

G

Trappmann

Interner Bericht
DESY F35D-97-04
May 1997



Überwachung der First-Level-Trigger-Raten mit dem ZEUS-Echtzeit-Expertensystem ZEX

by

D. Kahnert

Eigentum der **DESY** Bibliothek
Property of **DESY** Library
Zugang **16. JUNI 1997**
Accessions
Leihfrist **7** days
Loan period: **7** days

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

**"Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser"**

Überwachung der First-Level-Trigger-Raten mit dem ZEUS-Echtzeit-Expertensystem ZEX

Diplomarbeit am Fachbereich Physik der Universität Hamburg

vorgelegt von
Dirk Kahnert

Mai 1997

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 HERA und ZEUS	3
1.1 HERA	3
1.1.1 Der Beschleunigerkomplex	3
1.2 Das ZEUS-Experiment	4
1.2.1 Der ZEUS-Detektor	4
1.2.2 Das ZEUS-Datenerfassungssystem	8
2 Wissensrepräsentation und regelbasierte Expertensysteme	15
2.1 Wissensrepräsentation	15
2.2 Komponenten eines regelbasierten Expertensystems	17
2.3 ZEX – Ein Expertensystem bei ZEUS	19
2.4 Entwurfsmethodik	21
2.4.1 Endliche Automaten und regelbasierte Expertensysteme	21
2.4.2 Hareldiagramme und objektorientierter Ansatz	23
3 Beispiel regelbasierter Programmierung: Die Kollimatorüberwachung	27
3.1 Die Elektronenkollimatoren	27
3.2 Entwurf und Implementation von ZEX-COLLIMATOR	28
3.3 Erste Betriebserfahrungen	33
4 Überwachung der First-Level-Trigger-Raten mit ZEX	35
4.1 Analyse der Triggerraten im ZEUS-Experiment	35
4.1.1 Bestimmung der Luminosität	36
4.1.2 Untergrundeffekte	38
4.1.3 Parametrisierung der Triggerraten	41
4.2 Entwurf und Implementation von ZEX-GFLT	48
4.2.1 Objekte und Zustände von ZEX-GFLT	48
4.2.2 Die grafische Benutzerschnittstelle	52
4.2.3 Automatische Neukonfiguration bei veränderter Triggerlogik	53
4.3 Erste Betriebserfahrungen	54
Zusammenfassung	57
Literaturverzeichnis	59
Danksagung	61

Abbildungsverzeichnis

1.1 Schematische Ansicht der HERA-Beschleunigeranlage	3
1.2 Längsschnitt des ZEUS-Detektors	5
1.3 Querschnitt des ZEUS-Detektors	6
1.4 Schematische Darstellung des Datenflusses im ZEUS-DAQ-System	9
1.5 Zeitliche Zusammenhänge im ZEUS-Triggersystem	10
1.6 Schematischer Aufbau des Global First Level Trigger	12
1.7 Zustandsübergangsdiagramm von Run Control	14
2.1 Architektur eines Expertensystems	17
2.2 Modell eines regelbasierten Expertensystems	19
2.3 Architektur des ZEUS-Expertensystems ZEX	20
2.4 Schema der Blackboard-Architektur	21
2.5 Repräsentation eines endlichen Automaten mit Hilfe von Graphen	22
2.6 Beispiel eines endlichen Automaten, der Binärzahlen akzeptiert	23
2.7 Klassen- und Zustandsübergangsdiagramm einer Klasse 'Lampe', dargestellt mit Attributen und Methoden zur Erläuterung der Nomenklatur von Harel-Diagrammen	24
3.1 Schematische Anordnung der Elektronenkollimatoren	28
3.2 Klassendiagramm der Elektronenkollimatorüberwachung	29
3.3 Harel-Diagramm zur Bestimmung des Zustandes der Kollimatorbacken	30
3.4 Harel-Diagramm der verschiedenen Zustände des Elektronenstrahls in HERA	31
3.5 Harel-Diagramm zur Steuerung einer Kollimatoralarmlampe	32
3.6 Grafische Ansicht der Kollimatorüberwachung in ZEX	34
4.1 Ein Ausschnitt aus der Darstellung der GFLT-Raten im ZEUS-Histogramm-Presenter	36
4.2 Triggerraten, aufgetragen gegen die Luminosität, Hilfsmittel der Betriebsmannschaft zur Überwachung der Trigger	37
4.3 Triggerrate, aufgetragen gegen die Zeit	38
4.4 Zählrate des $E\gamma$ -Zählers aufgetragen gegen die instantane Luminosität	39
4.5 Ein Strahl-Restgas-Ereignis, dargestellt mit dem ZEUS-Event-Display	40
4.6 Triggerrate des Kanals 51, aufgetragen gegen die $E\gamma$ -Zählrate	42
4.7 Darstellung der Zählraten verschiedener Trigger-Kanäle, aufgetragen gegen die Zählrate des Luminositätsmonitors	43
4.8 Triggerraten des Triggerkanals 11, im Bereich $\mathcal{L}_{int} > 6 \cdot 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ist eine deutliche Streuung der Zählraten sichtbar	44
4.9 Länge eines Runs, aufgetragen gegen die gemittelte Luminosität	45

4.10	Darstellung der Bänder des Trigger-Kanals 9, ermittelt aus allen zur Verfügung stehenden Daten sowie mit Hilfe des truncated-mean-Verfahrens	46
4.11	Darstellung der Bänder des Trigger-Kanals 63, ermittelt aus allen zur Verfügung stehenden Daten sowie mit Hilfe des truncated-mean-Verfahrens	47
4.12	Darstellung des Trigger-Kanals 11. Dargestellt ist ein Meßpunkt pro Run, welcher die gemittelten Raten und Luminositäten symbolisiert. Hier ist keine luminositätsabhängige Schranke notwendig.	48
4.13	Klassendiagramm der GFLT-Überwachung	49
4.14	Harel-Diagramm der möglichen Zustände eines Triggerkanals	50
4.15	Harel-Diagramme für das Run Control System sowie die benötigten Strahlzustände von HERA	50
4.16	Harel-Diagramm der Statuslampe eines Triggerkanals	51
4.17	Harel-Diagramm zur Ermittlung eines globalen GFLT-Status	52
4.18	Schematische Darstellung der Hierarchie der Bildschirmseiten in ZEX.	53
4.19	Darstellung der Statusanzeigen der 64 Triggerkanäle in ZEX (Übersichtsseite von ZEX-GFLT)	55
4.20	Darstellung eines Triggerkanals in ZEX	56

Tabellenverzeichnis

1.1	Soll-Werte des HERA-Beschleunigers	4
1.2	Übersicht der verschiedenen Komponentensubsysteme des ZEUS-Experiments	11
3.1	Parameter der Elektronkollimatoren und Absorber	28
3.2	Die möglichen Zustände eines stillstehenden Kollimators.	30
3.3	Die möglichen Zustände der Kollimatorsignallampe	31
4.1	Die möglichen Zustände einer Triggerrate	49
4.2	Die möglichen Zustände der Signallampe eines Triggerkanals	51

Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Rahmen des an der Hadron—Elektron—Ringanlage (HERA) des Deutschen Elektronen-Synchrotrons in Hamburg durchgeführten ZEUS-Experiments erstellt.

Beim Betrieb des HERA-Speicherringes kann es an den Wechselwirkungspunkten alle 96 ns zu einer Kollision der Elektronen- und Protonenpakete kommen, was extrem hohe Anforderungen an die Ausleseelektronik des Detektors stellt. Die hierbei entstehende Datenmenge muß reduziert werden, da eine Aufzeichnung aller Informationen nicht sinnvoll ist. Ein Großteil der Informationen enthält nicht physikalisch interessante Ereignisse, sondern z.B. Reaktionen des Strahls mit Restgasatomen, Strahlverluste an der Wand des Strahlrohres oder Reaktionen der kosmischen Strahlung.

Eine Reduktion der Datenmenge findet mit Hilfe eines mehrstufigen Triggersystems statt, das eine schnelle, massiv parallele Filterung der Daten vornimmt.

In diesem komplexen Datennahmesystem können sehr unterschiedliche Fehler wie z.B. der Ausfall einer Komponente, Kommunikationsprobleme, Datenflußblockaden usw. auftreten und somit den Wert der aufgezeichneten Daten einschränken.

Um die bestmögliche Nutzung der zur Verfügung stehenden Meßzeit zu gewährleisten, besteht die Aufgabe der Bedienermannschaft darin, die einzelnen Komponenten zu überwachen und aufgetretene Fehler zu beheben. Zur Überwachung des ZEUS-Detektors steht den Operateuren eine nahezu unüberschaubare Anzahl von Parametern zur Verfügung. Eine effektive Steuerung des Experiments erfordert eine Interpretation der vorliegenden Überwachungsdaten. Dies erfordert eine Selektion relevanter Informationen durch die Operateure. Hierzu benötigt die Bedienermannschaft Erfahrung und umfassende Kenntnis der Systemparameter, dieses Wissen ist jedoch auf die jeweiligen Systemexperten verteilt und somit nicht permanent verfügbar.

Zur Vermeidung dieser Probleme und zur Unterstützung der Bedienermannschaft wurde 1992 bei ZEUS mit der Entwicklung eines Expertensystems begonnen. Nach Studien, welche mit einem Prototypen durchgeführt wurden, der in der Programmiersprache C erstellt wurde, ist die weitere Entwicklung mit einer kommerziellen Expertensystem-Entwicklungsumgebung fortgeführt worden. Dieses System verfügt über eine Wissensbasis, in der die Kenntnisse der Experten in Regeln der Form *if...then...* formuliert werden sowie über einen Mechanismus, um Schlußfolgerungen aus diesem Wissen abzuleiten.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine Überwachung der Eingangsraten des First Level Triggers entwickelt, wobei objektorientierte Analysemethoden zur Formulierung von Verhaltensstrategien zur Anwendung kommen. Eine automatische Überwachung der Triggerraten wird durch die Untersuchung von Verteilungen ermöglicht, die die Triggerraten gegen die Luminosität aufgetragen enthalten. Hier ist es möglich, aus Referenzverteilungen Grenzen für die Zählraten zu berechnen, indem man die Raten als Funktion der Luminosität parametrisiert und aus den Fehlern einer Regression diese Grenzen berechnet.

Die Überwachung der Triggerraten ist dazu geeignet, die Bedienermannschaft von zeitaufwendigen Routinearbeiten abzulösen, in der Vergangenheit mußten in regelmässigen Abständen die Raten von 64 Kanälen mit Vorlagen verglichen werden. Zur Implementation im Expertensystem wurde eine Methode entwickelt, mit Hilfe von formalen Entwicklungsverfahren eine dokumentierte Problemlösung zu erarbeiten. Mit Hilfe von sog. Harel-Diagrammen ist es möglich, die Handlungen von Experten in grafischen Darstellungen zu formulieren, welche leicht in Regeln umgesetzt werden können.

Eine Überwachung der Elektronenkollimatoren stellt eine grafische Darstellung der Kollimatorbacken zur Verfügung, hier ist ein schnelles Erfassen der momentanen Position und des Bewegungszustandes möglich. Anhand der Entwicklung der Kollimatorüberwachung konnte die Eignung von Harel-Diagrammen als Entwicklungsmethode eingehend untersucht und beurteilt werden.

Über die Entwicklung der Analysemethode, die Implementation im Expertensystem und erste Erfahrungen mit der Kollimator- und Triggerratenüberwachung im Betrieb wird nachfolgend berichtet.

Kapitel 1

HERA und ZEUS

1.1 HERA

Die weltweit erste Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA) bei DESY in Hamburg ermöglicht Elektron-Proton-Wechselwirkungen bei einer Schwerpunktennergie von etwa 300 GeV. Seit 1994 werden jedoch Positronen benutzt, da diese eine längere Strahllebensdauer als die Elektronen haben.

HERA wurde in einem 6.3 km langen unterirdischen Tunnel realisiert, vier Hallen bieten Platz für Experimente. Die Experimente H1 [H1 93] und ZEUS [ZEU93] laufen seit Inbetriebnahme von HERA. Die beiden anderen Hallen beherbergen die Experimente HERA-B (im Aufbau [Kri94]) und HERMES (HER93) (Betrieb seit 1994).

1.1.1 Der Beschleunigerkomplex

Die Elektronen/Positronen und Protonen, die in HERA injiziert werden, haben bereits das in Abb. 1.1 gezeigte System von Vorbeschleunigern durchlaufen. Im linken Teil der Abbildung ist die Anordnung der Vorbeschleuniger gezeigt, rechts sieht man die Anordnung der einzelnen Experimente am HERA-Speicherring.

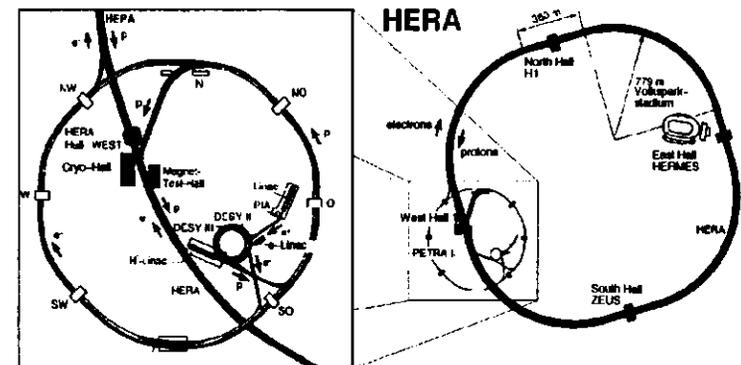


Abbildung 1.1: Schematische Ansicht der DESY-Beschleunigeranlage (Erläuterungen im Text).

HERA Parameter	Design-Wert		Einheit
	e-Strahl	p-Strahl	
Endenergie	30	820	[GeV]
Injektionsenergie	14	40	[GeV]
Luminosität	1.5 · 10 ³¹		[cm ⁻² s ⁻¹]
Magnetfeld	0.165	4.68	[T]
Teilchenstrom	58	163	[mA]
Zahl der Teilchenpakete	210		
Teilchenpaketabstand	96		[ns]
Horizontale Strahlausdehnung σ_x	0.26	0.29	[mm]
Vertikale Strahlausdehnung σ_y	0.02	0.07	[mm]
Longitudinale Strahlausdehnung	8.0	110	[mm]
Energieverlust pro Umlauf	127	1.4 · 10 ⁻¹⁰	[MeV]

Tabelle 1.1: Soll-Werte des HERA-Beschleunigers [Wii91].

Nach ihrer Erzeugung und Durchlauf eines Linearbeschleunigers (Linac) werden die Elektronen (Positronen durchlaufen zusätzlich den Positron Intensity Accumulator (PIA)) mit 430 MeV in das Synchrotron DESY-II injiziert, um dann nach einer weiteren Beschleunigung auf 12 GeV durch PETRA, welcher 1988 zum HERA-Vorbeschleuniger umgebaut wurde, in den HERA-Speicherring eingespeist zu werden. Die Protonen werden nach Durchlaufen eines Linacs und des Synchrotrons DESY-III auch in PETRA injiziert, aus dem sie dann mit 40 GeV in HERA eintreten. In HERA kann der Protonenstrom 163 mA erreichen, der Strom der Elektronen/Positronen¹ kann bis zu 58 mA betragen. Beide Strahlen laufen in bis zu 210 Bunches mit einem Abstand von 28.8 m um, was zu einer Begegnung der Pakete an den Wechselwirkungspunkten alle 96 ns führt, dies entspricht einer Wechselwirkungsrate von bis zu 10 MHz. Die Design-Werte von HERA findet man in Tabelle 1.1.

1.2 Das ZEUS-Experiment

Das ZEUS-Experiment ist eines der vier Experimente am HERA-Beschleuniger. Der Detektor und sein Datenerfassungssystem (DAQ²) werden im folgenden beschrieben.

1.2.1 Der ZEUS-Detektor

Um möglichst viele Informationen über eine Streureaktion zu erhalten, ist eine vollständige Vermessung der Bahnen, Impulse und Energien der bei der Kollision erzeugten Teilchen nötig. Die Bestimmung dieser Parameter erfordert unterschiedliche Meßverfahren und Nachweisgeräte, so daß der ZEUS-Detektor aus insgesamt 26 Komponenten aufgebaut ist. Der Detektor hat eine Größe von 12m × 10m × 19m und ein Gesamtgewicht von ca. 3600 Tonnen.

Der Aufbau des Detektors ist zwiebelschalenförmig, wobei die inneren Komponenten der Spur-

¹Im folgenden wird nur von Elektronen gesprochen, alle Beschreibungen bleiben jedoch analog auch für Positronen gültig.

²Data Acquisition

bestimmung und die äußeren Komponenten der Energiebestimmung dienen, da die Energiemessung mit der Absorption der Teilchen verbunden ist. Anhand der Abbildungen 1.2 und 1.3 soll hier eine kurze Beschreibung der einzelnen Komponenten erfolgen, eine detaillierte Beschreibung findet man in [ZEU93].

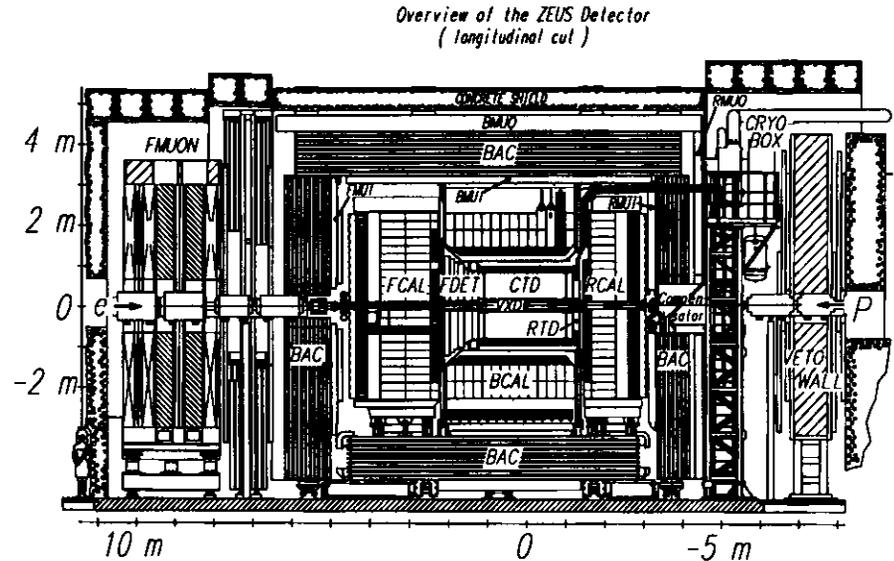


Abbildung 1.2: Der ZEUS-Detektor im Längsschnitt.

- Direkt am Strahlrohr befindet sich der Vertex-Detektor (VXD), eine zylindrische Driftkammer mit einer Ortsauflösung im Bereich von 35–70 μm . Sie dient der exakten Vermessung des Elektron-Proton-Wechselwirkungspunktes und dem Nachweis sehr kurzlebiger Teilchen. Der Vertexdetektor ist jedoch zur Zeit nicht in den ZEUS-Detektor eingebaut.
- Der Vertex-Detektor wird von der zentralen Spurkammer (Central Tracking Detector, CTD), einer zylindrischen Driftkammer, umschlossen. Diese Kammer hat eine Ortsauflösung im Bereich von 120–130 μm in der $r - \phi$ -Ebene und 1,0–1,4 mm in axialer Richtung. Mit einem Magnetfeld von 1,43 T, welches von der supraleitenden Spule (COIL) erzeugt wird (siehe unten), ergibt sich somit für geladene Teilchen eine Impulsauflösung von $\Delta p_T/p_T \approx \sqrt{(0.005 p_T)^2 + (0.016)^2}$ (p_T : Transversalimpuls in GeV).
- Eine supraleitende Spule (COIL) umgibt den Vertexdetektor und die zentrale Spurkammer mit einem nominalen Magnetfeld von 1,43 T. Somit ist mit den Spurkammern eine Impulsbestimmung der geladenen Reaktionsprodukte möglich. Eine zweite supraleitende Spule (COMPENSATOR) mit einem Feld von ca. 5 T gleicht den Einfluß dieses Magnetfeldes auf die Teilchenstrahlen wieder aus. Sie befindet sich hinter dem RCAL.
- Entlang der Strahlachse befinden sich in Elektronenrichtung die Rückwärtsspurkammer (Rear Tracking Detector, RTD) und in Protonenrichtung die Vorwärtsspurkammer (Forward Tracking Detector, FTD). Diese Spurkammern dienen der Detektion von geladenen

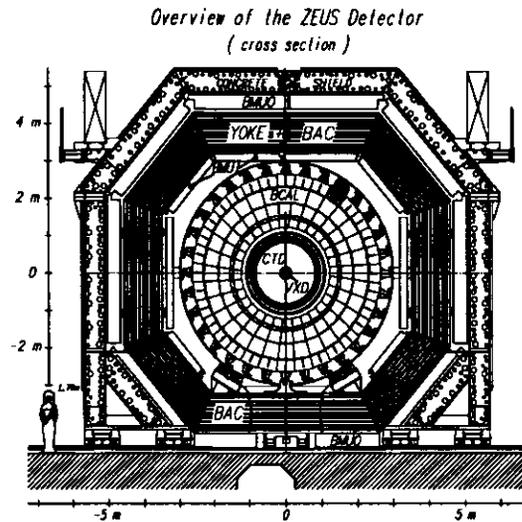


Abbildung 1.3: Der ZEUS-Detektor im Querschnitt.

Teilchen, die unter extrem kleinen Winkeln in Strahlrichtung gestreut werden. Der RTD besteht aus einer, der FTD aus drei ebenen Driftkammern mit einer Ortsauflösung von $120 \mu\text{m}$. In den Freiräumen zwischen den drei Driftkammern des FTD befinden sich vier Übergangsstrahlungsdetektoren (TRD, Transition Radiation Detector), die vor allem der Unterscheidung von Hadronen und Elektronen dienen.

