmund, Januar 2001

[Jan 95] D. M. Jansen et al.
Measurement of the Bottom-Quark Production Cross Section in 800 GeV/c Proton-Gold Collisions
Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 3118

[Kla 00] E. Klaus
Untersuchungen zur Inbetriebnahme des HERA – B-Myon-Pretriggers und Monte-Carlo-Studien zum Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$
Diplomarbeit, Universität Dortmund, November 2000

[Kob 73] M. Kobayashi, T. Maskawa
CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction
Prog. Theor. Phys. **49** (1973) 652

[Kol 90] E. W. Kolb, M. S. Turner
The Early Universe
1. Auflage, Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1990

[Kol 98] Die Pretrigger Coincidence Unit ist von M. Kolander entwickelt worden.

[Kol 99] I. Kolotaev
Pretrigger Front End Driver Simulation Board
Internes Dokument, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Mai 1999

[Kol 00] M. Kolander, B. Schwenninger
The VME Interface of the Pretrigger Coincidence Unit – PCU
Internes Dokument, Version 1.0, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, 5.1.2000

[Lam 80] C. S. Lam, W.-K. Tung
Parton-Model Relation without Quantum-Chromodynamic Modifications in Lepton Pair Production
Phys. Rev. **D21** (1980) 2712

[Lap 97] P. A. Laplante
Real-Time Systems – Design and Analysis
2. Auflage, IEEE Press, New York 1997

[Leg 98] I. Legrand et al.
Proposal for a HERA – B Message Handler Interface
Internes Dokument, HERA – B DAQ-Gruppe, 15.6.1998

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

[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** no.5 (1954) 1

[Lyn 98] LynuxWorks® Inc.
LynxOS Betriebssystem Version 2.5.0, 1998

[MIZ 95] MIZZI Computer Software
Table Based Data Base
Version 2.1, 1995

[MIZ 97] MIZZI Computer Software
VME Unitilities/Libraries – Documentation
Version 1.5.4, 29.4.1997

[MSC 98a] MSC Vertriebs GmbH
Daughter-Board for DESY HERA – B Myon Chamber System – DES UT-0000
Technical Reference Manual V1.0, Juni 1998

[MSC 98b] MSC Vertriebs GmbH
Mother Board for DESY HERA – B Myon Chamber System – DES UM-0000
Technical Reference Manual V1.0, Juni 1998

[Mot 87] Motorola® Inc.
AutoBahn® Spanceiver
Datenblatt, Version 0, 1987

[Nam 00a] S. Nam in: J. Spengler
Minutes of the Run Coordination Meeting
25.8.2000

[Nam 00b] S. Nam
Pad Readout Noise and Modification of the Chamber Inner Structure
Internes HERA – B Dokument 00-145, 14.9.2000

[New 93] F. M. Newcomer et al.
A Fast, Low Power, Amplifier-Shaper-Discriminator for High Rate Straw Tracking Systems
IEEE Trans. Nucl. Sci **40** (1993) 630

[Noe 18] E. Noether
Invariante Variationsprobleme
Nachr. v. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen **2** (1918) 235

[Pau 55] W. Pauli in: W. Pauli (Hrsg.)
Niels Bohr and the Development of Physics; Exclusion Principle, Lorentz-Group and Reflection of Space-Time and Charge
2. Auflage, Pergamon Press, London 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, November 1998

[Rie 99] H. Riege, J. Schütt, R. van Staa
HERA – B First Level Trigger – Pretrigger Message Multiplexer
Internes Dokument, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, März 1999

[Rie 00] H. Riege, J. Schütt, R. van Staa
Muon Pretrigger Electronics – Message Generator
Internes Dokument, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, September 2000

[Ros 97] J. L. Rosner
CKM Matrix and Standard-Model CP Violation
Nucl. Phys. Proc. Suppl. **59** (1997) 1

[Ryb 99] V. Rybnikov
The State Machine Control Package for the HERA – B Run Control System
Internes Dokument, HERA – B DAQ-Gruppe, 11.5.1999

[Ryb 01] V. Rybnikov
The HERA – B Message Handler Interface with POSIX Threads
Internes Dokument, HERA – B DAQ-Gruppe, 19.3.2001

[Sak 67] A. D. Sakharov
Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe
ZhETF Pis'ma **5** (1967) 32; Sov. Phys. JETP Lett. **5** (1967) 24

[Sán 00] F. Sánchez
DAQ Status
Internes HERA – B Dokument 00-074, 3.3.2000

[Sch 57] H. Schopper
Circular Polarization of γ-rays: Further Proof for the Parity Failure in β-decay
Phil. Mag. **2** (1957) 710

[Sch 99a] B. Schwenninger
Data Format for the Muon Pixel Mapping Boards and the Pretrigger Link Boards for the Pixel System
Internes Dokument, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Version 1.2, 13.1.1999 (Version 1.0 als internes HERA – B Dokument 98-078)

[Sch 99b] B. Schwenninger
Minutes of FLT – High-p_T – Muon Pretrigger Meeting in Dortmund on 20.1.99
E-Mail, 21.1.1999

[Sch 99c] B. Schwenninger
mpcon – A Muon Pretrigger Control Program
Internes Dokument, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Version 0.5, 20.9.1999

[Sch 99d] B. Schwenninger

Mapping of the Muon Pad Chambers to Pretrigger Coincidence Unit and Pretrigger Message Generator Channels
Internes Dokument, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Version 1.4, 10.11.1999