- Der zentrale Bereich des Detektors, der aus den verschiedenen Driftkammern gebildet wird und der Spurbestimmung der Reaktionsteilchen dient, wird von einem Uran-Szintillator-Kalorimeter umgeben. Dieses Kalorimeter ist aus insgesamt 30 Modulen aufgebaut die sich in die drei Bereiche des FCAL (Forward Calorimeter), des RCAL (Rear Calorimeter) und des BCAL (Barrel Calorimeter) gliedern. Jedes Modul besitzt eine Schichtstruktur aus abgereichertem Uran und Szintillatormaterial. Das Kalorimeter erreicht unter Teststrahlbedingungen eine relative Energieauflösung von $\Delta E/E = 18\%/\sqrt{E}$ (E in GeV) für Elektronen und $\Delta E/E = 35\%/\sqrt{E}$ für Hadronen, sowie eine Raumwinkelabdeckung von 99,7%.
- Vor dem RCAL und FCAL ist eine Szintillatormatrix, der sogenannte Presampler installiert. Der Presampler erlaubt eine Korrektur der Energiemessung im Kalorimeter, welche durch Wechselwirkungen von Teilchen im Material zwischen Wechselwirkungspunkt und Kalorimeter verfälscht werden.
- In Elektronenrichtung ist 3 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt das Beampipe-Kalorimeter (BPC) installiert. Dieses aus Wolfram und Szintillator bestehende Kalorimeter dient zum Nachweis von Elektronen, die unter sehr kleinen Winkeln gestreut werden. Das BPC erreicht eine Energieauflösung für Elektronen von $\Delta E/E = 20\%/\sqrt{E}$ (E in GeV).

- In einer Tiefe von 3,3 Strahlungslängen sind im RCAL die Siliziumdioden des Hadron-Elektron-Separators (HES, auf den Abbildungen nicht dargestellt) platziert. Sie dienen der Unterscheidung von Elektronen und Hadronen. Im FCAL ist die Installation zweier HES-Module hinter der dritten und der siebten Szintillatorschicht vorgesehen.
- Der gesamte innere Detektor sowie das Uran-Szintillator-Kalorimeter sind vom Backing Calorimeter (BAC) umschlossen, welches die Energiemessung vervollständigt und zur Restenergiebestimmung der noch nicht vollständig im Kalorimeter erfaßten hadronischen Schauer dient. Das BAC wird aus den sechs Schichten des Eisenjochs (YOKE) und den in den Zwischenräumen befindlichen Proportionalzählrohren gebildet und erreicht eine Energieauflösung für Hadronen von $\Delta E/E = 110\%/\sqrt{E}$ (E in GeV), sowie eine Ortsauflösung von bis zu 1 mm.
- Innerhalb und außerhalb des Eisenjochs befinden sich noch weitere Spurrkammern zur Myonendetektion (BMUO, BMUI, RMUO, RMUI: Barrel/Rear Muon Outer/Inner Detector). Das Eisenjoch wird mit einer Kupferspule auf 1,6 T erregt, somit ist eine Impulsbestimmung der Myonen möglich. Die Auflösung beträgt $\Delta p/p < 30\%$ bei einer Myonenenergie von 20 GeV.
- In Protonenrichtung schließt sich außerhalb des Eisenjochs das Vorwärts-Myon-Spektrometer (FMUON) an, das aus einem System von Driftkammern mit zwischengelagerten Eisenrotoridmagneten besteht. Das Spektrometer erreicht bei einer Energie von 100 GeV eine Auflösung von $\Delta p/p < 23\%$.
- In Elektronenrichtung schließt sich außerhalb des Eisenjochs die Vetowand (VETO) an, die der Abschirmung des zentralen Detektorbereiches vor Teilchen aus dem Strahl-Halo dient. Sie besteht aus einer auf beiden Seiten mit Szintillatorschichten bestückten Eisenwand.
- Direkt um das Strahlrohr ist vor dem RCAL der Small Angle Rear Tracking Detector (SRTD) installiert. Dieser aus Szintillatorstreifen aufgebaute Detektor arbeitet ebenfalls als Elektronenpresampler und weist Elektronen nach, die unter kleinen Winkeln gestreut werden. Durch eine Zeitauflösung $< 1 \text{ ns}$ liefert die SRTD ein genaues Zeitsignal für den First Level Trigger.

Außerhalb des Wechselwirkungshalle gibt es noch weitere Detektorkomponenten, die auf den Abbildungen nicht dargestellt sind:

- Das Leading Proton Spectrometer (LPS), welches dem Nachweis von unter sehr kleinen Winkeln gestreuten hochenergetischen Protonen dient. Es besteht aus sechs Paketen von Siliziumstreifenanzählern, die im Bereich von 40–90 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt verteilt sind.
- Das Forward Neutron Calorimeter (FNC) zum Nachweis von unter sehr kleinen Winkeln gestreuten Neutronen. Dieses Blei-Szintillator-Kalorimeter befindet sich 104 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt in Protonenrichtung und hat eine Energieauflösung von etwa $\Delta E/E = 155\%/\sqrt{E}$.
- Der Luminositätsmonitor (LUM1), der die in Elektron-Proton-Bremsstrahlung erzeugten Photonen und Elektronen in Kalorimetern nachweist, die 108 m und 36 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt installiert sind.

- Der Proton Remnant Tagger (PRT) weist geladene Teilchen nach, die den ZEUS-Detektor in Proton-Richtung durch das Strahlrohr verlassen. Der PRT besteht aus Szintillationszählern, die an drei Punkten direkt am Strahlrohr platziert sind. Die erste Gruppe von Zählern ist 5,3 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt noch innerhalb des zentralen Detektors. Außerhalb des Detektors sind in 23,1 m und 24,4 m Entfernung weitere Szintillatortruppen installiert.
- Zwei Wolfram-Szintillator-Kalorimeter (8 m- und 44 m-Tagger) sind in 8 m und 44 m Entfernung vom Wechselwirkungspunkt in Elektronenrichtung installiert. Diese elektromagnetischen Kalorimeter weisen Elektronen nach, die unter extrem kleinen Winkeln gestreut werden. Die Energieauflösung unter Teststrahlbedingungen beträgt bis zu $\Delta E/E = 30\%/\sqrt{E}$.

1.2.2 Das ZEUS-Datenerfassungssystem

Beim Betrieb des HERA-Speicherringes kann es an den Wechselwirkungspunkten alle 96 ns zu einer Kollision der Elektronen- und Protonenpakete kommen, was extrem hohe Anforderungen an die Ausleseelektronik des Detektors stellt. Aus der hierbei entstehenden Datenmenge müssen interessante Ereignisse selektiert werden, da eine Aufzeichnung aller Informationen nicht sinnvoll ist. Ein Großteil der Informationen enthält nicht physikalisch interessante Ereignisse, sondern z.B. Reaktionen des Strahls mit Restgasatomen, Strahlverluste an der Wand des Strahlrohres oder Reaktionen der kosmischen Strahlung.

Eine Reduktion der Datenmenge findet mit Hilfe eines mehrstufigen Triggersystems statt, das eine schnelle, massiv parallele Filterung der Daten vornimmt.

Einen Überblick über die verwendeten Trigger- und Datenerfassungssysteme gibt Abb. 1.4, die zeitlichen Zusammenhänge der verschiedenen Triggerstufen zeigt Abb. 1.5. Abbildung 1.4 zeigt den Datenfluß von den Ausleseelektroniken der einzelnen Detektorkomponenten bis hin zur Datenaufzeichnung im Rechenzentrum. Die nun folgende Beschreibung beschränkt sich auf den Datenfluß. Einzelheiten, insbesondere zu den verwendeten Triggeralgorithmen entnehmen man [Smi90, ZEU93]. Aufgrund sehr unterschiedlicher Nachweismethoden der einzelnen Detektorkomponenten ergibt sich ein heterogener Aufbau des Datennahmesystems. Eine Auflistung der von den Komponentensubsystemen auszulesenden Datenkanäle und den typischerweise anfallenden Datenmengen findet man in Tabelle 1.2.

Der First Level Trigger

Die einzelnen Detektor-Komponenten werden von einer Elektronik alle 96 ns ausgelesen. Die dabei anfallenden Daten werden von der jeweiligen Frontendelektronik in einer lokalen Datenpipeline abgelegt. Dieser Pipelinespeicher funktioniert nach folgendem Prinzip: der Speicher enthält eine Anzahl (n) Speicherplätze, die Daten werden alle 96 ns einen Platz weitgeschoben, somit werden die Daten nach n Taktzyklen aus der Pipeline gelöscht. Gleichzeitig findet eine erste Selektion der Daten durch das First Level Trigger System (FLT) statt, welches innerhalb von 5 μ s über die Verwertbarkeit der Daten zu entscheiden hat. Der FLT arbeitet als Pipeline, d.h. er kann alle 96 ns ein neues Ereignis akzeptieren und muß in einer Zeit von ca. 5 μ s eine Entscheidung fällen. Die Entscheidungszeit ist für alle Ereignisklassen und Kanäle gleich groß. Der FLT ist nicht in der Lage, die vollständige Datenmenge zu analysieren. Für eine Entscheidung über die weitere Verwendbarkeit ist dies aber auch nicht notwendig, da schon wenige

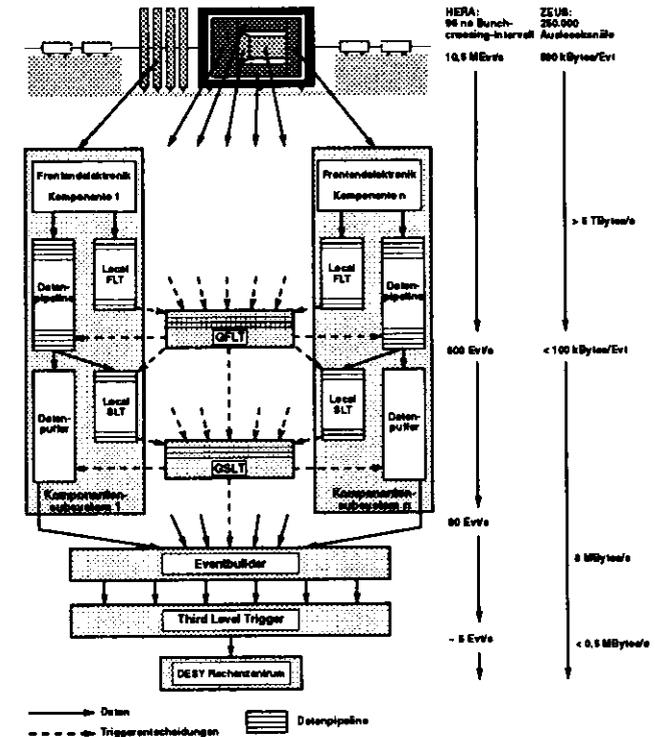


Abbildung 1.4: Vereinfachte Darstellung des Datenflusses im ZEUS-Trigger- und Datenerfassungssystem (Erläuterungen im Text).

Informationen, z.B. die gesamte im Kalorimeter deponierte Energie eine große Aussagekraft besitzen. Hierzu führen zunächst die lokalen Triggersysteme (local FLT) der einzelnen Komponenten eine erste Analyse innerhalb von 2 μ s durch und übermitteln ihr Ergebnis an den Global First Level Trigger (GFLT). Nach Vorliegen aller lokalen Triggerinformationen trifft diese innerhalb der verbleibenden 3 μ s eine Entscheidung, ob die Daten weiter verarbeitet werden. Die Rate der positiven Triggerentscheidungen ist auf 600 Hz begrenzt, so daß sich die Datenmenge schon um einen Faktor > 10000 reduziert hat.

Der schematische Aufbau des GFLT ist in Abb. 1.6 gezeigt. Die Daten der Komponenten werden nach ihrem physikalischen Informationsgehalt in neun Gruppen zusammengefaßt (in der Abbildung durch Rechtecke auf der linken Bildhälfte angedeutet). In jeder dieser Boxen werden die einlaufenden Daten durch eine Triggerlogik miteinander in Korrelation gebracht und Ja/Nein-Bits generiert, welche einer positiven/negativen Triggerentscheidung entsprechen. Mit diesen Ja/Nein-Bits werden die logischen Operationen der 64 Trigger-Kanäle des GFLT durchgeführt. Die Logik dieser 64 Kanäle ist komplexer als die der lokalen Kanäle; hier werden bereits Daten verschiedener Komponenten miteinander kombiniert. Als Beispiel werden hier zwei Kanäle erläutert [Tok96, Bai97].

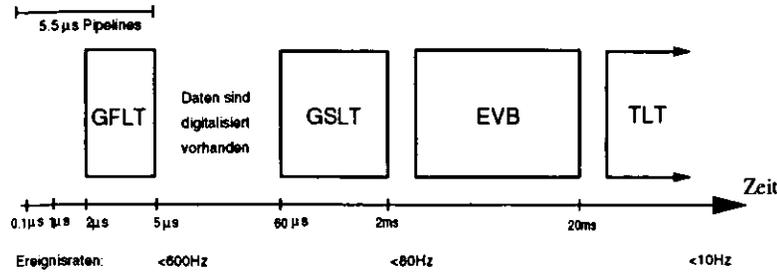


Abbildung 1.5: Zeitliche Zusammenhänge im ZEUS-Triggersystem (Erläuterungen im Text).

Logik von Slot 44: `BEMC*aTRK_OR_REMC*96g`. Dies ist die Beschreibung folgender interner Triggerlogik: `BCAL EMC_E>=thres_1 && (TRK_q95a || TRK_q95b) || RCAL EMC_E>=thres_2`. Dies bedeutet folgendes: Energiedeposition im BCAL EMC oberhalb eines Schwellwerts `thres_1` UND Nachweis von Teilchenspuren in der CTD mit charakteristischen Signaturen (`TRK_q95a` ODER `TRK_q95b`) ODER Energiedeposition im RCAL EMC über einem Schwellwert `thres_2`. Physikalisch: Energiedeposition im elektromagnetischen Teil des BCAL und gleichzeitiger Nachweis von Teilchenspuren oder Energiedeposition im elektromagnetischen Teil des RCAL. Logik von Slot 9: `LEe*BRMUI*vldgTRK*96h`. Dies ist die Beschreibung folgender interner Triggerlogik: `(BMUI || RMUI) && LUMI_Ee_with_Eg_veto >=thres && TRK_q95b`. Diese Logik bedeutet folgendes: Nachweis eines Teilchens in BMUON oder RMUON (`BMUI || RMUI`) UND Elektron-Energie des LUMI-Monitors über einem Schwellwert mit Veto des γ -Zählers (`LUMI_Ee_with_Eg_veto`) UND Nachweis von Teilchenspuren in der CTD mit einer bestimmten Signatur (`TRK_q95b`). Physikalisch: Detektion eines Myons und Nachweis von Teilchenspuren. Gleichzeitig Nachweis eines Elektrons im LUMI-Zähler, welches durch das Veto des Photonzählers als aus der Reaktion stammend identifiziert wird. Dies reduziert den Einfluß von Zufallskoinzidenzen mit Brensstrahlungsereignissen. Insgesamt vermutlicher Ausschluß eines kosmischen Myons und Nachweis eines Elektrons, welches nicht dem Photoproduktionsprozeß zur Luminositätsmessung zugeordnet werden kann.

Die endgültige GFLT-Entscheidung wird durch ein globales logisches ODER vorgenommen, welches diese 64 Kanäle miteinander verknüpft. Hieraus resultiert die endgültige Entscheidung des GFLT, ob ein Ereignis akzeptiert oder verworfen wird. Für jeden Sub-Trigger existiert noch ein sogenannter Pre-Scaler, mit dem die Trigger-Rate, falls nötig, reduziert werden kann. Außerdem ist es möglich, für jeden Kanal ein externes Veto zu setzen. Vor Beginn des Experiments wird die Definition der Logik aller 64 Kanäle vom Trigger-Experten vorgenommen. Die Triggerkonfiguration kann vor jeder neuen Messung geändert werden. Die Algorithmen der Triggerlogiken werden mit Hilfe von Monte-Carlo-Rechnungen bestimmt und optimiert.

Triggerzyklus im FLT

Die meisten Trigger und Auslesepipelines der Komponenten und des GFLT sind mit der HERA-Uhr synchronisiert, welche einen 96 ns Zyklus hat. Einige Trigger arbeiten mit einer asynchronen Elektronik. Die einzelnen Komponententrigger müssen ihren Datentransfer zum GFLT 26 Zyklen nach der Kollision der Teilchenpakete beendet haben. Gleichzeitig werden alle Informationen der Komponenten auch in einer lokalen Pipeline abgelegt, aus der die Daten bei einer

Komponente		Anzahl der Auslesekanäle	Datenmenge [kBytes]
Central Tracking Detector	CTD	4.608	5 - 10
Forward/Rear Tracking Detector	FRTD	5.778	2 - 5
Barrel Calorimeter	BCAL	5.184	10 - 15
Forward Calorimeter	FCAL	4.344	10 - 15
Rear Calorimeter	RCAL	2.336	10 - 15
Transition Radiation Detector	TRD	2.472	1
Hadron Electron Separator	HES	37.304	5 - 10
Backing Calorimeter	BAC	≈ 40.000	1 - 5
Barrel/Rear Muon Detector	BMUO	84.336	2
Forward Muon Detector	FMUO	18.948	1
Leading Proton Spectrometer	LPS	32.000	0,2
Luminosity Monitor	LUMI	36	0,2
Vetowall	VETO	64	0,01
Fast Clear	FCLR	—	2
Global Second Level Trigger	GSLT	—	10 - 20
Σ		≈ 238.000	56 - 95

Tabelle 1.2: Übersicht über die Komponentensubsysteme des ZEUS-Experiments.

positiven Entscheidung zum Second Level Trigger übertragen werden. Der GFLT sammelt die Daten aller lokalen Trigger und prüft mit diesen Informationen, ob die Triggerbedingungen erfüllt werden. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, sendet der GFLT 46 Zyklen nach der Kollision eine Information an die Komponenten, daß die Daten dieser Teilchenkollision akzeptiert wurden. Gleichzeitig empfängt der Second Level Trigger ein Signal, daß das Ereignis akzeptiert wurde. Anderenfalls werden die Daten dieses Ereignisses in der Pipeline überschrieben. Auch wenn innerhalb von 52 Zyklen ($52 \cdot 96 \text{ ns} \approx 5 \mu\text{s}$) keine Entscheidung vom GFLT vorliegt, werden die zum Ereignis gehörenden Daten aus der Pipeline gelöscht. Durch das Prinzip des Pipelinespeichers ist der FLT somit ein totzeitfreier Trigger.

Der Second Level Trigger

Die Frequenz der vom First Level Trigger akzeptierten Daten beträgt bis zu 600 Hz, somit hat der Second-Level-Trigger bereits wesentlich mehr Zeit (einige ms), um die ankommenden Daten zu analysieren. Zu diesem Zeitpunkt können bereits komplexe Korrelationen, wie z.B. Spurbestimmung geladener Partikel, Vertexbestimmung, Myon-, Jet- und Elektronenidentifikation an den Daten verschiedener Komponenten vorgenommen werden. Die Aufgabe des Global Second Level Trigger besteht darin, die von den lokalen Second Level Triggern vorgenommenen Korrelationen analog zum GFLT mit Hilfe einer Logik zu untersuchen und zu akzeptieren oder zu verwerfen. Mit Hilfe des GSLT wird die Frequenz der akzeptierten Ereignisse noch einmal um einen Faktor 7-10 reduziert, so daß jetzt noch ca. 80 Ereignisse/s akzeptiert werden. Die Aufgaben des GSLT sind analog zum GFLT, auf die technischen Einzelheiten des GSLT, sowie des Event-Builders und des Third-Level-Triggers kann an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden, siehe hierzu [ZEU93].

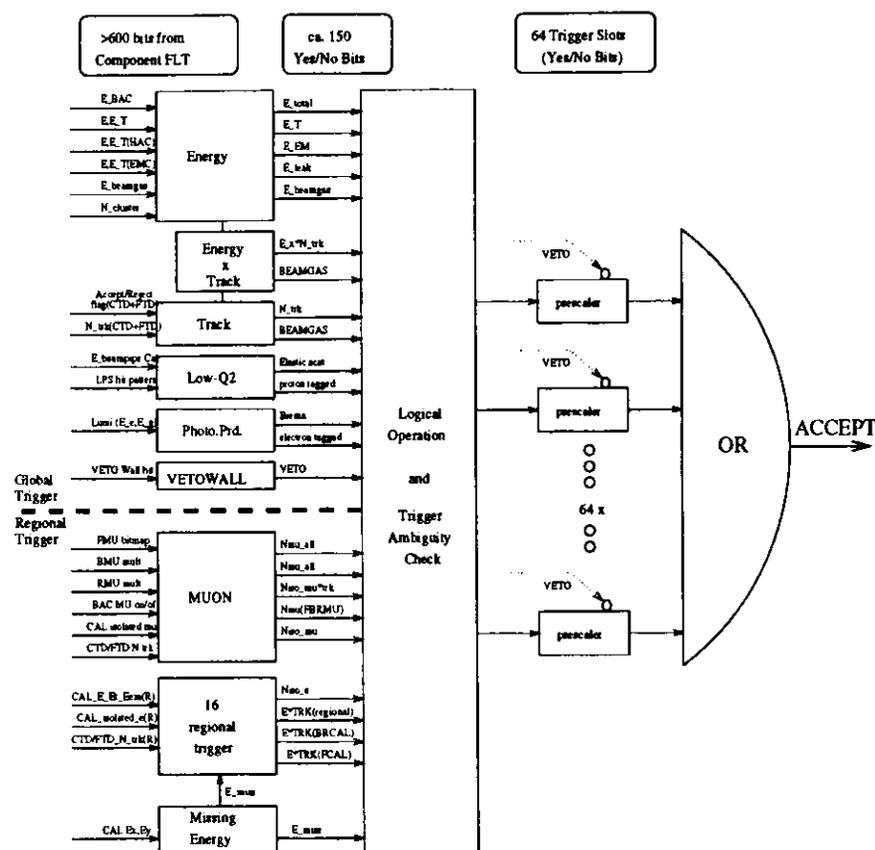


Abbildung 1.6: Schematischer Aufbau des Global First Level Triggers, adaptiert nach [ZEU93].

Der Event-Builder

Eine wichtige Komponente des DAQ-Systems des ZEUS-Experiments ist der sog. Event-Builder (EVB), welcher aus mehr als 30 Transputer-Knoten besteht und ein Beispiel für ein hochparalleles System ist. Der EVB ist als asynchrones, paralleles Echtzeit-Transputer-Netzwerk implementiert [BHV93]. Getriggert vom GFLT kombiniert und strukturiert der EVB die von den einzelnen Ausleseelektroniken kommenden Daten, die zu einem bestimmten Ereignis gehören, zu einem Datensatz, dem sog. Event, um diesen kompletten Datensatz dann an den Third Level Trigger (TLT) zu übergeben. Der TLT ist somit die erste Verarbeitungsstufe, die alle Informationen eines Ereignisses in einer Datenstruktur erhält, bisher wurden die Daten der einzelnen Komponenten unabhängig voneinander verarbeitet und nur in einem sehr eingeschränkten Umfang miteinander kombiniert.

Der Third Level Trigger

Der Third Level Trigger (TLT) reduziert die Rate der vom EVB kommenden Ereignisse von ca. 80 Hz auf wenige Ereignisse pro Sekunde. Die Hauptaufgabe des TLT besteht darin, Untergrundereignisse aus der Gesamtmenge der Daten zu eliminieren. Dies geschieht mit Hilfe der vollständigen geometrischen Rekonstruktion und Klassifikation der Ereignisse durch den TLT. Die Hardware des TLT besteht aus einer Gruppe von leistungsfähigen Rechnern, welche mehrere Ereignissen parallel verarbeiten und analysieren können. Die vom TLT akzeptierten Ereignisse werden für die spätere physikalische Analyse auf Magnetbändern gespeichert.

Das Run Control System

Das Kontrollsystem des ZEUS-Experiments, Run-Control (RC), ist verantwortlich für die globale Steuerung der Ausleseelektronik und des Triggersystems des ZEUS-Detektors. Das Run Control System ist dafür verantwortlich, daß alle Elektronikmodule, Trigger etc. über eine zentrale Steuerung in definierte Zustände gebracht und überwacht werden. Sämtliche Komponenten des Datenerfassungssystems sind über ein lokales Netzwerk (LAN³) mit einem zentralen Steuerrechner verbunden. Auf diesem zentralen Steuerrechner läuft ein Prozeß, genannt Run Control (RC), der die Steuerung des Experiments und der Datennahme übernimmt. Als ein Run wird hier der Zeitraum zwischen Start und Ende einer Datennahme bezeichnet. Dieses Run Control Programm erlaubt es, die Datennahme zu starten und zu beenden, zu pausieren oder abzubrechen und für einen Run die Runkonfiguration sowie die Triggerbedingungen festzulegen. In der Runkonfiguration ist festgehalten, welche Detektorkomponenten an der Datennahme beteiligt sind, da es aus technischen oder physikalischen Gründen möglich ist, daß einzelne Komponenten nicht teilnehmen. Unter der Triggerkonfiguration versteht man die Auswahl der verwendeten Triggeralgorithmen an die jeweils gewünschten Daten. So ist es z.B. möglich, mit Hilfe einer bestimmten Triggerkonfiguration gezielt Strahl-Restgas-Reaktionen aufzuzeichnen, die sonst vom Trigger verworfen werden. Es ist wichtig, die Triggerkonfiguration an die Strahlqualität anzupassen, denn bei einer hohen Luminosität wird die Anzahl akzeptierter Ereignisse ansteigen, was bei gleichbleibender Triggerkonfiguration z.B. dazu führen kann, daß die zulässige Aufzeichnungsrate des Massenspeichers überschritten wird. Die Steuerung des Experiments über das Run Control Programm ist über die folgenden Befehle möglich:

- **SETUP**
Es wird eine Überprüfung und Initialisierung der Ausleseelektronik und Komponenten-computer durchgeführt. Den Komponenten werden die Run- und Triggerkonfigurationen übermittelt.
- **ACTIVATE**
Alle Run Parameter und Detektor-Konfigurationen werden aufgezeichnet, die Trigger werden aktiviert und die Datennahme wird gestartet.
- **PAUSE**
Die Datennahme wird unterbrochen, alle Konfigurationen bleiben erhalten, minimale Änderungen der Run-Parameter dürfen jedoch vorgenommen werden.
- **RESUME**
Die Datennahme wird mit den vor der Pause aktiven Konfigurationen fortgesetzt.

³local area network

- **END**
Die Komponenten werden veranlaßt, eine sog. Run-Shutdown Prozedur zu durchlaufen, die Trigger werden deaktiviert und die Datenaufzeichnung wird beendet.
- **ABORT**
Die Datennahme wird abgebrochen, ohne den Run ordnungsgemäß zu beenden.

Mit diesen Befehlen wird das DAQ-System in folgende definierte Zustände gebracht:

- **IDLE**
Das Run Control System befindet sich in einem Zustand, wo eine Überprüfung und Initialisierung durchgeführt werden kann. Dieser Zustand wird nach dem Start des Run Control Systems, nach Beendigung eines Runs sowie nach Abbruch eines Runs eingenommen.
- **READY**
Die Konfigurations- und Kalibrationsprozeduren sind für alle am Run beteiligten Komponenten durchgeführt worden und alle Komponenten sind zum Start der Datennahme bereit. Eine Änderung der Hardwarekonfiguration ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich.
- **ACTIVE**
Alle Startprozeduren sind vollständig durchgeführt worden und die Datennahme ist gestartet worden. Eine Änderung von Run-Parametern ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich.
- **PAUSED**
Die Datennahme ist während des ACTIVE-Zustandes unterbrochen, die Trigger sind deaktiviert worden, in diesem Zustand ist eine geringfügige Modifikation der Systemparameter erlaubt.

Die hier beschriebenen Zustände und erlaubten Zustandsübergänge sind in Abb. 1.7 als Zustandsübergangsdiagramm dargestellt.

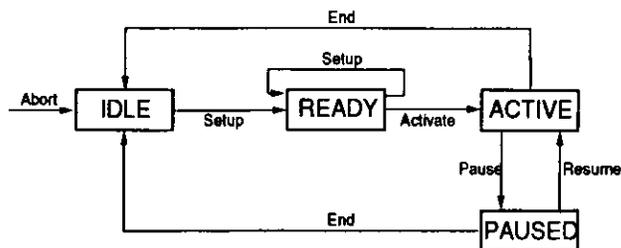


Abbildung 1.7: Die möglichen Systemzustände des Run Control Systems sowie die erlaubten Zustandsübergänge (nach [Mil95]). Eine ausführliche Beschreibung von Zustandsübergangsdiagrammen findet man in Kap. 2.4.2.

Kapitel 2

Wissensrepräsentation und regelbasierte Expertensysteme

Zur Unterstützung der Bedienermannschaft bei der Überwachung der Datenerfassung sowie Lokalisierung und Behebung der auftretenden Fehler wird seit 1992 ein Echtzeitexpertensystem eingesetzt [BHSV92, BFH92, Ohr93, BFHO94, BFJ+96]. Dieses Kapitel erläutert Grundlagen über den Aufbau von Expertensystemen und bietet ein Fundament für deren Entwurf.

Ein großer Vorteil eines Expertensystems liegt in der ständigen Verfügbarkeit des abgespeicherten Wissens. Da menschliche Experten meist nur eine kurze Zeit an einem Projekt beschäftigt sind und somit auf das Wissen des Einzelnen nicht jederzeit zugegriffen werden kann, ist ein Expertensystem ein guter Ansatz um Informationen permanent und zentral zur Verfügung zu stellen.

2.1 Wissensrepräsentation

Aus dem Wunsch, einen Computer mit 'Wissen' und 'Intelligenz' auszustatten, ist ein eigenständiger Zweig der Informatik entstanden, der Bereich der künstliche Intelligenz (KI). Erforderlich für die Ausstattung mit Wissen ist eine Methode zur geeigneten Repräsentation dieses Wissens. Die Informatik hat hierfür unterschiedliche Ansätze entwickelt, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

- **Heuristik**

Bei dieser Methode wird das verfügbare Wissen in Form von Entscheidungsbäumen dargestellt. Mit Hilfe von Suchalgorithmen wird der günstigste Weg innerhalb eines Baumes bestimmt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß praktisch jede Information in einen Baum umgesetzt werden kann. Nachteilig an dieser Methode ist, daß die Bäume sehr schnell einen hohen Speicherbedarf haben oder bei temporärer Erzeugung viel Rechenleistung benötigen, so daß in der Praxis schnell Grenzen erreicht werden.

- **Logik**

Dieser Ansatz beruht darauf, verfügbares Wissen mittels logischer Verknüpfungen darzustellen und aus diesem Wissen Schluffolgerungen zu ziehen. Diese Methode eignet sich besonders für die Überprüfung mathematischer Aussagen und logischer Ausdrücke. Die für diese Methode benötigten Programmiersprachen sind jedoch sehr schwierig zu handhaben (z.B. PROLOG).

- **Semantische Netzwerke**

Diese Methode repräsentiert das Wissen in Form von Objekten, die durch ihre Beziehungen zueinander in einem Netz dargestellt werden. Die Objekte werden entsprechend ihres Abstraktionsgrades in Klassen angeordnet. Als Beispiel sei hier eine Klasse Vogel mit Unterklassen Rotkehlchen, Blaumeise, etc. genannt, welche als Relationen 'ist ein' haben, also z.B. Rotkehlchen ist ein Vogel.

- **Symbolische Darstellung**

Hier wird das gesamte Wissen symbolisch dargestellt, was bedeutet, daß es keine Trennung von Programmen und Daten gibt. Der Programmablauf erfordert dann lediglich Manipulationen und Ersetzungen von Symbolen. Nachteilig ist die schwere Handhabung der hierfür benötigten Programmiersprachen (z.B. LISP).

- **Regelbasierte Darstellung**

Die Implementierung des Wissens erfolgt hier mit Regeln der Form *if...then...*. Die Repräsentation des Wissens ist der menschlichen Artikulation sehr ähnlich. Die in dieser Form erstellten Programme lassen sich sehr leicht durch Einfügen weiterer Regeln erweitern.

- **Neuronale Netzwerke**

Mit neuronalen Netzwerken wird versucht, die Funktionsweise von biologischen Nervenzellen und deren Zusammenwirken zu simulieren. Jedes Neuron verfügt über Verbindungen zu Nachbarzellen, wobei die 'Wichtigkeit' der einzelnen Verbindungen bewertet wird. Diese Faktoren können dynamisch verändert werden, um somit auf veränderte Vorgaben reagieren zu können.

- **Mustererkennung**

Hier wird Wissen in Form bekannter Muster gespeichert, z.B. Vektoren in einem Konfigurationsraum. Es wird dann versucht, unbekannte Muster mit mathematischen Methoden (z.B. Vektorabstände, Statistik, Näherungsverfahren) zu erkennen. Der Vorteil dieser Methode ist, daß die zu Grunde liegenden Verfahren mathematisch einfach zu behandeln sind, eine Implementation ist in Programmiersprachen wie z.B. C ohne Probleme möglich. Der Nachteil liegt in der sehr eingeschränkten Verwendbarkeit dieses Verfahrens.

Einen Zweig der KI bilden die Expertensysteme, deren Ziel die Sammlung und Simulation menschlichen Wissens ist. Sie besitzen eine Wissensbasis und einen Schlußfolgerungsmechanismus. In Expertensystemen kommen insbesondere die Verfahren der Entscheidungsbaume und regelbasierten Systeme zur Anwendung. Expertensysteme können nach der Repräsentation des gesammelten Wissens oder nach der Strategie der Entscheidungsfindung unterschieden werden. Die verschiedenen Methoden der Wissensspeicherung wurden bereits kurz beschrieben.

Der Prozeß der Entscheidungsfindung kann *deduktiv*, *abduktiv* oder *induktiv* erfolgen. Sei die Abbildung $(\forall x)[F(x) \rightarrow G(x)]$ gegeben. Aus der Beobachtung von $F(A)$ kann nun *deduktiv* und logisch korrekt $G(A)$ bestimmt werden. *Abduktiv* bedeutet, daß mit Hilfe von $(\forall x)[F(x) \rightarrow G(x)]$ aus der Beobachtung von $G(A)$ eine logisch nicht eindeutige, jedoch mögliche Bestimmung von $F(A)$ erfolgt. Logisch nicht exakt, aber in der Praxis bewährt und unverzichtbar ist auch der *induktive* Weg, aus einigen Beispielen $F(A) \rightarrow G(A)$, $F(B) \rightarrow G(B)$ etc. die Verallgemeinerung $(\forall x)[F(x) \rightarrow G(x)]$ zu bestimmen.

2.2 Komponenten eines regelbasierten Expertensystems

Ein Expertensystem ist ein Programmsystem, das 'Wissen' über ein bestimmtes Gebiet sammelt und speichert, aus diesem Wissen Schlußfolgerungen zieht und zu konkreten Problemen des Gebietes Lösungen anbietet. Ein Expertensystem ist in der Lage:

- große Mengen Wissen in problembezogener Weise zu repräsentieren.
- aus dem vorhandenen Wissen Schlußfolgerungen zu ziehen und neues Wissen zu gewinnen.
- zu konkret auftretenden Problemen Lösungen auf der Basis des vorhandenen Wissens zu finden und den Lösungsweg zu erläutern.

In Abb. 2.1 ist ein Beispiel für die Architektur eines Expertensystems dargestellt.

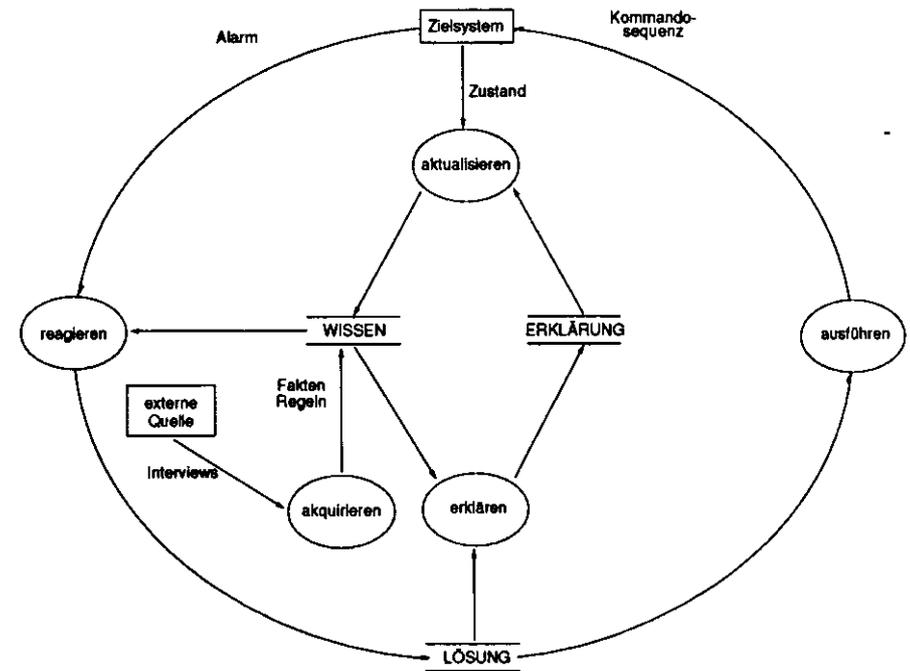


Abbildung 2.1: Architektur eines Expertensystems. Die Ellipsen zeigen die Prozesse, die in einem Expertensystem ablaufen. Doppelbalken symbolisieren gespeicherte Daten (Resultate). Kästen zeigen äußere Anbindungen. Pfeile definieren den Datenfluß zwischen Prozessen und Systemen.

Das Wissen wird aus externen Quellen akquiriert, dies können z.B. Interviews mit menschliche Experten oder Literatur sein. Wenn nun das zu überwachende System (Zielsystem), z.B. eine Detektor Komponente, einen Alarm an das Expertensystem sendet, so wird dieses gemäß

des vorhandenen Wissens reagieren und eine Lösung erarbeiten, welche dann ausgeführt wird, um das Zielsystem wieder in einen regulären Zustand zu überführen. Das hierfür benutzte Wissen dient als Erklärung für die Lösungsfindung, z.B. eine Auflistung aller erfüllten Regeln. Hiermit kann die Wissensbasis aktualisiert werden. Bei strenger Anwendung des Begriffes Expertensystem wird die Aktualisierung vom Expertensystem selbst vorgenommen. Dies läßt auch die Kontrolle des Zielsystems durch das Expertensystem zu, was eine schnelle und zuverlässige Reaktion bedeutet. Wenn das Expertensystem dem menschlichen Bediener des Zielsystems nur Handlungsvorschläge macht, kann der Mensch diese Vorschläge beurteilen und intuitiv anders handeln. Die Reaktion dauert jedoch länger und kann eventuell auch falsche Handlungen nach sich ziehen.

Da das ZEUS-Expertensystem ZEX ein regelbasierte Architektur hat, wird im folgenden nur die Beschreibung regelbasierter Systeme erfolgen, eine Einführung in andere Ansätze findet man z.B. in [Jac90]. Ein regelbasiertes Expertensystem wird nun in folgende Komponenten aufgeteilt [Win92]:

- **Wissensbasis (Knowledge Base)**

Die Wissensbasis ist eine Kombination von faktischem und ausführbarem Wissen. Die Objekte des faktischen Wissens in Form einer Datenstruktur sind z.B. Input/Output-Daten oder aktuelle Werte von Betriebsparametern.

Das ausführbare Wissen wird durch eine Menge von Regeln repräsentiert, mit der das Entscheidungsmodul auf dem faktischen Wissen operiert. Eine Regel wird in der Form *if* <Antezedenz> *then* <Konsequenz> dargestellt. Dabei prüft die Antezedenz das Vorhandensein von Fakten, die Konsequenz beschreibt die entsprechende Reaktion.

- **Entscheidungsmodul (Inference Engine)**

Das Entscheidungsmodul operiert mit dem ausführbaren Wissen der Wissensbasis auf dem faktischen Wissen (Abb. 2.2), um sämtliche erfüllten Regeln zu ermitteln:

1. Zunächst werden sämtliche Regeln ermittelt, die aufgrund der Fakten ausgeführt werden könnten.
2. Durch verschiedene Mechanismen, z.B. Setzen verschiedener Prioritäten oder kontextabhängige Ausführung wird ein Konfliktmanagement bei mehreren erfüllten Regeln vorgenommen.
3. Mit Hilfe der Resultate des Konfliktmanagements werden die zur Ausführung kommenden Regeln in eine Ausführungsreihenfolge gebracht.
4. Diese Regeln werden nun ausgeführt.

Eine Regel der Form *if* . . . *then* . . . kann in zwei Richtungen ausgewertet werden. Im Falle von 'forward chaining' werden die Antezedenzen mit den Fakten verglichen, um alle Regeln zu ermitteln, die erfüllt sind, dies ist die deduktive Entscheidungsfindung. Beim Prozess des 'backward chaining' werden alle Regeln ausgeführt, deren Konsequenzen mit einem gewünschten Ergebnis übereinstimmen, dies entspricht dem abduktiven Prozeß der Entscheidungsfindung.

- **Erklärungsmodul (Explanation Component)**

Aufgabe der Erklärungskomponente ist es, die von dem Entscheidungsmodul getroffenen Entscheidungen dem Benutzer durch eine geeignete Dokumentation transparent zu machen, z.B. durch eine Auflistung aller Regeln, die zur Lösung beigetragen haben.

- **Benutzer-Oberfläche**

Die Aufgabe der Benutzeroberfläche ist es, mit Hilfe geeigneter grafischer Aufbereitungen Schlußfolgerungen und Ergebnisse des Wissensmoduls in einer Weise darzustellen, daß die wesentlichen Informationen vom Benutzer schnell erfaßt werden können. Mit Hilfe der Benutzeroberfläche ist es für den Bediener auch möglich, auf diese Informationen zu reagieren und innerhalb dieser Oberfläche neue Informationen an das Expertensystem oder die zu überwachenden Prozesse zu übermitteln.

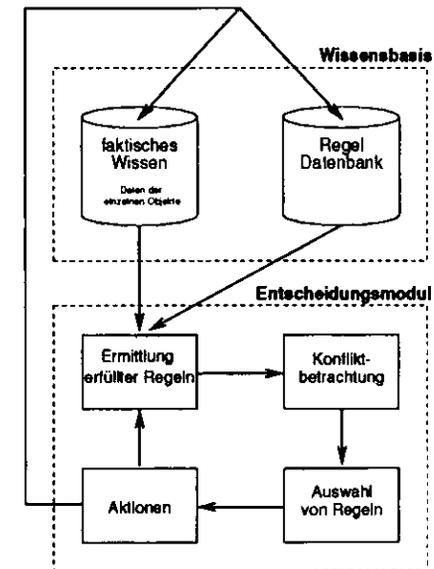


Abbildung 2.2: Modell eines regelbasierten Systems (Erläuterungen im Text).

2.3 ZEX – Ein Expertensystem bei ZEUS

Der ZEUS-Detektor wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Datennahme- und Kontrollsysteme gesteuert und überwacht. Dieses Online-System enthält u.a. die Datennahmesysteme, wie z.B. die Ausleseelektroniken und Triggersysteme sowie das Slow-Control-System, welches die Kontrolle der Betriebsparameter der einzelnen Elektronik- und Detektorkomponenten übernimmt. Auch Systeme wie z.B. Rauchmelder, die nicht direkt einer Komponente zugeordnet werden können, werden im Slow-Control-System zusammengefaßt. Um die Effizienz und die Betriebssicherheit des ZEUS Online-Systems auf einem möglichst hohen Niveau zu halten, wurde 1992 mit der Entwicklung eines Expertensystems zur Unterstützung der Operateure begonnen. Aufgrund der Vielzahl von Daten ist es für einen menschlichen Bediener nicht immer einfach Abweichungen einzelner Betriebsparameter rechtzeitig zu erkennen und korrekt zu interpretieren. Ein Expertensystem ist dagegen in der Lage, komplexe Veränderungen auszuwerten und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen, um wieder einen normalen Betriebsstatus

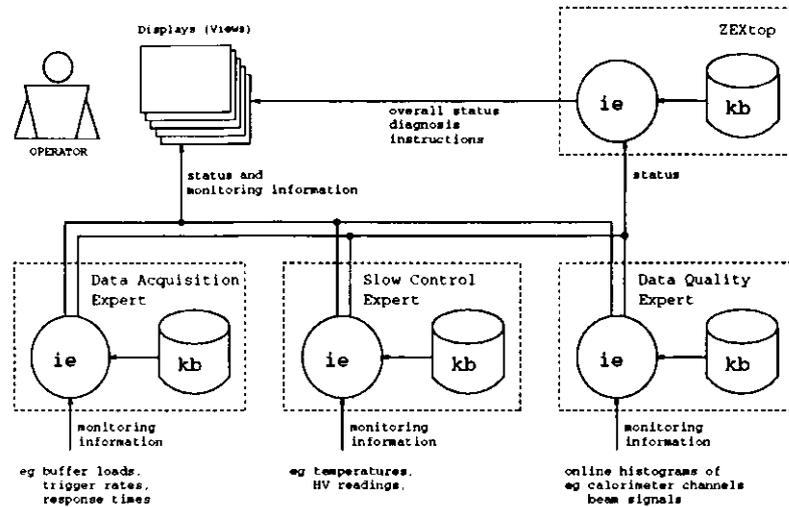


Abbildung 2.3: Architektur des ZEUS-Expertensystems ZEX (ie: inference engine, kb: knowledge base), aus [BFJ+96].

herzustellen.