[Sch 00] U. Schwanke
Trigger and Reconstruction Farms in the HERA – B Experiment and Algorithms for a Third Level Trigger
Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, Oktober 2000

[Spr 00] S. Spratte
Bestimmung der Wechselwirkungsrate des HERA – B Targets und Untersuchung des Coasting Beam am HERA Protonen-Ring
Dissertation, Universität Dortmund, Juni 2000

[Tit 00] M. Titov (representing the HERA – B Muon Collaboration)
The Muon System in the HERA – B Experiment
Nucl. Instr. Methods **A446** (2000) 355

[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 86] The ZEUS Collaboration
The ZEUS Detector: Technical Proposal
DESY–HERA–ZEUS–1, March 1986

[Zeu 00] T. Zeuner (for the HERA – B Inner Tracker Collaboration)
The MSGC-GEM Inner Tracker for HERA – B
Nucl. Instr. Methods **A446** (2000) 324

[Zeu 01a] T. Zeuner
Persönliche Mitteilung, Mai 2001

[Zoc 00] A. Zoccoli (for the HERA – B Collaboration)
The Electromagnetic Calorimeter of the HERA – B Experiment
Nucl. Instr. Methods **A446** (2000) 246

Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. P. Buchholz danke ich für die interessante und abwechslungreiche Aufgabenstellung und sein in mich gesetztes Vertrauen, die Integration des Myon-Pretriggers selbständig zu leiten. Die damit verbundene Möglichkeit, ein Jahr am DESY in Hamburg verbringen zu können, barg viele wertvolle Erfahrungen.

Mit seiner ansteckenden Begeisterung für wissenschaftliche – nicht nur physikalische – Fragestellungen gelang es Herrn Prof. Dr. D. Wegener immer wieder, mir einen Blick über den Tellerrand der eigenen Arbeit zu ermöglichen. Zudem danke ich ihm für sein Interesse an der Arbeit und die Bereitschaft, die Zweitkorrektur zu übernehmen.

Ohne die gemeinsame Anstrengung zusammen mit P. Bechtle und M. Böcker wäre die erfolgreiche Integration des Myon-Pretriggers nicht möglich gewesen. Eine so gute Zusammenarbeit, bei der alle Beteiligten an einem Strang ziehen und sich auch durch großen zeitlichen Druck nicht auseinander dividieren lassen, ist selten zu finden. Nicht zu vergessen sei die nie versiegende Quelle für Diskussionen über aktuelle politische Themen, die immer wieder für Ablenkung sorgten.

Für die sehr gute Zusammenarbeit und gegenseitige Hilfsbereitschaft, auch in Situationen, wenn der Streßfaktor sehr groß wurde, danke ich M. Kolander und den Mitgliedern der Arbeitsgruppe PREFEcT, M. Adams, P. Bechtle, M. Böcker, C. Cruse, U. Husemann und I. Kolotaev. Ohne die Entwicklung der Hardware-Komponenten gäbe es keine Integration in das HERA – B Experiment, ohne die durchgeführten Datenanlysen wären viele Aspekte des Myon-Pretriggers nicht verstanden und so manches interessante Ergebnis mit ihm nicht erzielt worden. Auch allen anderen Mitgliedern des Lehrstuhls EV ist zu danken für viele kleinere und größere Hilfen beim Entstehen dieser Arbeit. Einen besonderen Dank möchte ich hier an Dr. K. Ehret richten, der nicht nur bei allen Problemen mit der Online-Umgebung immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Das kritische Lesen des Manuskriptes haben dankenswerterweise M. Adams, M. Böcker, B. Grota, U. Husemann, M. Kolander und Dr. K. Wacker übernommen.

Dem Graduiertenkolleg „Erzeugung und Zerfälle von Elementarteilchen“ verdanke ich ein dreijähriges Stipendium und die Möglichkeit zur Teilnahme an einigen Schulen und Konferenzen.

Diese Arbeit wurde besonders während der Zeit am DESY von vielen Mitgliedern der HERA – B Kollaboration unterstützt, die ich nicht alle namentlich nennen kann. Besonders möchte ich der DAQ-Gruppe danken, die, obwohl ständig überarbeitet, immer schnell, unkompliziert und freundlich Hilfe leistete: Vielen Dank dafür an Dr. J. M. Hernández, Dr. V. Rybnikov und Dr. F. Sánchez! Für ihren Einsatz beim Betrieb des Myon-Detektors, ohne den die Entwicklungen für den Myon-Pretrigger keine Früchte getragen hätten, danke ich vor allem M. Buchler, Dr. S. Nam, J.-G. Shiu, M. Titov und Dr. Y. Zaitsev. Diskussionen über die Integration in das Triggersystem mit Dr. H. Itterbeck und Dr. D. Reßing gaben wichtige Anstöße für die Strukturierung der Online-Software.

Mit ihrer Gastfreundschaft haben Familie Schraut und Frau K. Plehn meinen Aufenthalt in Hamburg angenehmer gestaltet und für Ablenkung von der täglichen Arbeit gesorgt. Beate, Markus und Philip danke ich für ihre Unterstützung in einer schwierigen Lage.

Meinen Eltern und ihren Ehepartnern sowie meinen Großeltern habe ich vieles zu verdanken. Da es den Rahmen sprengen würde, alles aufzuzählen, erwähne ich hier nur ihre Geduld und ihr Verständnis für meine Situation während der letzten Monate dieser Arbeit.

Die Beteiligung des Lehrstuhls EV am HERA – B Experiment wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter der Projektnummer 057DO55P gefördert.