Nach verschiedenen Studien und einem Prototypen [Ohr93], der in der Programmiersprache C mit Hilfe von Automaten und Mustererkennungsalgorithmen implementiert wurde, wurde die weitere Entwicklung mit Hilfe der kommerziellen Expertensystem-Entwicklungsumgebung RTworks [Tal95] fortgeführt. Abbildung 2.3 zeigt die Architektur von ZEX. Drei Module des Expertensystems bearbeiten verschiedene Bereiche des Online-Systems, die Ausgaben dieser Sub-Expertensysteme werden von einem Top-Level-Modul analysiert, um globale Informationen des Online-Systems zu erhalten:

- Slow-Control-Modul

Das Slow-Control-Sub-Expertensystem ist für die Überwachung der langsam veränderlichen Betriebsparameter des Slow-Control-Systems zuständig. Dies sind z.B. die Betriebsdaten der Stromversorgungen der Racks, Crates, Photomultiplier, Temperatur- und Strahlungssensoren, Kühlung und vieles mehr. Die Implementierung der Slow-Control-Überwachung war eine der ersten großen Entwicklungen mit ZEX und ist zu diesem Zeitpunkt praktisch abgeschlossen.

- Data-Quality-Modul

Das Data-Quality-Sub-Expertensystem überwacht die Qualität der vom ZEUS-Detektor aufgenommenen Daten. Es ist hiermit möglich, z.B. die Daten der einzelnen Komponenten auf ungünstige Kalibrierung zu untersuchen oder Aussagen über die Strahlqualität zu machen. Zur Zeit werden mit ZEX die Histogramme der zentralen Detektorkomponenten untersucht. Es wird z.B. geprüft, ob die Histogramme korrekt und vollständig mit Daten gefüllt sind.

- Data-Acquisition-Modul

Mit Hilfe des Data-Acquisition-Sub-Expertensystems wird die Datennahme überwacht. Es überwacht den Datenfluß von den Komponenten durch das Triggersystem etc. Hier ist bereits die Überwachung der Pufferauslastungen und Eingangsraten des Event-Builders implementiert worden, im Rahmen dieser Arbeit wird dieses Modul um die Funktionalität der Überwachung und Beurteilung der Datennahme des First Level Triggers erweitert.

ZEX kann Informationen dieser einzelnen Sub-Expertensysteme kombinieren und hieraus Informationen auswählen, um sie dem Bediener anzuzeigen. Die einzelnen Module kommunizieren über eine 'blackboard' [Fla94] genannte globale Datenstruktur (Abb. 2.4). Das Wissen der einzelnen Bereiche ist in Wissensquellen gespeichert, die unabhängig voneinander sind. Das Ziel jedes Modules ist es, aus den Wissensquellen die Informationen, welche zur Problemlösung nötig sind, zu extrahieren und zu verteilen. Wenn nun eine Wissensquelle etwas interessantes gefunden hat, so benachrichtigt sie das Kontrollmodul, das dann diese Informationen an die anderen Wissensquellen weiterleitet. Diese Wissensquellen versuchen wiederum, mit dieser Eingabe neue Informationen zu gewinnen. Der Großteil des Wissens ist bei ZEX regelbasiert gespeichert, einige Fälle der DAQ werden mit Hilfe von Automaten behandelt.

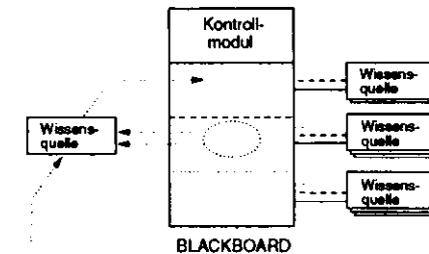


Abbildung 2.4: Schema der Blackboard-Architektur (Erläuterungen im Text).

2.4 Entwurfsmethodik

Der Entwicklung von Software kann mit Hilfe von formalen Entwurfsmethoden geschehen, mit Hilfe von Modellen kann das Verhalten von Software vor der eigentlichen Programmierarbeit entworfen und spezifiziert werden. Für die angefertigte Software existiert hiermit ein Satz von Dokumentationen, so daß Fehlersuche, Wartung und Erweiterung auch von nachfolgenden Entwicklern fortgeführt werden können.

Im Bereich der prozeduralen Programmiersprachen gibt es zum Beispiel die bewährte Methode der Flußdiagramme, welche den Programmfluß dokumentieren. Die regelbasierten Programmiersprachen können durch endliche Automaten modelliert werden.

2.4.1 Endliche Automaten und regelbasierte Expertensysteme

Ein endlicher Automat ist ein mathematisches Modell eines Systems, welches auf Eingaben reagiert, seinen Zustand ändert und eine Ausgabe machen kann. Der Zustand des Systems ist die Sammlung aller Informationen, die sich aus den bisherigen Eingaben ergeben haben.

Sie beschreiben den momentanen Zustand des Systems und werden benötigt, um die Reaktion des Systems auf noch folgende Eingaben zu bestimmen. Ein endlicher Automat besteht aus einer endlichen Menge von Zuständen und einer Menge von Transitionen (Übergänge), die auf eine definierte Eingabe das System aus einem bestimmten Zustand in einen Folgezustand überführen. Für jeden Zustand existiert eine Menge möglicher Eingaben. Für jede mögliche Eingabe existiert genau ein Zustandsübergang. Besonders ausgezeichnet ist der Startzustand, und eventuell einige Zustände, in denen der Automat endet.

Ein endlicher Automat kann durch einen gerichteten Graphen visualisiert werden. Die Knoten im Graphen entsprechen den Zuständen des Automaten. Ist ein Pfeil vom Zustand p in den Zustand q mit der Eingabe a markiert, so bedeutet dies, daß der endliche Automat im Zustand p bei Eingabe von a diese akzeptiert und in den Zustand q übergeht. Formal wird ein endlicher Automat definiert als ein Quintupel $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit:

- Q : endliche Menge aller Zustände
 - Σ : Menge aller Eingaben, die das System verarbeiten kann (Eingabealphabet)
 - $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$: Menge aller möglichen Zustandsübergänge
 - $q_0 \in Q$: Startzustand, den das System bei Inbetriebnahme einnimmt
 - $F \subseteq Q$: Menge von Zuständen, in denen das System terminieren kann
- In dem in Abb. 2.5 dargestellten Automaten ist:

$$\begin{aligned} Q &= \{p, q\} \\ \Sigma &= \{a\} \\ \delta &: Q \times \Sigma \rightarrow Q = \{(p, a) \rightarrow q\} \\ q_0 &\in Q = p \\ F &\subseteq Q = q \end{aligned}$$

Wenn es möglich ist, daß der endliche Automat bei Eingabe einer Folge von Symbolen des Ein-

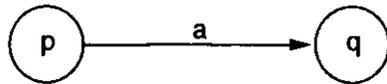


Abbildung 2.5: Darstellung eines endlichen Automaten mit Hilfe von Graphen (Erläuterungen im Text).

gabealphabets in einen Endzustand übergeht, so hat der Automat die Eingabefolge akzeptiert. Wenn der Automat keinen Endzustand erreicht, so sagt man, er hat die Folge nicht akzeptiert. Dieser Automat hat als einzige Möglichkeit der Reaktion auf die Eingabefolge also die binäre Ausgabe *akzeptiere/akzeptiere nicht*.

Als Beispiel soll hier ein Automat beschrieben werden, welcher binäre Zahlen akzeptiert, die mit einer "1" beginnen. Das den Automaten in Abb. 2.6 beschreibende Quintupel M lautet:

$$\begin{aligned} Q &= \{Z_1, Z_2\} \\ \Sigma &= \{ "0", "1" \} \\ \delta &: Q \times \Sigma \rightarrow Q = \{(Z_1, "1") \rightarrow Z_2, (Z_2, "0") \rightarrow Z_2, (Z_2, "1") \rightarrow Z_2\} =: \{\delta_1, \delta_2, \delta_3\} \\ q_0 &\in Q = Z_1 \\ F &\subseteq Q = Z_2 \end{aligned}$$

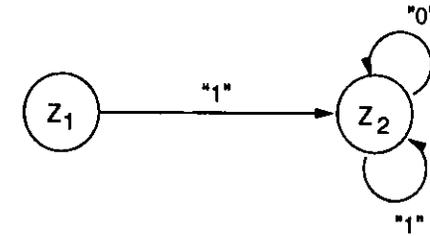


Abbildung 2.6: Darstellung eines endlichen Automaten, der binäre Zahlen akzeptiert, die mit "1" beginnen. Das System befindet sich zu Beginn im Zustand Z_1 .

M kann benutzt werden, um für eine Zeichenkette Z zu prüfen, ob sie eine Binärzahl ist, die mit "1" beginnt. Beispiel "1011" wird durch $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_3)$ akzeptiert und M ist in einem Endzustand. "1211" kann bei Auftreten der "2" nicht weiter akzeptiert werden, da es für die Eingabe "2" keinen Zustand gibt, welcher einen passenden Zustandsübergang erlaubt. Die transitive Hülle \mathcal{L} ist die Menge der von M akzeptierbaren Eingaben. In diesem Beispiel ist $\mathcal{L}(M) = \{ "1", "10", "11", \dots \}$.

Im Bereich der Expertensysteme lassen sich folgende Bezüge herstellen. Q ist die Lösungsmenge (Benennung: $Z_1 =$ "bereit", $Z_2 =$ "ja"). Die transitive Hülle \mathcal{L} ist die Menge aller Probleme, die von einem Expertensystem gelöst werden können. δ ist der Regelsatz:

$$\text{if } [(Z_1) \text{ and } "1"] \text{ then } [Z_2]$$

Der Satz der Regeln ist ungeordnet. Die Folge der angewandten Regeln $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_3)$ ist die Erklärung bzw. der Beweis der Lösungen.

Es gibt in der Automatentheorie auch Ansätze für Automaten, die komplexere Ausgaben während der Ausführung einer Eingabefolge machen können: *Moore-Maschinen* können eine Ausgabe mit einem Zustand assoziieren, *Mealy-Maschinen* können während einer Transition eine Ausgabe vornehmen. Es kann nun gezeigt werden, daß die Modelle der Mealy- und Moore-Maschinen äquivalent sind. Dies bedeutet, daß eine Ausgabe während eines Zustandsübergangs gleichwertig ist zu einer Ausgabe im durch den Übergang erreichten Zustand. Eine detaillierte Abhandlung findet man z.B. in [HU90].

2.4.2 Hareldiagramme und objektorientierter Ansatz

Für die Entwicklung von Modulen für das Expertensystem wurde ein objektorientierter Ansatz [Boo94] gewählt. Hierbei wird zunächst eine Klassifikation der beteiligten Objekte vorgenommen. Objekte können Dinge der realen Welt oder abstrakte Dinge sein, z.B. Kollimatorbacken, Kalorimetertürme, Histogramme. Eine Klasse faßt die gemeinsamen Strukturen und Verhaltensweisen einer Menge von Objekten zusammen. Verschiedene Objekte kommunizieren durch den Austausch von Botschaften. Der Zugriff auf diese Objekte wird in den Methoden (Funktionen) der Klasse beschrieben. Das Verhalten eines Objektes kann mit Automaten beschrieben werden. Eine Darstellung des Verhaltens von Objekten, der Objektlebenszyklus, ist mit Hilfe der Harel-Diagramme möglich.

Ein Hareldiagramm [Har88, RAT95, Bal93] ist eine Visualisierung eines endlichen Automa-

ten mit geschachtelten Zuständen. Dieses Konzept erlaubt eine Beschreibung komplexer dynamischer Systeme ohne die "Explosion" der Statusdiagramme, wie sie bei flachen Modellen durch die Vielzahl möglicher Kombinationen von Zuständen und Übergängen auftritt. Sogenannte Subzustände, welche in einem Zustand enthalten sind, erweitern diesen Zustand um Informationen auf einer niedrigeren Beschreibungsebene. Je mehr Schachtelungen bei der Betrachtung eines Zustandes berücksichtigt werden, desto mehr Detailinformationen werden sichtbar. Die geschachtelten Zustände werden als Subzustände bezeichnet. Jeder Subzustand trägt die gleichen Attribute wie sein Superzustand, er wird durch dieselben Ereignisse erreicht und erbt die Eigenschaften seines übergeordneten Superzustandes.

Ein Zustandsübergang kann mit einer Aktion verknüpft sein, die beim Übergang ausgeführt wird, z.B. das Zurücksetzen von Variablen oder die Aussendung von Botschaften an andere Objekte. Ein bedingter Zustandsübergang liegt genau dann vor, wenn ein Ereignis eintritt und dieses Ereignis die Bedingung des Überganges erfüllt. Man kann dies auch so formulieren:

IF Ereignis tritt ein **UND** Bedingung erfüllt **THEN** Zustandsübergang

An dieser Formulierung sieht man, daß ein Zustandsübergang die gleiche Form besitzt wie eine Regel in einer regelbasierten Sprache.

Eine Entwicklung von Modulen für regelbasierte Expertensysteme mit Hilfe von Harel-Diagrammen erlaubt eine einfache Umsetzung der graphischen Modellierung in Regeln. Es läßt sich leicht jeder Zustandsübergang in genau einer Regel formulieren. Abbildung 2.7 illustriert die Modellierung anhand eines einfachen Beispiels. Die Zustandsübergänge sind mit den fol-

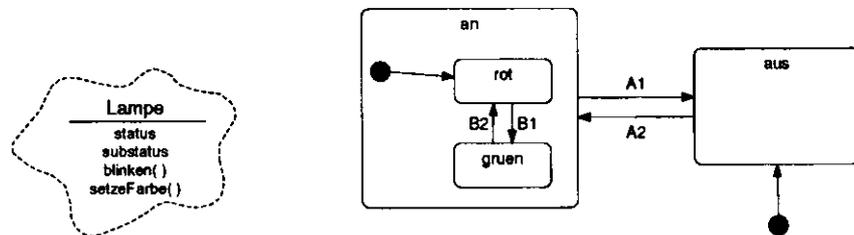


Abbildung 2.7: Links: Darstellung einer Klasse 'Lampe' mit ihren Eigenschaften 'status' und 'substatus' sowie den Methoden (Funktionen) 'blinken()' und 'setzeFarbe()'. Rechts: Das Harel-Diagramm zeigt die möglichen Zustände der Objekte der Klasse 'Lampe' (Erläuterungen im Text). Die schwarzen Kreise symbolisieren den Startpunkt bei Initialisierung oder Eintritt in einen Zustand.

genden Bedingungen verknüpft:

A1 = keine Messung = \neg A2
 A2 = Messung = \neg A1
 B1 = Temperatur < T_{crit}
 B2 = Temperatur $\geq T_{crit}$

Für diese Bedingungen werden die folgenden Regeln formuliert:

A1: IF (status = an AND keine Messung)
 THEN status := aus

A2: IF (status = aus AND Messung)
 THEN status := an
 substatus := rot

B2: IF (status = an AND $T \geq T_{crit}$ AND substatus = gruen)
 THEN setzeFarbe(rot)
 substatus := rot

B1: IF (status = an AND $T < T_{crit}$ AND substatus = rot)
 THEN setzeFarbe(gruen)
 substatus := gruen

Kapitel 3

Beispiel regelbasierter Programmierung: Die Kollimatorüberwachung

Zur Zusammenführung sowie zur Trennung der Elektron- und Protonstrahlen befinden sich auf beiden Seiten des ZEUS-Detektors aufwendige magnetische Ablensysteme. Der Elektronstrahl innerhalb dieser magnetischen Strukturen ist eine Quelle für starke Synchrotronstrahlung. Ein Eindringen dieser Strahlung in den Detektor ist nach Möglichkeit zu vermeiden, wofür ein System von Kollimatoren und Absorbern zur Verfügung steht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Überwachungsmodul für diese Kollimatoren entwickelt und in das Expertensystem ZEX integriert. Dieses Modul stellt eine grafische Darstellung der Elektronenkollimatoren zur Verfügung, mit Hilfe einer farbigen Darstellung wird der momentane Status der einzelnen Kollimatorbacken visualisiert. In diesem Kapitel wird das Verfahren der objektorientierten Modellierung von regelbasierten Systemen mit Harel-Diagrammen an der Überwachung der Kollimatoren demonstriert.

3.1 Die Elektronenkollimatoren

Eine sorgfältige Abschirmung des Beam-Pipe-Kalorimeters (BPC) sowie der zentralen Spurräume gegen die eindringende Synchrotronstrahlung ist notwendig, um eine Schädigung der Detektorkomponenten zu vermeiden. Die hierzu zur Verfügung stehenden Kollimatoren und Absorber werden in Tabelle 3.1 mit ihren Parametern beschrieben, Abb. 3.1 zeigt schematisch die Anordnung der verschiedenen Absorber und Kollimatoren. Die Kollimatoren C_1 , C_2 und C_3 reduzieren den Öffnungswinkel des Kegels der einfallenden Synchrotronstrahlung soweit, daß der verbleibende Strahlungskegel keine Detektorkomponenten überstreift. Auf der anderen Seite des Wechselwirkungspunktes wird die restliche Strahlung dann von den Absorbern A_1 und A_2 absorbiert. Am Rand des Kollimators C_3 entsteht starke Streustrahlung, welche von C_4 wieder absorbiert wird. Strahlung, die von den Absorbern A_1 und A_2 zurückgestreut wird, kann durch C_4 direkt in den Detektor reflektiert werden, was eine der wesentlichen Quellen für Hintergrundstrahlung ist (s. Kap. 4.1.2). Der Kollimator C_5 schützt den zentralen Teil des Detektors vor der Strahlung, die von A_1 und A_2 reflektiert wurde. Zur Absorption dieser reflektierten Strahlung haben die Kollimatoren C_4 und C_5 horizontale und vertikale Backen, während die übrigen Kollimatoren nur horizontale Backen haben.

Die Steuerung der Kollimatoren erfolgt vom HERA-Kontrollraum aus. Eine mechanische

Kollimator (C) oder Absorber (A)	z-Position entlang Strahlrohr [m]	geschlossene/offene Position der Koll.backe vom Strahl [mm]	
		horizontal	vertikal
C ₁	11.95	1.09/25.0	—
C ₂	8.07	5.0/24.0	—
C ₃ aussen	5.3	3.46/9.80	3.46/9.80
C ₃ innen		8.0/11.40	8.0/11.40
C ₄ aussen	2.3	33.38/40.00	30 fest
C ₄ innen		13.14/29.67	30 fest
C ₅ aussen	-3.2	55 fest	20 fest
C ₅ innen		20 fest	20 fest
A ₁	-23.5	—	—
A ₂	-23.5	—	—

Tabelle 3.1: Parameter der Elektronkollimatoren und Absorber [Sch96].

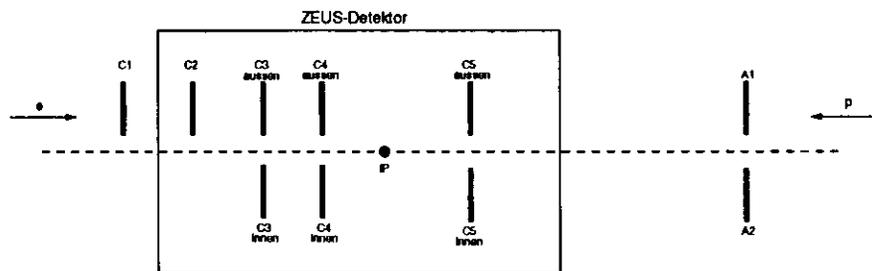


Abbildung 3.1: Schematische Anordnung der Kollimatoren und Absorber (Aufsicht, nicht maßstabsgetreu, IP: Wechselwirkungspunkt).

Sperre sorgt dafür, daß C₄ und C₅ niemals direkt in den Strahl gefahren werden können. Die Positionen von C₁, C₂ und C₃ müssen sorgfältig überwacht werden.

Während der Beschleunigung der Elektronen ist es notwendig, daß die von den Kollimatoren gebildete Öffnung verkleinert wird, da mit wachsender Energie die Leistung der Synchrotronstrahlung stark zunimmt. Im Luminositätsbetrieb kann es in den Spurkammern zu Spannungseinbrüchen aufgrund starker Ionisation des Spurkammergases kommen.

3.2 Entwurf und Implementation von ZEX-COLLIMATOR

Zur Modellierung der Kollimatorüberwachung wurde die im vorigen Kapitel beschriebene Methode der Zustandsübergangs- oder Harel-Diagramme gewählt. Zunächst wurden mit einem objektorientierten Ansatz die verschiedenen für die Systemüberwachung relevanten Systemkomponenten klassifiziert (Abb. 3.2). Die Klasse `collimator` repräsentiert die Kollimatorbacken, d.h. sie beschreibt deren momentane Position und Bewegung. Die Klasse `lamp` beschreibt die Positionen und Bewegungszustände der Kollimatorbacken auf dem Bildschirm des Experten-

systems. Die Klasse `beam` bestimmt die möglichen Zustände des Elektronenstrahls in HERA, da eine Beurteilung der Kollimatorposition nur stattfindet, wenn die Elektronen beschleunigt werden oder der Elektronenstrahl mit hoher Energie umläuft.

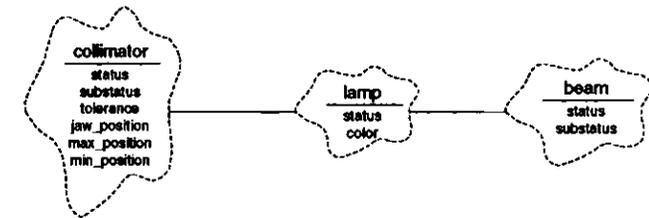


Abbildung 3.2: Das Klassendiagramm zur Überwachung eines Kollimators, Notation nach [Boo94]. Die Klassen sind durch Aggregation miteinander verknüpft, d.h. sie sind gegenseitig bekannt und können sich Botschaften senden. Dargestellt sind die Klassennamen und die Attribute. Als Methoden werden nur die Standardfunktionen `get()` und `set()` zum Senden bzw. Empfangen von Botschaften benutzt (hier nicht dargestellt).

In ZEX wurde eine Positions- und Bewegungsüberwachung der Elektronenkollimatoren C₁ bis C₄ entwickelt, welche sich alle in Protonenstrahlrichtung hinter dem Wechselwirkungspunkt befinden. Exemplarisch erfolgt hier die Beschreibung einiger Zustände und Zustandsübergänge im Harel-Diagramm der Klasse `collimator` (Abb. 3.3). Nach Initialisierung befindet sich das System im Zustand `stopped`. Innerhalb des Zustandes `stopped` befindet man sich zu Beginn an dem schwarzen Kreis, dem Anfangszustand. Innerhalb des `stopped`-Zustandes ist es durch äußere Ereignisse möglich, in verschiedene Subzustände zu wechseln, die die Position des Kollimators beschreiben. Das oben erwähnte Ereignis tritt immer dann ein, wenn neue Positionsangaben der Kollimatoren an das Expertensystem gesendet werden, da mit dieser Information die Bedingungen erneut überprüft werden.

Es ergeben sich für stillstehende Kollimatoren die in Tab. 3.2 dargestellten Zustände. Aus allen Unterzuständen `open`, `close`, `shut` und `intermediate` wird bei Eintreffen des Ereignisses $dx \neq 0$ (dx : Änderung der Kollimatorposition pro Zeiteinheit) ein Übergang in den Zustand `moving` ausgeführt, wo dann wieder am Startpunkt innerhalb dieses Zustandes fortgefahren wird. Wenn sich die Kollimatorposition innerhalb einer Zeiteinheit um einen Wert dx ändert, so wird anhand der zwei Bedingungen $dx < 0$ und $dx > 0$ festgestellt, ob die Kollimatoren auf- oder zufahren, um dann einen Übergang in den entsprechenden Zustand `opening` bzw. `closing` durchzuführen. Vom Zustand `closing` ist bei einem Überschreiten der gewünschten Endposition der Kollimatorbacken ein Übergang in den Zustand `shutting` vorgesehen, der auf dem Bildschirm mit einer Warnung einhergehen wird. Wenn die Kollimatoren im Zustand `shutting` ihre Bewegungsrichtung umkehren, so findet ein Übergang in den Zustand `relaxing` statt.

Zustand	Erläuterung
open	Die Kollimatorposition ist größer oder gleich einem Grenzwert, ab dem der Kollimator als geöffnet bezeichnet wird.
close	Hier ist der Kollimator als geschlossen anzusehen, wenn seine Position kleiner oder gleich einem Grenzwert für geschlossen ist, wobei hier noch eine Toleranz mit einbezogen wird.
shut	Der Kollimator ist, obwohl er bereits geschlossen war, weiter in den Strahl hineingefahren worden.
intermediate	Ist der Kollimator auf einer beliebigen Position zwischen open und close zum Stillstand gekommen, so wird sein Zustand als <i>intermediate</i> bezeichnet.

Tabelle 3.2: Die möglichen Zustände eines stillstehenden Kollimators.

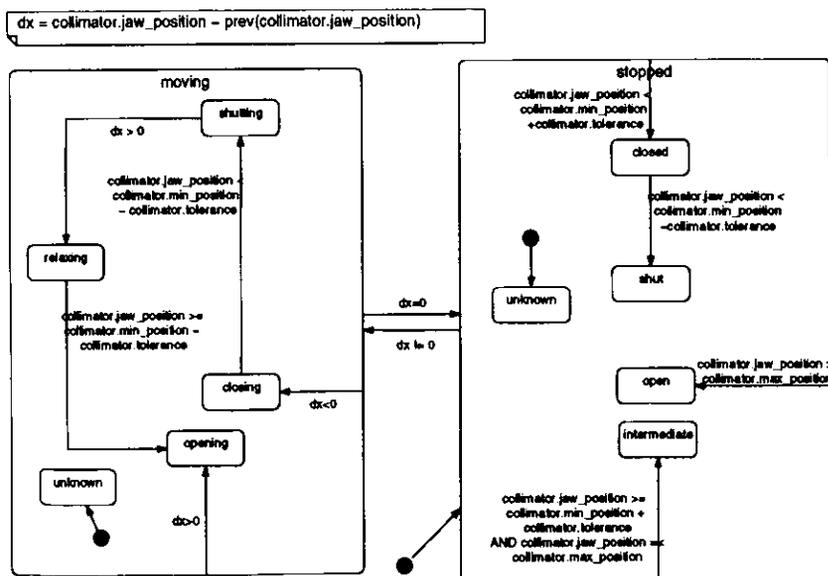


Abbildung 3.3: Die Bestimmung des momentanen Zustandes, in dem sich eine Kollimatorbacke befindet, modelliert in einem Harel-Diagramm, die Beschriftung der Zustandsübergänge erfolgt nach der Nomenklatur: "Klasse.Attribut" (Erläuterungen im Text).

Die Klasse *lamp* legt fest, wie die Kollimatorbewegungen bewertet und auf dem Bildschirm angezeigt werden. Die Zustände sind entsprechend des Verhaltens und der Farbe der Lampe

benannt, siehe Tab. 3.3.

Zustand	Erläuterung
grün	alles in Ordnung, die Kollimatoren sind in eine geschlossene Position gefahren.
gelb	Die Kollimatoren sind in Bewegung.
rot	Fehlverhalten, ein Eingriff ist erforderlich.
weiß	Die Überwachung der Kollimatoren wird nicht benötigt, es befinden sich keine Elektronen in HERA.

Tabelle 3.3: Die möglichen Zustände der Kollimatorsignallampe.

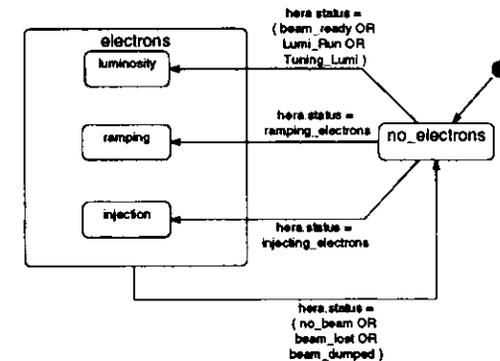


Abbildung 3.4: Die verschiedenen Zustände des Elektronenstrahls in HERA, welche für die Überwachung der Kollimatoren relevant sind.

Zur Veranschaulichung wird hier eine Regel der Elektronenkollimatorüberwachung gezeigt (Nomenklatur: Klasse.Objekt.Attribut):

```

1: NAME:          "collimator_lamp_green";
2: AUTHOR:       "D. Kahnert";
3:
4: IF
5:     collimator_global.beam.status = electrons
6:     AND collimator_global.beam.substatus = luminosity
7:     AND collimator.?any?.status = stopped
8:     AND collimator.?any?.substatus = closed
9:
10: THEN
11:     lamp.?any?.lamp_color := green;
!

```

Mit dieser Regel wird die Farbe der Kollimatorlampe auf grün gesetzt (Zeile 11), wenn sich ein Elektronenstrom in HERA befindet (Zeile 5 und 6), die Kollimatorbacken nicht bewegt werden (Zeile 7) und wenn sich die Kollimatorbacke in der Endposition befindet (Zeile 8). Die Bezeichnung „?any?“ in den Regeln ist ein Platzhalter, der die genaue Kollimatorbezeichnung enthält. Somit können unter Verwendung von Variablen und Platzhaltern alle Kollimatoren mit einer Regel überprüft werden. Nach Hinzufügen weiterer Kollimatorobjekte werden diese automatisch durch die vorhandenen Regeln überprüft.

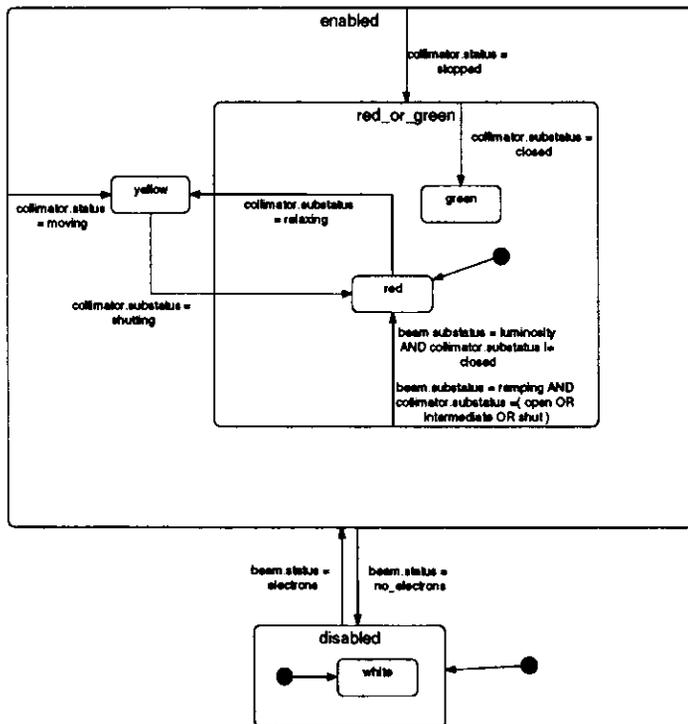


Abbildung 3.5: Die verschiedenen Zustände einer Signallampe, welche den Zustand des Kollimators beschreibt.

Abbildung 3.6 zeigt die grafische Anzeige der Kollimatorüberwachung innerhalb des Expertensystems. In der oberen Hälfte der Anzeige sind schematisch die Kollimatoren angedeutet. Die grafische Anzeige ermöglicht durch Darstellung der Bewegung der Kollimatorbacken sowie verschiedene Farben der Kollimatoren ein schnelles Erfassen des momentanen Status. Unterhalb dieser grafischen Darstellung befinden sich zwei Textfenster: Auf der rechten Seite des Bildschirms werden die momentanen Zustände durch Meldungen mitgeteilt, auf der linken Seite

findet man die momentane Position der Kollimatoren.

3.3 Erste Betriebserfahrungen

ZEX-COLLIMATOR ist ein Beispiel für die Modellierung eines Moduls für ZEX mit Hilfe von objektorientierten Analysen und Harel-Diagrammen. Diese Analyseverfahren erlauben es, eine gut strukturierte Problemlösung zu erstellen und zu dokumentieren. Die Codierung der Regeln in ZEX benötigte nur ca. 3-10% der Entwicklungszeit, die von der Analyse bis zur fehlerbereinigten Implementation ca. zwei Mannmonate benötigte. Hierbei ist anzumerken, daß während dieser Zeitspanne auch die Einarbeitung in das Analyseprogramm RATIONAL ROSE [RAT95] stattfand. Da dies die erste Analyse für ZEX mit Hilfe von Harel-Diagrammen war, wurden einige Lösungsvorschläge wieder verworfen, dies wurde in der oben angegebenen Abschätzung des Zeitaufwandes mit einbezogen.

Der Vorteil einer strukturierten Analyse gegenüber dem unstrukturierten 'drauf-los'-programmieren ist darin zu sehen, daß hier eine Dokumentation vorliegt, die eine eventuelle Fehlersuche erleichtert.

Die Modellierung mit Hilfe formaler Methoden verlangt eine gründliche Analyse des Problems, somit liegt als Ergebnis eine sorgfältig durchdachte Lösung vor, welche deutlich weniger unentdeckte Seiteneffekte hat als eine 'drauf-los'-programmierte Lösung.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme hatten die Bedienungsmannschaften Wünsche und Verbesserungsvorschläge, nämlich die Berücksichtigung der Bewegungstoleranz und eine Erweiterung um den Zustand shut. Diese Änderungen ließen sich durch Hinzufügen weiterer Zustände in den Harel-Diagrammen oder Änderungen von Übergangsbedingungen problemlos realisieren. ZEX-COLLIMATOR ist die erste grafische Überwachung der Elektronenkollimatoren im ZEUS-Kontrollraum, bisher wurde die Überwachung mit Hilfe eines Textbildschirms durchgeführt. Die grafische Darstellung erleichtert ein schnelles Erfassen der momentanen Position sowie des momentanen Bewegungszustandes. Seit August 1996 arbeitet ZEX-COLLIMATOR zuverlässig im Rahmen des Expertensystems, es sind von den Betriebsmannschaften bisher keine Fehlerurteilungen des Kollimatorzustandes durch ZEX beobachtet und dokumentiert worden.

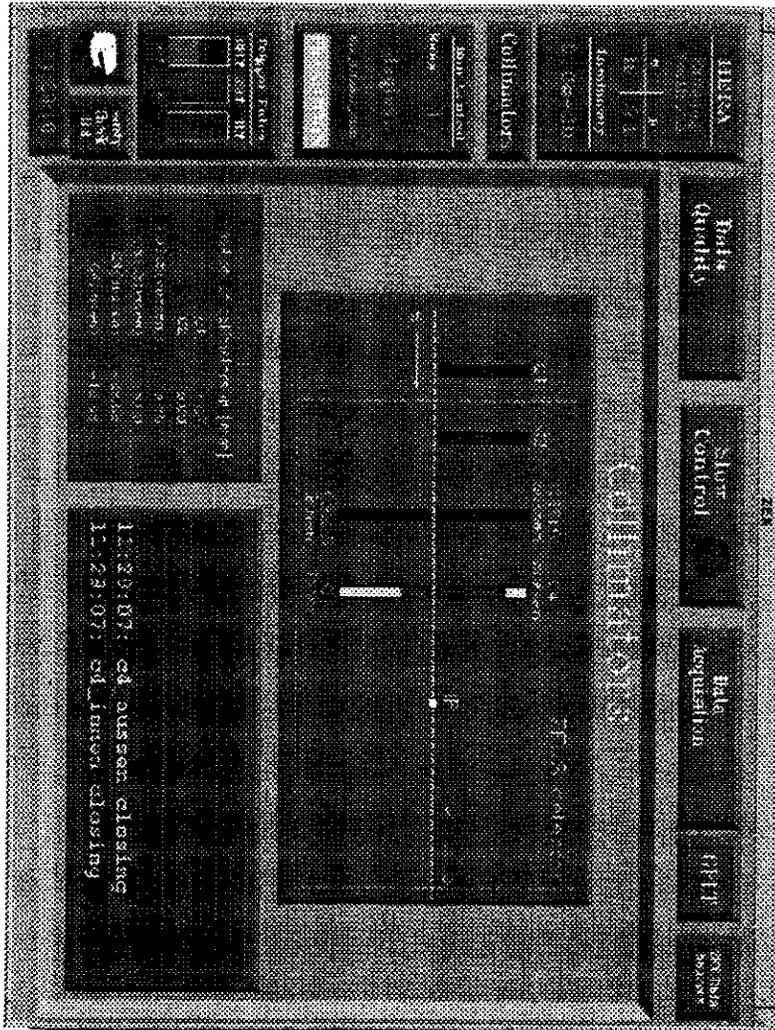


Abbildung 3.6: Grafische Ansicht der Kollimatorüberwachung im ZEUS-Expertensystem ZEX. Die grafische Darstellung in der oberen Bildhälfte signalisiert mit Hilfe der Balken, das Auf- und Zufahren der Kollimatorbacken und mit Hilfe einer Einfärbung den momentanen Zustand. Dies geht einher mit Fehlermeldungen oder Kommentaren, die im unteren rechten Textfenster dargestellt werden. Im linken unteren Textfenster wird die Position der Kollimatorbacken im Klartext angezeigt.

Kapitel 4

Überwachung der First-Level-Trigger-Raten mit ZEX

Die Funktionsfähigkeit und eine hohe Verfügbarkeit des Triggersystems sind unabdingbar für die Datennahme des ZEUS-Detektors. Es ist wichtig, daß die Zuverlässigkeit aller Komponenten gewährleistet werden kann, da fehlende Daten einzelner Komponenten die Verwendbarkeit für die spätere physikalische Analyse stark einschränken können. Durch die Überwachung der Triggerraten der einzelnen Triggerkanäle ist es möglich, Aussagen über die Funktionsfähigkeit der Systeme zu machen. Außerdem ist durch die Bewertung der Triggerraten eine Beurteilung unterschiedlicher Parameter, wie z.B. die Strahlqualität oder der Anteil von Untergrundereignissen an den gemessenen Raten möglich. Durch eine Analyse der Raten ist es eventuell auch möglich, Schwächen in der Triggerkonfiguration aufzuzeigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modul für ZEX entwickelt, welches die Eingangsraten des GFLT überwacht und meldet, wenn die Raten ein ungewöhnliches Verhalten zeigen, z.B. zu hoch, Null oder kurzfristige Ausreisser.

4.1 Analyse der Triggerraten im ZEUS-Experiment

Eine Einbindung der Überwachung des First-Level-Triggersystems in das Expertensystem ist ein weiterer Schritt hin zur Entlastung der Bedienermannschaft des ZEUS-Detektors, da bisher keine Möglichkeit vorhanden war, die Eingangsraten des GFLT mit Hilfe eines automatischen Systems zu überwachen und zu bewerten. Derzeit werden zwei separate Werkzeuge zur Beobachtung und Überwachung des GFLT herangezogen. Der "Histogramm-Presenter" (Abb. 4.1) zeigt die aktuellen Triggerraten der verschiedenen Kanäle, und mit Hilfe eines Makroprogramms können im Rahmen des Datenanalyse- und -visualisierungs-Werkzeugs PAW [Cou93] Verteilungen erzeugt werden, die die Beurteilung der gemessenen Triggerraten erlauben (Abb. 4.2). Ob die gemessenen Raten einem normalen Betriebszustand entsprechen, wird durch Vergleich mit Vorlagen bestimmt. Die Vorlagen enthalten für verschiedene Messungen Einträge, die die mittlere Triggerrate eines Triggerkanals mit der mittleren Luminosität der Messung korrelieren. Es ist dann zu prüfen, ob die gemessene Triggerrate für die gegenwärtige Luminosität mit den Raten in diesen Verteilungen verträglich ist. Diese Arbeit ist sehr mühselig, da in regelmäßigen Abständen alle 64 Trigger-Kanäle überprüft werden müssen. Für eine Person mit entsprechender Erfahrung ist dies eine zeitaufwendige Routineaufgabe, für neue Mitarbeiter am Experiment ist die Beurteilung der Triggerraten aufgrund mangelnder Erfahrung schwer durchführbar. Somit könnte der Neuling durch Beobachtung eines automatischen Systems Er-

fahrungen sammeln.

Beide Werkzeuge liefern die Resultate auf mehreren Seiten ab, so daß die Feststellung der einwandfreien Funktion des GFLT nicht "mit einem Blick" erfolgen kann, sondern ganz im Gegenteil eine umständliche und damit fehlerträchtige Prozedur ist.

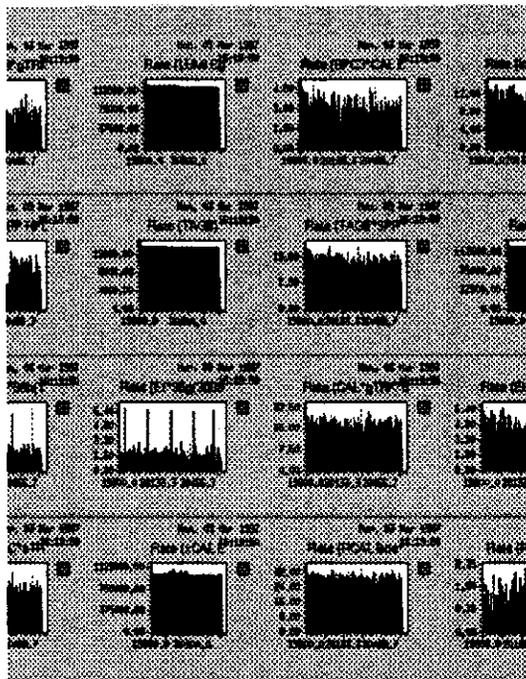


Abbildung 4.1: Ein Ausschnitt aus der Darstellung der GFLT-Raten im ZEUS-Histogramm-Präsentator. Durch Vergleich mit Referenzverteilungen kann die Bedienermannschaft Aussagen über die Qualität der hier dargestellten Triggerraten machen.

4.1.1 Bestimmung der Luminosität

Die Triggerraten in Abhängigkeit von der Zeit sind starken Schwankungen unterworfen (Abb. 4.3 links). In (Abb. 4.3 rechts) sind die Triggerraten R gegen die instantane Luminosität $\mathcal{L}(t)$ aufgetragen. Die instantane Luminosität bietet sich als Parametrisierung für die Triggerraten an, um Aussagen über die Qualität dieser Raten und somit auch ein Bewertungskriterium für die Funktionsfähigkeit der Detektorkomponenten zu erhalten. Die Luminosität wird vom ZEUS-Luminositätsmonitor (LUMI) bestimmt. Der Luminositätsmonitor weist die Photonen und Elektronen aus dem Bremsstrahlungsprozeß $e p \rightarrow e \gamma p$ nach. In Protonrichtung wird in 27 m Entfernung vom Wechselwirkungspunkt das Elektron, welches aus dem Bremsstrahlungsprozeß hervorgeht, mit Hilfe einer Magnetstruktur aus dem Strahlrohr abgelenkt und in einem Kalorimeter nachgewiesen. Die Photonen verlassen das Strahlrohr 92 m vom Wechselwirkungspunkt

entfernt und werden nach Durchtritt durch ein Fenster mit einem Kalorimeter vermessen.

02/11/96 14.47

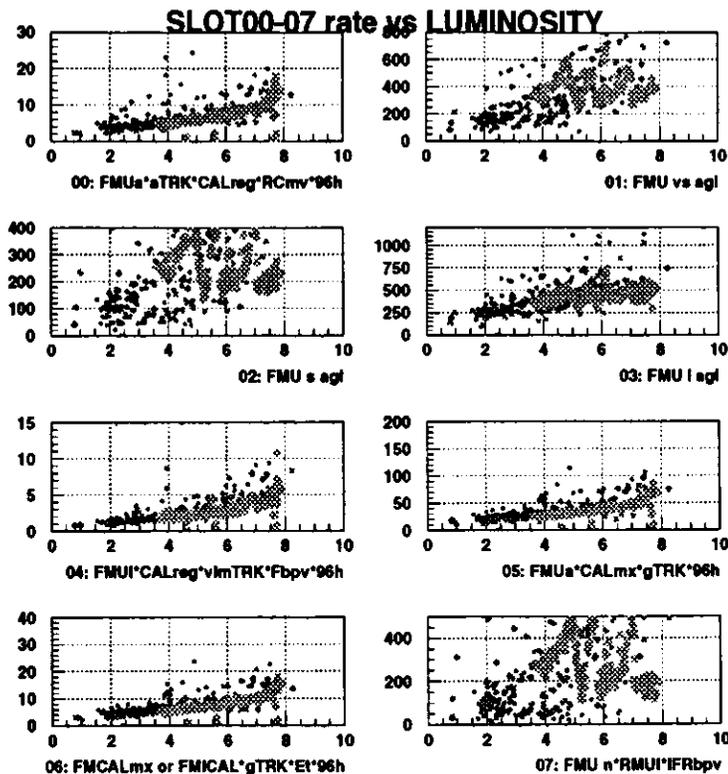


Abbildung 4.2: Für verschiedene Triggerkanäle ist hier die Triggerrate R [Hz] gegen die instantane Luminosität $\mathcal{L} [\times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$ aufgetragen. Diese Verteilungen werden während der Datennahme dynamisch erzeugt und der Bedienermannschaft über das WEB¹ zur Verfügung gestellt. Diese Verteilungen waren in der Vergangenheit ein Hilfsmittel der Bedienermannschaft zur Beurteilung der Qualität der Triggerraten. Die Meßpunkte stellen gemittelte Triggerraten dar, die in vergangenen Runs aufgezeichnet wurden. Die schraffierten Flächen sind die Bereiche, in denen sich die Raten des aktuellen Runs befinden.

Der Trigger des Luminositätsmonitors ist so konfiguriert, daß nur die Photonen nachgewiesen werden. Eine Koinzidenz des Nachweises beider Teilchen wird nicht gefordert, da Untersuchungen ergeben haben, daß Untergrundereignisse auf die Luminositätsbestimmung einen sehr kleinen Einfluß haben [Pio93]. Da ein Koinzidenznachweis aufwendige Methoden erfordert und

¹<http://www-zeus.desy.de/ZEUSONLY/GFLT/rateplots.html>

die hieraus resultierende Verbesserung gering ist, beschränkt man sich auf den Nachweis des Photons.

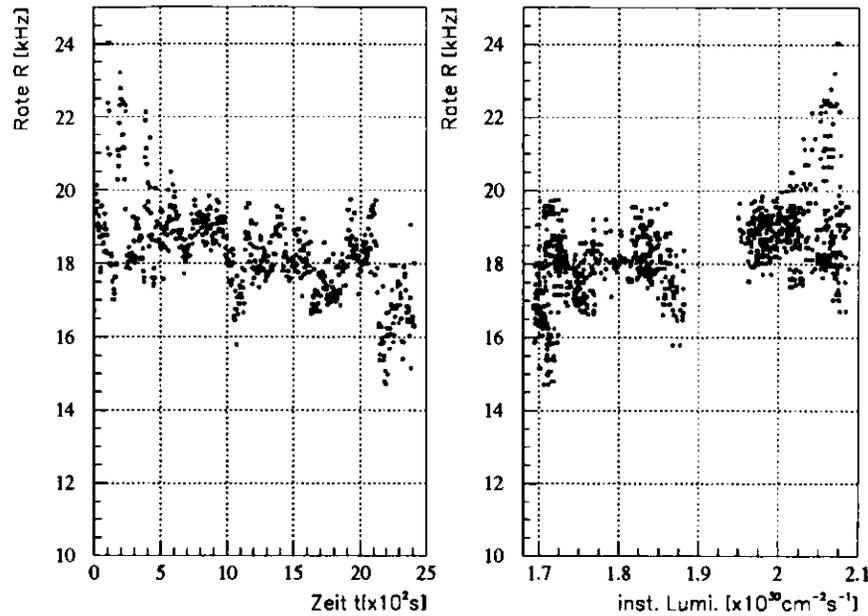


Abbildung 4.3: Links: Triggerrate R des Triggerkanals 13 aufgetragen gegen die Zeit. Rechts: Darstellung der Triggerrate R , aufgetragen gegen die instantane Luminosität \mathcal{L} .

Die Zählrate der nachgewiesenen Photonen kann im GFLT in Kanal 33 ausgelesen werden. Sie ist proportional zur instantanen Luminosität \mathcal{L}_{inst} (Abb. 4.4). In allen weiteren Betrachtungen wird sie mit $R_{E\gamma}$ bezeichnet und aus technischen Gründen anstatt der Luminosität verwendet, da sie grundsätzlich immer zusammen mit den Triggerraten des GFLT erfasst wird. Der Einfluß des Untergrundes auf die Messung von $R_{E\gamma}$ ist sehr gering, bei \mathcal{L}_{inst} ist der Untergrund bereits berücksichtigt. Die angepaßte Gerade geht in guter Näherung durch den Nullpunkt, die Zählrate des $E\gamma$ -Detektors ist also als Maß für die Luminosität geeignet.

4.1.2 Untergrundeffekte

Der Einfluß von Untergrundeffekten ist bei der Bestimmung der Luminosität zwar fast vernachlässigbar gering, eine Vielzahl der vom GFLT akzeptierten Ereignisse werden jedoch von Untergrundreaktionen oder nicht erwünschten physikalischen Prozessen hervorgerufen:

ep -Wechselwirkungen Es ist nicht sinnvoll, alle Reaktionen zu speichern, der Trigger trifft eine Auswahl nach physikalischen Kriterien. Als dominierende ep -Wechselwirkung beobachtet man Photoproduktion ($e^- + p \rightarrow e^- + X + \gamma$). Diese Ereignisse sind dadurch gekennzeichnet,

daß der Impulsübertrag Q^2 nahezu Null ist. Hieraus folgt, daß das Photon quasi-reell ist und unter extrem kleinen Winkeln gestreut wird. Das Photon kann in nachfolgenden Reaktionen einen hadronischen Jet verursachen, welcher im Detektor nachgewiesen wird (z.B. [Mai93]).

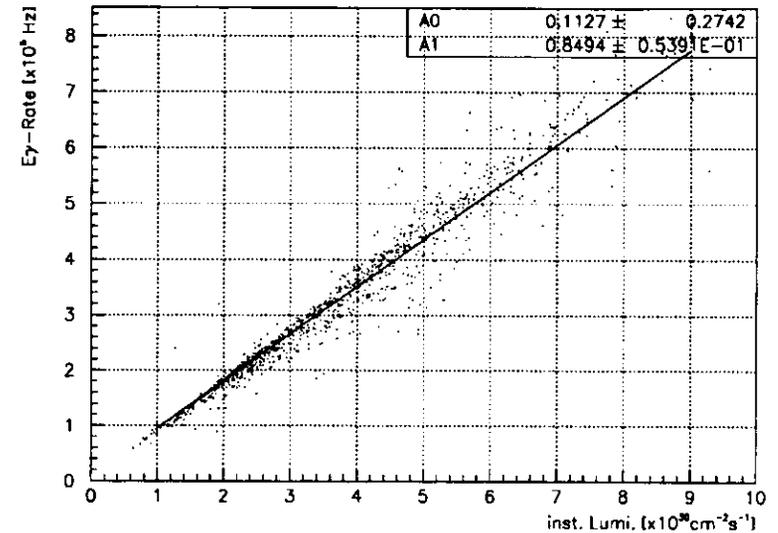


Abbildung 4.4: Zählrate des $E\gamma$ -Zählers aufgetragen gegen die instantane Luminosität. Während eines Runs wurden im 5s-Abstand die Rate und die Luminosität aufgezeichnet. Eine Regressionsgerade $R_{E\gamma}(\mathcal{L}_{inst}) = A_0 + A_1 \cdot \mathcal{L}_{inst}$ ist dargestellt.

Nicht- ep -Untergrund Unter 'Strahl-Restgas-Ereignissen' versteht man die Wechselwirkung von Strahlteilchen (Protonen oder Elektronen) mit dem Restgas in der Strahlröhre. Abbildung 4.5 zeigt ein solches Ereignis. Mit Hilfe der ungepaarten Teilchenpakete, den 'Pilot-Bunches', ist es möglich, Studien über die Strahl-Restgas-Reaktionen durchzuführen, da diese Ereignisse reine Untergrundereignisse sind. Für ihre Zählrate gilt: $R \propto I_{pilot}$, wobei I_{pilot} der Strom der Pilot-Bunche ist.

'Strahl-Wand-Ereignisse' sind jener Untergrund, welcher durch Kollisionen von Protonen oder Elektronen des Strahlhalos mit dem Strahlrohr verursacht werden. Diese Kollisionen sind ein Ursprung sekundärer Teilchenschauer.

Der Untergrund, welcher durch kosmische Myonen verursacht wird, hat eine nahezu konstante Rate von wenigen Hertz und ist nicht von den Teilchenstrahlen abhängig.

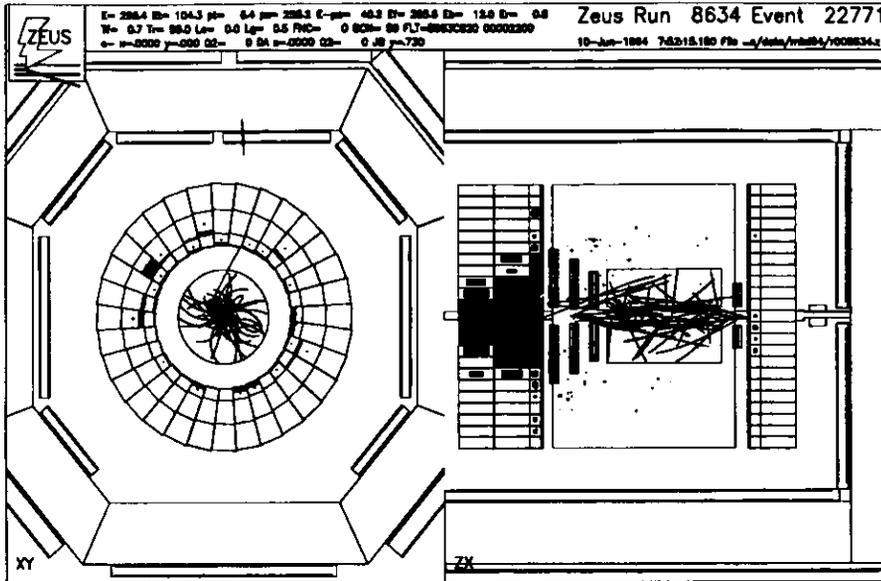


Abbildung 4.5: Ein Strahl-Restgas-Ereignis, wie es von ZEUS gemessen, rekonstruiert und dargestellt wird.

Synchrotronstrahlung Einen großen indirekten Einfluß auf die Zählraten vieler Triggerkanäle hat die Synchrotron-Strahlung. Für den Energieverlust eines Elektrons pro Umlauf gilt näherungsweise (z.B. [Jac83]):

$$\delta E[\text{MeV}] = 8.9 \cdot 10^{-2} \frac{E[\text{GeV}]^4}{r[\text{m}]} \approx 90 \text{MeV}$$

mit $E_{\text{HERA}} \approx 27 \text{GeV}$ (Elektronenenergie), $r_{\text{HERA}} \approx 800 \text{m}$ (Krümmungsradius der Dipolmagnete). Die Anzahl der abgestrahlten Quanten pro Zeiteinheit für ein Elektron ist:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{15\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{P_\gamma}{u_c} \quad \text{mit: } P_\gamma = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\beta^4 \gamma^4}{r^2}$$

mit

$$u_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{hc\gamma^3}{r} \quad : \text{ charakteristische Energie des Synchrotronspektrums}$$

und $\beta = v/c \approx 1$; $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$.

Der ZEUS-Detektor ist durch die Kollimatoren $C_1 - C_5$ (vgl. Kap.3) vor der Synchrotronstrahlung geschützt. Von Photonen getroffene Kollimatoren werden zu Quellen sekundärer Photonen. Die Strahlung, die im Detektor registriert wird, ist an den Kollimatoren und Absorbieren mehrfach reflektiert und gestreut worden. In den Spurrkammern ist eine Ionisation des

Kammorgases durch die vielfach gestreute und reflektierte Synchrotronstrahlung zu erwarten. Die dominierende Ursache für Untergrund aufgrund von Synchrotron-Strahlung ist jedoch indirekter Natur: Die Synchrotron-Strahlung löst aus der Wand des Strahlrohres adsorbierte Restgasatome (vor allem Stickoxide, Wasserstoff und Wasser) heraus, welche die Qualität des Vakuums verschlechtern. Der somit erhöhte Restgasdruck ist die Ursache für vermehrte Strahl-Restgas-Wechselwirkungen. Dieser Effekt ist vor allem bei sehr hohen Luminositäten zu beobachten, also zu Beginn einer neuen Maschinenfüllung. Zu diesem Zeitpunkt findet eine Justage der Teilchenstrahlen statt.

4.1.3 Parametrisierung der Triggerraten

Abbildung 4.7 zeigt, daß die Abhängigkeit der Triggerrate von der Luminosität oftmals nicht linear ist. Die Zählrate, mit welcher ein physikalisches Ereignis E beobachtet wird, ist proportional zur Luminosität:

$$R(\mathcal{L}) = \sigma \cdot \mathcal{L}, \quad \sigma = \text{effektiver Wirkungsquerschnitt für } E \quad (4.1)$$

Eine nichtlineare Abhängigkeit kann durch eine zufällige Koinzidenz zweier Ereignisse in der Triggerlogik eintreten. Die Wahrscheinlichkeit, eine Koinzidenz zweier unabhängiger Ereignisse E_1 und E_2 in einem Teilchenpaket zu beobachten ist:

$$W(E_1 \wedge E_2) = \frac{R_1}{n} \cdot \frac{R_2}{n}$$

wobei: R_i Ereignisraten der Ereignisse E_i pro Sekunde, $n \approx 10^7$ Zahl der Teilchenpakete pro Sekunde.

Die Rate dieser Koinzidenz ist:

$$R(E_1 \wedge E_2) = \frac{R_1 \cdot R_2}{n}$$

Mit (4.1) wird die Beobachtungshäufigkeit der Koinzidenz:

$$R_{\wedge}(\mathcal{L}) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \mathcal{L}^2}{n} \quad (4.2)$$

Eine logische UND-Verknüpfung von drei unabhängigen Ereigniskoinzidenzen erfordert einen Term:

$$R_{\wedge\wedge}(\mathcal{L}) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \cdot \mathcal{L}^3}{n^2}$$

Da n sehr groß gegenüber R_i ist, ist eine Parametrisierung in zweiter Ordnung als Näherung ausreichend.

Eine deutliche quadratische Abhängigkeit ist nur bei Triggerkanälen zu erwarten, welche eine hohe Zählrate in einem UND-verknüpften Logikterm besitzen. Somit kann für die gesamte Zählrate eines Triggerkanals in erster Näherung mit (4.1) und (4.2) folgende Parametrisierung angenommen werden:

$$R(\mathcal{L}) = a_0 + a_1 \cdot \mathcal{L} + a_2 \cdot \mathcal{L}^2 \quad (4.3)$$

Der konstante Term a_0 beschreibt Effekte mit konstanter Rate, wie z.B. Rauschen in der Ausleselektronik, der lineare Term in \mathcal{L} symbolisiert die Rate, mit der einzelne Ereignisse detektiert werden. Der quadratische Term in \mathcal{L} beschreibt Zufallskoinzidenzen, welche durch mehrere

Ereignisse oder Folgeereignisse verursacht werden.

Als Beispiel soll hier der Triggerkanal 51 mit der Logik `FNC*CAL E or Rth*gTRK` betrachtet werden. Diese Logik überprüft folgendes: Energiedeposition im Kalorimeter über einem Schwellwert UND Nachweis von Teilchen im FNC ODER Energieschwellwert des RCAL über einer Grenze UND Nachweis von Teilchenspuren in der CTD. Die Zählrate der CTD kann bis zur Größenordnung 10^6 Hz betragen, da sie sehr empfindlich auf Untergrund ist. In Abb. 4.6 ist die Zählrate des Triggerkanals 51 in Abhängigkeit von der $E\gamma$ -Zählrate dargestellt. Hier ist die nichtlineare Abhängigkeit der Zählrate von der Luminosität aufgrund der UND-Verknüpfung sichtbar.

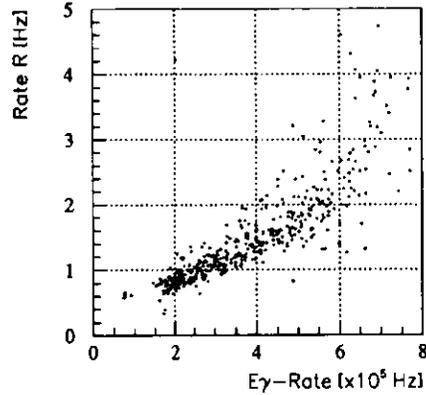


Abbildung 4.6: Triggerrate des Kanals 51, aufgetragen gegen die $E\gamma$ -Zählrate. Deutlich sichtbar ist der nichtlineare Verlauf der Zählrate, welcher durch die starke Untergrundempfindlichkeit der CTD verursacht wird, die hier mit einer UND-Verknüpfung in der Triggerlogik enthalten ist.

Abbildung 4.7 zeigt die Zählraten einiger Triggerkanäle, aufgetragen gegen die Rate des Luminositätsmonitors (LUMI). Dargestellt ist ein Meßpunkt pro Run, welcher die mittlere Luminosität und die mittlere Zählrate symbolisiert. Die Triggerraten liegen in der Regel innerhalb einer Region mit einer gewissen Bandbreite, somit ist es möglich, die zulässigen Triggerraten durch eine luminositätsabhängige obere und untere Grenze zu beschreiben. Mit Hilfe der Methode der Regression (Fit) wird zunächst ein Polynom zweiten Grades an die Verteilung der Triggerraten R in Abhängigkeit von der Luminosität \mathcal{L} angepaßt, wobei als Maß der Luminosität die $E\gamma$ -Zählrate $R_{E\gamma}$ dient:

$$R(R_{E\gamma}) = a_0 + a_1 \cdot R_{E\gamma} + a_2 \cdot R_{E\gamma}^2 \quad (4.4)$$

Hierbei wird für die Verteilung der Triggerraten eine Normalverteilung angenommen. Aus den Unsicherheiten der Fitparameter dieser Funktion ist es möglich, eine obere und eine untere Schranke zu generieren, welche die Verteilung der Raten in einem Band einschließen:

$$Y_U(R_{E\gamma}) = (a_0 + \Delta a_0) + (a_1 + \Delta a_1) \cdot R_{E\gamma} + (a_2 + \Delta a_2) \cdot R_{E\gamma}^2 \quad (4.5)$$

$$Y_L(R_{E\gamma}) = (a_0 - \Delta a_0) + (a_1 - \Delta a_1) \cdot R_{E\gamma} + (a_2 - \Delta a_2) \cdot R_{E\gamma}^2 \quad (4.6)$$

Δa_i : Unsicherheiten der Fitparameter

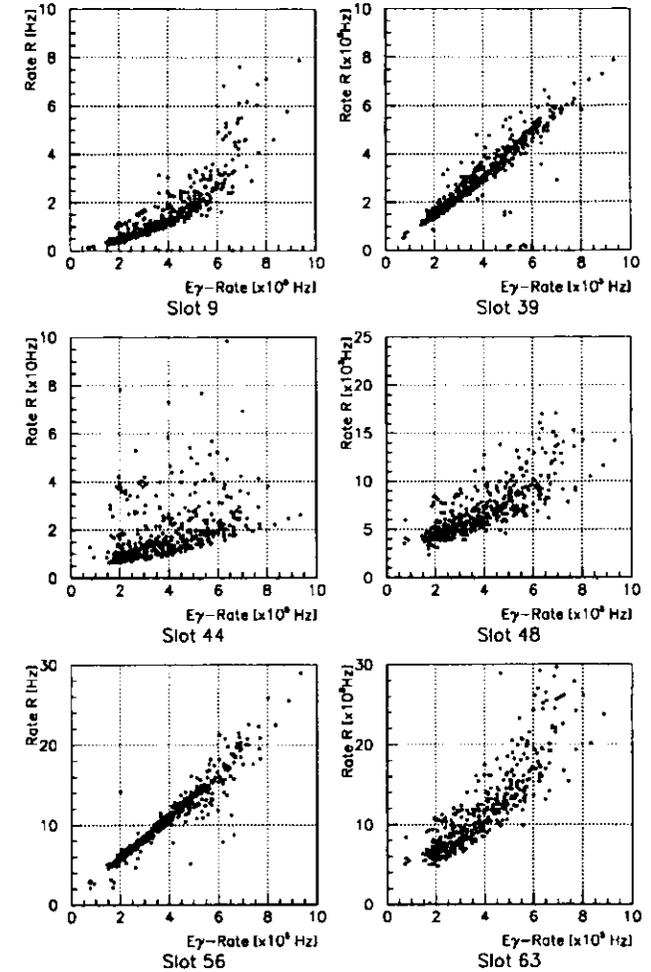


Abbildung 4.7: Darstellung der Zählraten verschiedener Trigger-Kanäle¹, aufgetragen gegen die Zählrate des Luminositätsmonitors (Kanal 33). Dargestellt ist ein Meßpunkt pro Run, welcher die mittlere Rate und die mittlere Luminosität des Runs darstellt.

¹Slot 9: Nachweis eines Myons im RMUON oder BMUON, gleichzeitig Detektion von Teilchenspuren und Nachweis eines einzelnen Elektrons im LUMI Kalorimeter.

Slot 39: lowWtrigger: Detektion eines hadronischen Endzustandes im LUMI Zähler mit kleiner invarianter Masse W .

Slot 41: Energiedeposition im elektromagnetischen Teil des BCAL und gleichzeitiger Nachweis von Teilchenspuren oder Energiedeposition im elektromagnetischen Teil des RCAL.

Slot 48: verlangt den Nachweis von Teilchenspuren mit bestimmter Signatur.

Bereits wenige Ausreißer in der Menge der Meßpunkte können die Qualität dieser Bandgrenzen stark beeinflussen. Gerade im Bereich sehr hoher Luminositäten haben die wenigen Meßwerte eine sehr große Streuung. Starke Streuungen beobachtet man vor allem in Triggerkanälen, welche Informationen der CTD oder anderer untergrundempfindlicher Komponenten durch eine UND-Verknüpfung enthalten. Durch starken Untergrundeinfluß bei hohen Luminositäten steigt die Eingangsrate der CTD stark an. Zu hohe Ereignisraten können durch starke Ströme in der CTD die Spannungsversorgung zusammenbrechen lassen ("CTD trips"), die Zählrate ist dann Null, was auch in allen anderen Kanälen beobachtet wird, die eine UND-Verknüpfung der CTD enthalten. Somit beobachtet man je nach Strahlqualität eine Zu- oder Abnahme der Zählraten in vielen Kanälen.

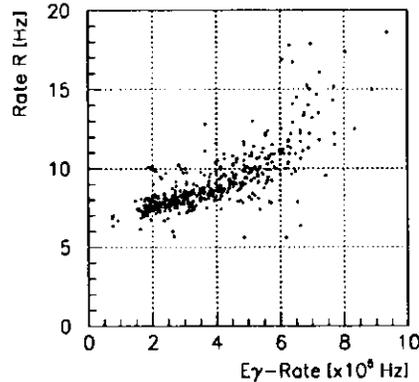


Abbildung 4.8: Triggerraten des Triggerkanals 11, im Bereich $R_{E\gamma} > 6 \cdot 10^5 \text{ Hz} \hat{=} \mathcal{L}_{inst} > 6 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ist eine deutliche Streuung der Zählraten sichtbar.

Bei Messungen im Bereich sehr hoher Luminositäten ($\mathcal{L}_{inst} > 6 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ist der Anteil von Komponententzeiten, insbesondere der CTD, mit bis zu 30% sehr hoch. Die Eingangsrate des GFLT, die während dieser Zeiten entstehen, werden bei der Ermittlung der hier benutzten gemittelten Raten berücksichtigt, so daß hier deutlich z.B. der Einfluß der Strahlqualität zu beobachten ist. Abbildung 4.8 zeigt die Triggerraten des Kanals 11, im Bereich $\mathcal{L}_{inst} > 6 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ist deutlich sichtbar, daß die Streuung der Meßpunkte stark zunimmt. Kanal 11 (CALreg*BMUI*vldgTRK) ist durch die UND-Verknüpfung der CTD stark empfindlich für die Strahlqualität. Ein Meßpunkt, welcher in den verwendeten Darstellungen bei sehr hohen Luminositäten angeordnet ist, stellt einen Run dar, der z.B. aufgrund schlechter Strahlbedingungen frühzeitig abgebrochen wurde (Abb. 4.9). Durch die resultierenden sehr großen Standardabweichungen der Fitfunktion scheinen die eingeschlossenen Bereiche der Bänder oftmals zu groß (Abb. 4.10 links und 4.11 links).

Um durch Elimination der Ausreißer die Bänder besser an die Verteilung der Meßpunkte anzugleichen, wird hier das "truncated-mean-Verfahren" angewendet. In der Literatur werden

Slot 56: inelastic jpsi: Nachweis der leptonischen Zerfallsprodukte (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$) eines inelastisch erzeugten J/ψ Teilchens.

Slot 63: Nachweis eines Teilchens im Proton Remnant Tagger (PRT).

verschiedene Algorithmen als "truncated-mean" bezeichnet, in dieser Arbeit wird die Variante aus [BL93, Sta95] verwendet:

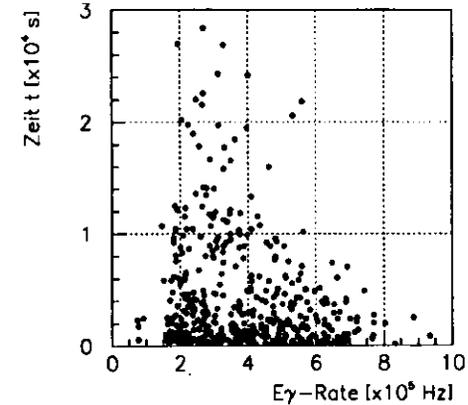


Abbildung 4.9: Gesamtlänge eines Runs, aufgetragen gegen die über den Run gemittelte Luminosität. Im Bereich $R_{E\gamma} > 6 \cdot 10^5 \text{ Hz} \hat{=} \mathcal{L}_{inst} > 6 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ist deutlich sichtbar, daß die Dauer eines Runs in der Regel unter 60 Minuten liegt. Hierbei ist nicht berücksichtigt, wie hoch der Anteil der Datennahme an der Gesamtzeit ist.

Vorab findet eine Selektion der Meßpunkte statt, die einer gemeinsamen Triggerkonfiguration angehören, da Raten unterschiedlicher Konfigurationen in verschiedenen Wertebereichen angeordnet sein können, denn die Triggerkonfigurationen werden oftmals während einer Run-Periode modifiziert.

Die Verteilung der Triggerraten und Luminositätswerte wird dann bezüglich der Luminosität in äquidistante Abschnitte unterteilt. In jedem Abschnitt werden nun folgende Operationen durchgeführt:

- Die größten m_o und kleinsten m_u Werte der Triggerrate in dem jeweiligen Abschnitt werden gestrichen.
- Ein Abschnitt, welcher weniger als 5% der Gesamtzahl der Ereignisse enthält, wird komplett gestrichen (alternativ können auch andere Prozentwerte genommen werden).
- Das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung der verbleibenden $n - m_o - m_u$ Ereignisse (n ist die Anzahl der Wertepaare in dem Abschnitt) werden gebildet.

Ein gutes Ergebnis wurde mit 5% gestrichenen Meßwerten an der unteren und 10% gestrichenen Punkten an der oberen Grenze erzielt.

An diese reduzierten Daten wird wieder ein Polynom zweiten Grades angepaßt, und aus den Ungenauigkeiten der Regression werden die oberen und unteren Schranken nach Gl. (4.5, 4.6) bestimmt. In Abb. 4.10, 4.11 sind für verschiedene Triggerkanäle die Bänder vor und nach Anwendung dieses Verfahrens dargestellt. Es wird deutlich, daß sich die Bänder nach Anwendung

des 'truncated-mean'-Verfahrens dichter an die Verteilung der Meßpunkte schmiegen, der Einfluß weniger Ausreißer ist deutlich reduziert.

Die Raten einiger Triggerkanäle sind nicht in Regionen einer definierten Bandbreite lokalisiert. Hier ist es lediglich notwendig, eine obere Grenze anzugeben (Abb. 4.12).

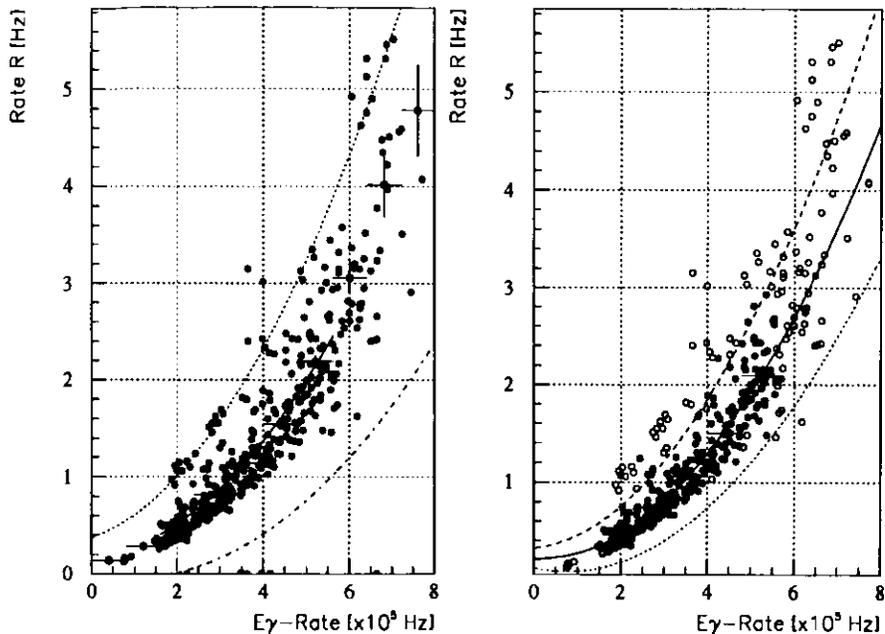


Abbildung 4.10: Darstellung des Bereichs von Kanal 9¹, in dem die Triggerraten bei regulärem Verhalten liegen. Dargestellt ist ein Meßpunkt pro Run, welcher die gemittelten Raten und Luminositäten symbolisiert. Links die ermittelten Bänder, wenn alle Meßpunkte für den Fit akzeptiert werden. Rechts die mit Hilfe des truncated-mean-Verfahrens automatisch ermittelten Bänder. Dargestellt sind die Daten ab Run 22018 (24.Sep.1996). (für Regression: ●: akzeptierte Meßpunkte, ○: verworfene Meßpunkte).

Die Streichung von Abschnitten, welche nur wenige Wertepaare enthalten, ignoriert insbesondere die Verhältnisse der Raten bei hohen Luminositäten. Dies kann eine Schwäche dieses Verfahrens sein, Studien haben jedoch gezeigt, daß eine Ermittlung der Schranken mit dem

¹Logik von Slot 9: LEe*BRMUI*vldgTRK*96h, d.h. Nachweis eines Signals in BMUON oder RMUON und Energie des Elektron Kanals des LUMI Monitors über einem Schwellwert und Existenz von Spuren in den zentralen Spurkammern, die innerhalb eines Zeitfensters nachgewiesen werden. Diese Logik ist auf Myonen selektiv, welche durch Strahlwechselwirkungen erzeugt werden. Kosmische Myonen werden durch das Zeitfenster ausgeschlossen.

beschriebenen Verfahren die Bandbreite der Meßpunkte auch bei hohen Luminositäten gut beschreibt (Abb. 4.10, 4.11). Es wurde deutlich, daß eine Extrapolation der Schranken bei hohen Luminositäten die Verteilung der Meßpunkte besser beschreibt als die Berücksichtigung aller Runs zur Ermittlung der Fitfunktion. Es ist nicht sinnvoll, die Schranken zu großzügig zu wählen, da die automatische Kontrolle dann solche Raten als gut klassifiziert, die ein menschlicher Experte schon als anomal ansieht. Dies Verfahren ist als Versuch anzusehen, das 'Augenmaß' und die Erfahrung menschlicher Experten in einem automatischen System nachzubilden.

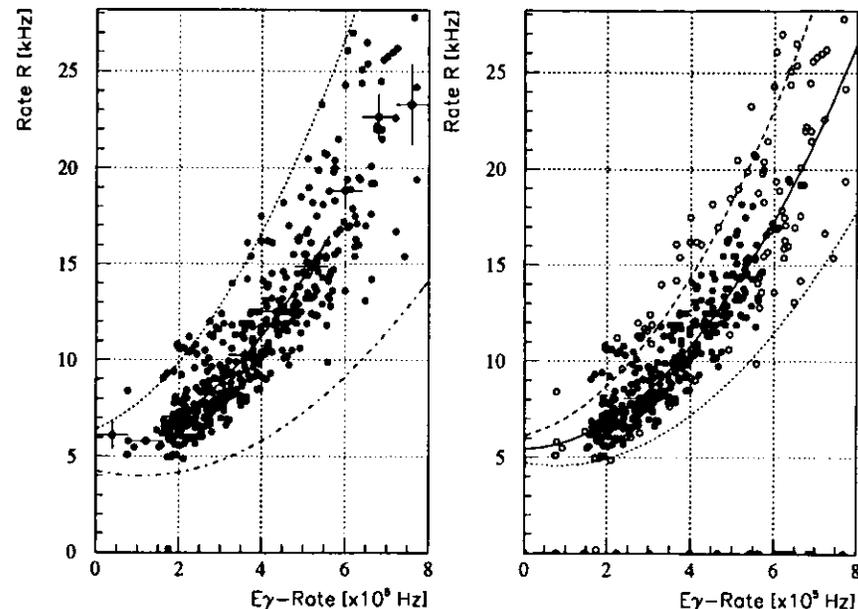


Abbildung 4.11: Darstellung des Bereichs von Kanal 63², in dem die Triggerraten bei regulärem Verhalten liegen. Dargestellt ist ein Meßpunkt pro Run, welcher die gemittelten Raten und Luminositäten symbolisiert. Links die ermittelten Bänder, wenn alle Meßpunkte für den Fit akzeptiert werden. Rechts die mit Hilfe des truncated-mean-Verfahrens automatisch ermittelten Bänder. Dargestellt sind die Daten ab Run 22018 (24.Sep.1996). (für Regression: ●: akzeptierte Meßpunkte, ○: verworfene Meßpunkte).

²Logik von Slot 63: PRT OR, d.h. Nachweis eines Teilchens im Proton Remnant Tagger.

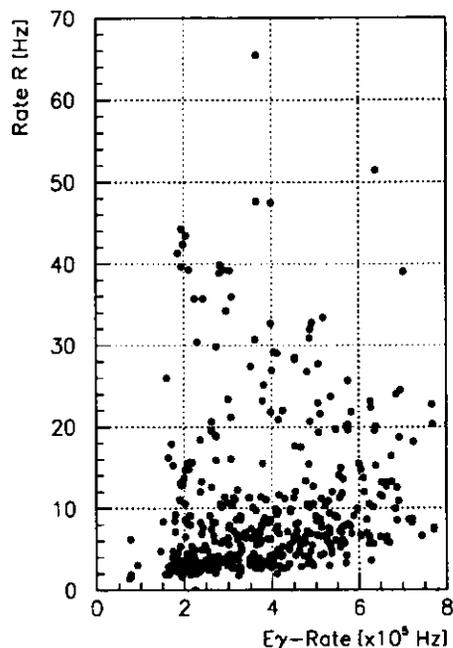


Abbildung 4.12: Kanal 11³, hier ist kein luminositätsabhängiges Band notwendig, der konstante Parameter a_0 der Parametrisierung ist ausreichend zur Beschreibung einer Obergrenze.

4.2 Entwurf und Implementation von ZEX-GFLT

Eine Beurteilung der Triggerraten unter Verwendung der Schrankendefinitionen ist nur sinnvoll, wenn eine Messung von Physik-Ereignissen läuft. Für Messungen mit kosmischer Strahlung oder Testmessungen sind andere Triggerkonfigurationen notwendig, so daß die definierten Schranken nicht verwendet werden können.

4.2.1 Objekte und Zustände von ZEX-GFLT

Abbildung 4.13 zeigt das Klassendiagramm von ZEX-GFLT. Die Klasse `slot` nimmt eine Klassifikation der Triggerraten vor, die Klasse `run control` überprüft die Konfiguration des Detektors und des Datenerfassungssystems, `beam` stellt fest, ob HERA Luminosität liefert. Wenn ZEUS Physik-Daten aufgezeichnet, so wird durch die Klasse `lamp` die Beurteilung der Triggerraten auf dem Bildschirm von ZEX dargestellt. Die Klasse `global status` faßt die Status der

³Logik von Kanal 11: `CALreg*RMU1*vldgTRK*96h`, d.h. Nachweis eines Teilchens im RMUON und Nachweis eines Myons im RCAL und Existenz von Spuren in den zentralen Spurkammern, die innerhalb eines Zeitfensters nachgewiesen werden, um kosmische Myonen auszuschließen.

64 Slots zu einem Gesamtstatus zusammen.

Zur Klassifikation der Triggerraten wurden in der Klasse `slot` die in Tab.4.1 beschriebenen Zustände gewählt.

Zustand	Erläuterung
nominal	Die Triggerrate befindet sich innerhalb der Bandgrenzen
low/high spike	Die Rate ist unter- oder oberhalb der Bänder Die Rate ist kurzzeitig (einige Sekunden) mehr als $n \cdot Y_L(R_{E\gamma})$ zu hoch
very high	Die Rate ist für mehr als 20s größer als $n \cdot Y_L(R_{E\gamma})$
zero	Die Rate ist Null

Tabelle 4.1: Die möglichen Zustände einer Triggerrate.

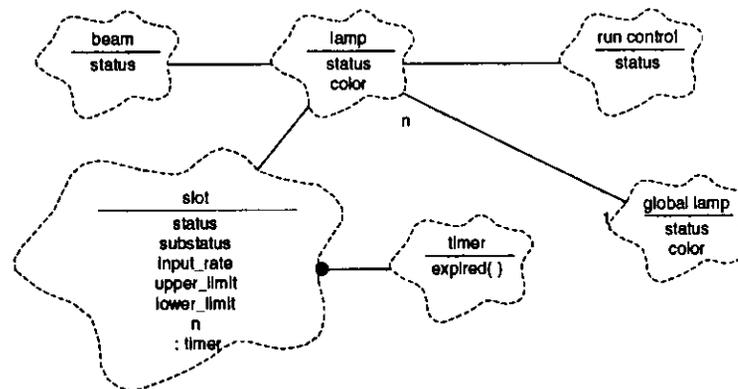


Abbildung 4.13: Klassendiagramm für ZEX-GFLT. Dargestellt sind die verwendeten Klassen sowie ihre Beziehungen zueinander. Die einzelnen Klassen sind miteinander assoziiert, entlang der Linien (Assoziationen) tauschen sie ihren Status aus. Zwischen den Klassen 'lamp' und 'global lamp' existiert eine 1 : n Assoziation, d.h. die Klasse 'global lamp' faßt die Status der 64 (n) Triggerlampen (Klasse 'lamp') zu einem globalen Status zusammen. Die Klasse 'slot' hat eine Unterklasse 'timer', die ermittelt, wie lang eine Triggerrate außerhalb der Schranken ist.

Das Harel-Diagramm, welches die Klassifikation beschreibt, ist in Abb.4.14 gezeigt. Der Parameter n wird für jeden Kanal vom Experten frei gewählt und ist typischerweise $n = 2 \dots 5$. Überschreitet eine Rate $R(R_{E\gamma})$ den Wert $n \cdot Y_L(R_{E\gamma})$, so wird dies zunächst als Spike, d.h. als kurzzeitig angenommen. Hält dieser Wert jedoch mehr als 20s an, so wird der Zustand

very high eingenommen.

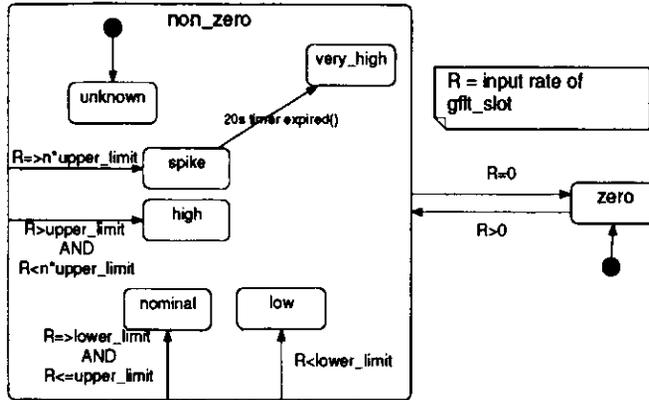


Abbildung 4.14: Harel-Diagramm der möglichen Zustände eines Triggerslots. Die schwarzen Kreise symbolisieren den Startpunkt nach Initialisierung oder Eintritt in einen Superzustand.

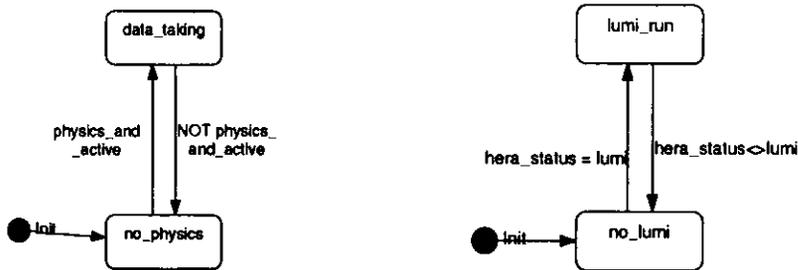


Abbildung 4.15: Harel-Diagramme für das Run Control System (links) sowie die benötigten Strahlzustände von HERA (rechts).

Die Überwachung der Triggerraten ist nur relevant, wenn das Experiment Daten aufzeichnet. Um dies zu erkennen, werden die Zustände von HERA und von der ZEUS Experiment-Kontrolle (run control) hinzugezogen. Abbildung 4.15 zeigt die betreffenden Harel-Diagramme. Mit Hilfe einer farbigen Lampe werden die verschiedenen Zustände eines Trigger-Kanals schnell erfassbar auf einem Display dargestellt. Die möglichen Zustände einer Lampe sind in Abb. 4.16 modelliert. Die Zustandsänderungen werden durch Zustandsänderungen des Triggerkanals, des Experiments oder des Beschleunigers ausgelöst. Hierbei wurde die in Tab. 4.2 dargestellte Farbkonvention gewählt.

Zustand	Erläuterung
grün	Die Datennahme ist aktiv und die aktuelle Rate des Triggers befindet sich innerhalb der definierten Schranken.
gelb	Bei aktiver Datennahme befindet sich die Rate momentan ober- oder unterhalb der Grenzen. Auch ein kurzzeitiger Spike in der Rate wird durch die gelbe Lampe signalisiert.
rot	Die Rate ist für mehr als 20 s größer als $n \cdot Y_T$ oder die Rate ist Null.
weiß	Die Datennahme ist deaktiviert oder sie wurde z.B. durch ein externes Veto kurzzeitig unterbrochen.

Tabelle 4.2: Die möglichen Zustände der Signallampe eines Triggerkanals.

Mit Hilfe der Klasse `global_lamp` (Abb. 4.17) werden die 64 Triggerkanäle zusammengefaßt. Diese Information wird verwendet, um auf einer Experimentübersicht den Triggerstatus mit einer Lampe darzustellen. Sie wird rot, sobald mindestens ein Triggerkanal den Status `zero` oder `very_high` einnimmt.

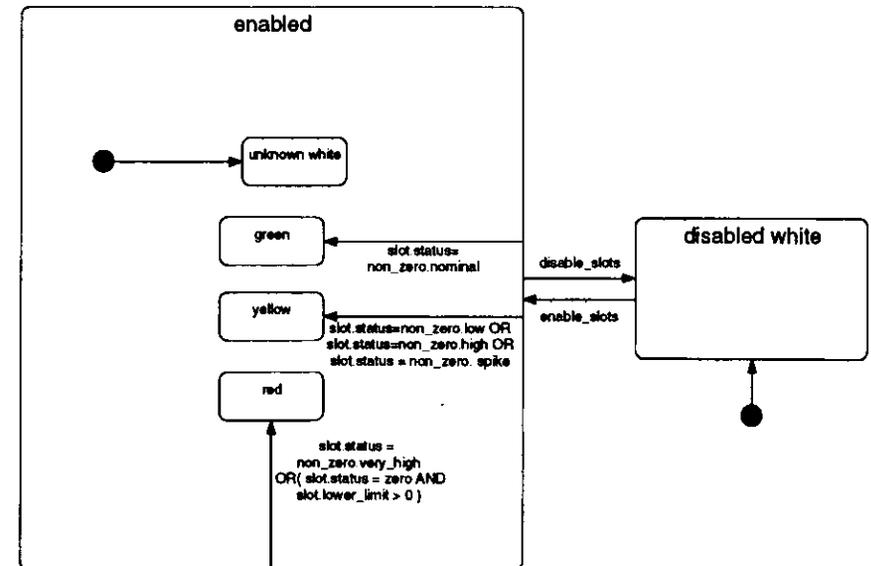


Abbildung 4.16: Harel-Diagramm der im Text beschriebenen Zustände der Statuslampe eines Triggerslots.

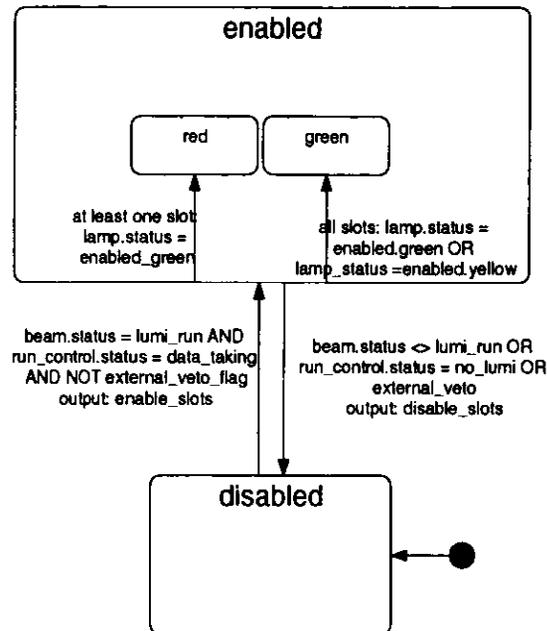


Abbildung 4.17: Modellierung des globalen GFLT-Status.

4.2.2 Die grafische Benutzerschnittstelle

In Abb. 4.19 ist die Ansicht der Triggerüberwachung in ZEX dargestellt. Die Bildschirmseite gibt einen Überblick über alle 64 Trigger-Kanäle. Für jeden Kanal ist die oben beschriebene Statuslampe dargestellt, und als Bezeichnung neben der Lampe die momentane Triggerlogik angegeben. Durch einen Mausklick auf die Statuslampe öffnet sich für den jeweiligen Triggerkanal ein neues Fenster auf dem Bildschirm (Abb. 4.20), welches den Verlauf der Triggerrate für die letzten 40 Minuten zeigt, außerdem werden die obere und untere Bandgrenze mit eingezeichnet. Mit Hilfe der errechneten Bandparameter werden innerhalb des Expertensystems die zulässigen momentanen Ratenbereiche alle 60s neu berechnet. Im Textfenster unterhalb der grafischen Darstellung werden Meldungen ausgegeben, die den Zustand des Trigger-Kanals näher erläutern. Außerdem kann die momentane Eingangs- sowie die akzeptierte Rate hier abgelesen werden. Durch die Verwendung einer grafischen Oberfläche ist es möglich, beliebig viele Fenster zu öffnen, um so am Bildschirm mehrere Trigger-Kanäle gleichzeitig darzustellen. So ist es auch möglich, aufgrund von Vergleichen mögliche Fehlerquellen festzustellen.

Die Bildschirmdarstellung von ZEX enthält am linken sowie am oberen Bildschirmrand eine permanent sichtbare Leiste, auf der systemrelevante Schlüsselinformationen dargestellt werden. Diese Leiste ist um eine Schaltfläche für den GFLT erweitert worden, welche rot eingefärbt wird, sobald mindestens ein Trigger-Kanal den Status **very high** oder **zero** hat. Durch Mausklick

auf diese Statusfläche ist es von jeder Bildschirmseite innerhalb des Expertensystems möglich, auf die Überblickseite der GFLT-Überwachung zu gelangen. Abbildung 4.18 zeigt die Struktur, in der die Bildschirmseite innerhalb von ZEX angeordnet sind.

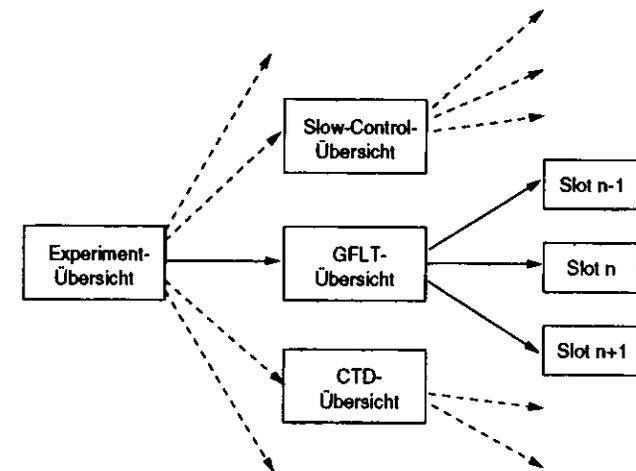


Abbildung 4.18: Schematische Darstellung der Anordnung der einzelnen Bildschirmseiten von ZEX. Von einer globalen Experimentübersicht ist es möglich, auf Komponenten- oder Systemebene zu gelangen. Innerhalb der GFLT-Übersicht ist eine Darstellung der einzelnen Triggerkanäle möglich.

Außerdem ist es möglich, die Bänder in einer Darstellung wie in Abb. 4.10, 4.11 zur Kontrolle auf dem Bildschirm anzuzeigen oder auszudrucken.

4.2.3 Automatische Neukonfiguration bei veränderter Triggerlogik

Jede Änderung der Triggerkonfiguration macht es notwendig, neue Schranken für ZEX-GFLT zu bestimmen. Dies ist, sofern es interaktiv geschieht, eine zeitaufwendige Routinearbeit, die den Vorteil einer Beurteilung der Triggerraten durch eine Software zum Teil wieder zunichte macht, da jetzt ein Mitglied der Bedienermannschaft neue Bänder bestimmen muß. Aus diesem Grunde wurde die Bestimmung neuer Bänder automatisiert. Mit Hilfe eines Programms ist es möglich, die Berechnung aller Bänder ohne interaktiven Eingriff vornehmen zu lassen, als Ergebnis liegt dann eine Datei vor, welche eine grafische Darstellung der Bänder wie in Abb. 4.10 enthält, sowie eine Konfigurationsdatei, welche die Parameter der Bänder enthält und direkt vom Expertensystem eingelesen werden kann. Vor Start dieses Programms sind lediglich zwei Konfigurationsdateien zu erstellen, welche die Nummern der Kanäle enthalten, für die lediglich eine Obergrenze bestimmt werden soll und in der für jeden Kanal eingetragen wird, welches der erste zu berücksichtigende Run für die Bandbestimmung ist.

4.3 Erste Betriebserfahrungen

Ein komplexes System wie die Überwachung des First-Level-Triggers ist ein Beispiel, daß auch unüberschaubare Systeme mit Hilfe von formalen Methoden übersichtlich beschrieben werden können. Die Umsetzung der Harel-Diagramme in ein lauffähiges Modul für ZEX hat ca. 5 - 10% der gesamten Entwicklungszeit beansprucht. Nach einer kurzen Phase der Fehlerbereinigung ist die erste Version von ZEX-GFLT im Oktober 1996 im ZEUS-Kontrollraum installiert worden. Vor dem Entwurf mit Hilfe von Harel-Diagrammen hat es den Versuch gegeben, auf herkömmliche Weise die Regeln für die Triggerüberwachung zu formulieren. Hier beanspruchte die eigentliche Programmierarbeit mehr als 50% der gesamten Entwicklungszeit, da sie zu einem großen Teil dem Zyklus "Programmieren → Ausprobieren → Fehlersuche" gehorchte. Durch mangelnde Dokumentationen gelang es auch dem Urheber der Software nach mehreren Wochen der Pause nicht mehr, seine programmierten Regeln auf Anhieb zu verstehen und zu ändern. Im Einsatz hat sich der Ansatz der Banddefinition mit Hilfe des truncated-mean-Verfahrens bewährt. Erste Tests haben ergeben, daß die gewählten Schranken sinnvoll sind und den normalen Betriebszustand der Triggerkanäle realistisch wiedergeben. Im normalen Betrieb des Detektors sind durchschnittlich ca. 70 - 80 % der Triggerkanäle im nominalen Zustand, ein Indiz, daß die momentanen Banddefinitionen ein richtiger Ansatz sind. Der gelbe Zustand ist nicht beunruhigend, da dies bedeutet, daß eine Rate kurzzeitig oder nur gering außerhalb der Schranken liegt. Ein Übergang in diesen Zustand kann z.B. auf erhöhten Untergrund hinweisen. Der sofortige Übergang in den roten Zustand bei einem kurzzeitigen Spike der Triggerrate wird durch die Verwendung einer Timerfunktion sorgfältig unterdrückt, eine notwendige Forderung, um ein unruhiges Blinken einzelner Triggerlampen zu vermeiden. Dies hätte zur Folge, daß diese Lampen nicht beachtet würden, da eine kurzzeitige Überschreitung oder eine kurzzeitige Nullrate kein Grund zur Besorgnis sind.

Bei 11 Triggerkanälen war keine luminositätsabhängige Banddefinition notwendig, für diese Kanäle wurde lediglich eine obere Schranke ermittelt.

Die Wartbarkeit und Erweiterbarkeit ist ein wichtiger Aspekt der Modellierung mit Harel-Diagrammen. Die Klasse `global lamp` wurde nach der ersten Inbetriebnahme von ZEX-GFLT hinzugefügt. Aufgrund der konsequenten Modellierung war diese Erweiterung leicht und schnell durchzuführen.

Eine Fehlersuche gestaltet sich durch die Relation Zustandsübergang ↔ Regel einfach, da die Fehlersuche systematisch anhand der Harel-Diagramme durchgeführt werden kann.

ZEX-GFLT ist durch die übersichtliche Darstellung der 64 Triggerkanäle eine Erleichterung für die Bedienermannschaft, die 'auf einen Blick' feststellen kann, welche Trigger anomales Verhalten zeigen. Durch die übersichtliche Darstellung ist es für erfahrene Bediener möglich, aus der Kombination verschiedener Kanäle die Ursache für ein Fehlverhalten zu finden. Die Formulierung solcher Korrelationen im Expertensystem wäre ein möglicher nächster Schritt der Erweiterung der Triggerüberwachung.

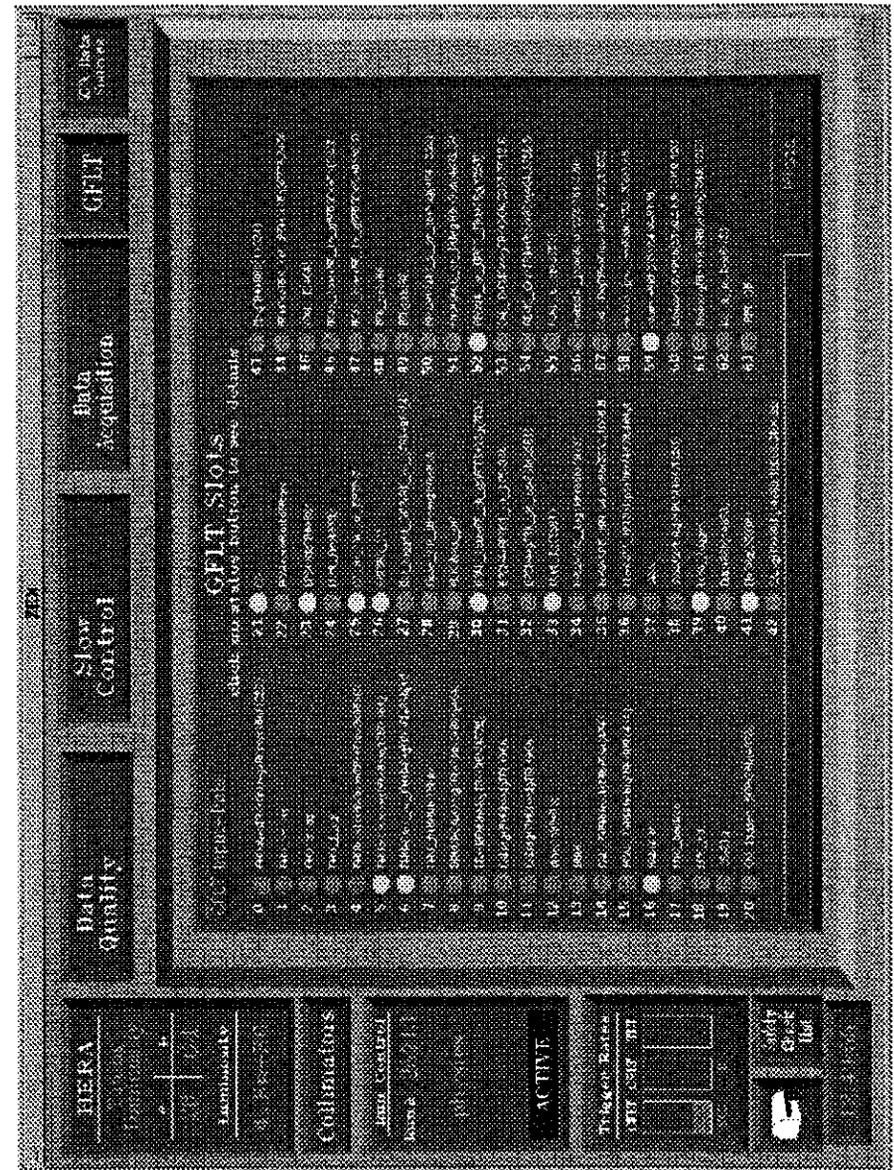


Abbildung 4.19: Darstellung der 64 Statusanzeigen der First Level Trigger Kanäle in ZEX. Eine Statuslampe signalisiert durch unterschiedliche Farben leicht erfassbar den momentanen Zustand der einzelnen Kanäle.

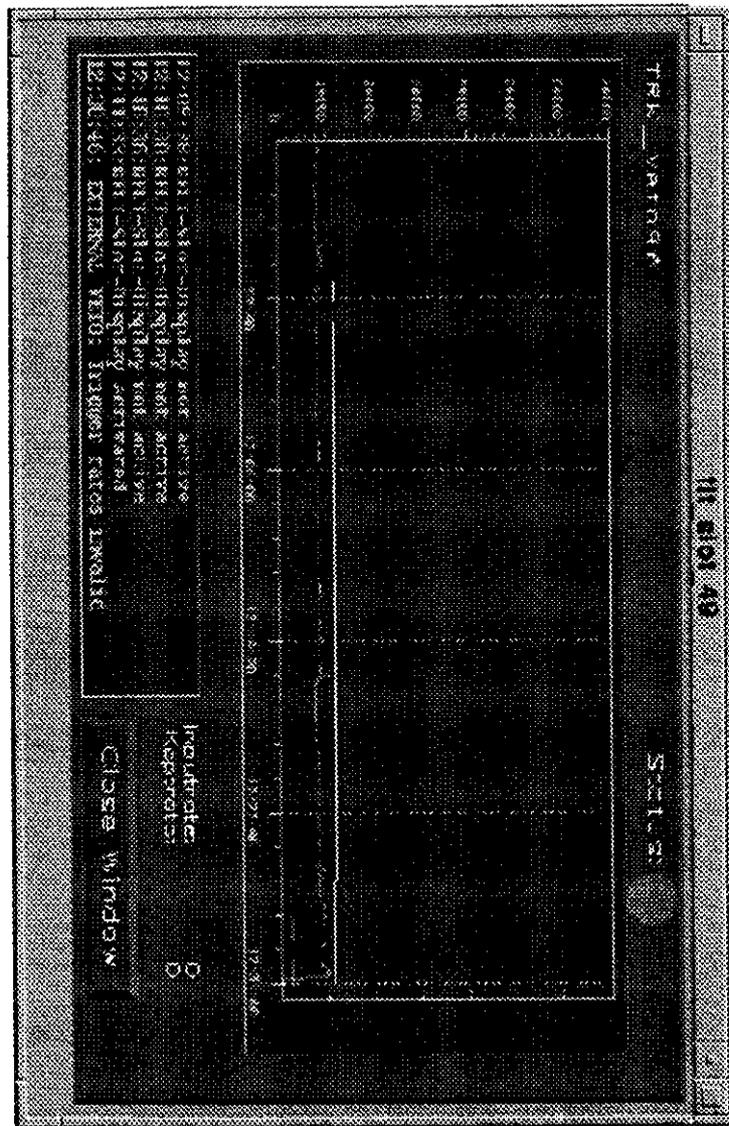


Abbildung 4.20: Darstellung der Detailanzeige eines Triggerkanals in ZEX. Im oberen Bereich ist eine grafische Darstellung der Triggerrate der letzten 40 Minuten gezeigt. Hier werden die obere und untere Bandgrenze mit eingezeichnet. Im unteren Bereich werden Fehler- oder Statusmeldungen ausgegeben. Außerdem kann die Eingangs- sowie die akzeptierte Rate hier abgelesen werden.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Modul zur Überwachung der Positionen der Elektronenkollimatoren sowie ein Modul zur Überwachung und Klassifizierung der First Level Triggerraten mit dem ZEUS-Expertensystem ZEX entwickelt und in Betrieb genommen.

ZEX-COLLIMATOR ist die erste grafische Überwachung der Kollimatorpositionen im ZEUS-Kontrollraum. Es wird überwacht, ob die Kollimatoren bei Beschleunigung der Elektronen korrekt zufahren und während des Luminositätsbetriebs geschlossen bleiben. Eine grafische Darstellung erlaubt das schnelle Erfassen des momentanen Status durch die Bedienermannschaft.

Am Modul ZEX-COLLIMATOR wurde ein Verfahren demonstriert, welches erlaubt, Verhaltensstrategien mit regelbasierten Programmen nachzuvollziehen. Mit Hilfe der objektorientierten Analyse ist es möglich, ein komplexes System in Teilsysteme mit definierten Schnittstellen zu zerlegen. Das Verhalten der einzelnen Teilsysteme läßt sich durch Harel-Diagramme beschreiben. Harel-Diagramme beschreiben ein System mit Hilfe von endlichen Zustandsübergangsautomaten. Da jeder Zustandsübergang genau einer Regel entspricht, ist eine einfache und direkte Umsetzung dieser Harel-Diagramme in Regeln möglich.

Das Modul ZEX-GFLT gestattet eine Überwachung der Eingangsraten des Global First Level Triggers (GFLT). Es steht eine grafische Oberfläche zur Verfügung, die mit einer farblichen Visualisierung ein schnelles Erfassen des momentanen Status der 64 Triggerkanäle ermöglicht. Mit Hilfe automatisch ermittelter luminositätsabhängiger Schranken ist es möglich, eine Bewertung der Triggerraten mit dem Expertensystem durchzuführen. Dies ist ein Schritt hin zur Entlastung der Bedienermannschaft des ZEUS-Detektors, die in der Vergangenheit in regelmäßigen Abständen mit Hilfe von Musterverteilungen eine Beurteilung der Raten vornehmen mußte. Die Triggerraten des GFLT werden als ein Regressionspolynom zweiten Grades als Funktion der Luminosität angepaßt, wobei die Methode des 'truncated-mean' verwendet wurde, um den Einfluß von Ausreißern auf die Ermittlung der Regressionsfunktion zu reduzieren. Mit Hilfe der Regressionsparameter wird eine Region einer definierten Bandbreite bestimmt, welche die Verteilung der zulässigen Triggerraten als Funktion der Luminosität einschließt.

Die Analyse und formale Beschreibung der Triggerüberwachung in ZEX wurde ebenfalls mit der Methode der Harel-Diagramme durchgeführt.

Seit Ende der Runperiode 1996 ist im ZEUS-Kontrollraum die Überwachung der Triggerraten installiert, erste Tests haben ergeben, daß das gewählte Verfahren der Definition von oberen und unteren Schranken das Verhalten der Triggerraten realistisch beschreibt.

Im Betrieb wurde beobachtet, daß durch die formale Beschreibung und Dokumentation mit Klassen- und Harel-Diagrammen eine gute Wartbarkeit sowie eine strukturierte Erweiterbarkeit erreicht werden kann. Durch die Dokumentation ist eine einfache Implementation weiterer Funktionalitäten möglich, auch andere Entwickler können die entstandenen Dokumente

zur Erweiterung nutzen. Die Verwendung eines formalen Verfahrens zum Softwareentwurf hat zur Folge, daß ein System vor der Implementation 'auf dem Papier' entworfen und geprüft wird. Die eigentliche Implementation erfordert nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Entwicklungszeit. Aufgrund der sorgfältigen Analyse und Dokumentation ist auch die Phase der Fehlerbereinigung wesentlich kürzer im Vergleich zu undokumentierten Entwicklungen.

Durch die Verwendung formaler Beschreibungsmethoden ist ein Entwicklung von Modulen für das Expertensystem in direkter Zusammenarbeit mit den Experten möglich, da die Syntax der grafischen Darstellungen schnell erfaßt werden kann. Eine Analyse des Regelquellcodes ist dagegen aufgrund der nicht leicht verständlichen Syntax und aufgrund der Unübersichtlichkeit und Komplexität mit Schwierigkeiten verbunden und sehr zeitaufwendig.

Literaturverzeichnis

- [Bai97] D. Bailey, 1997. persönliche Mitteilung.
- [Bal95] H. Balzert. *Methoden der objektorientierten Systemanalyse*. BI Wissenschaftsverlag, 1995.
- [BFH92] U. Behrens, M. Flasiniski and L. Hagge. ZEXP – Expert System for ZEUS, 1992. DESY 92-141.
- [BFHO94] U. Behrens, M. Flasiniski, L. Hagge and K. Ohrenberg. ZEX – an Expert System for ZEUS. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 41:152 – 156, 1994.
- [BFJ+96] U. Behrens, M. Flasiniski, J. Jurek, L. Hagge and K. Ohrenberg. Recent Developments of the ZEUS Expert System ZEX. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 43:65 – 68, 1996.
- [BHSV92] U. Behrens, L. Hagge, T. Schlichting and W.O. Vogel. Status of the ZEUS Eventbuilder, 1992. ZEUS-note 92-054.
- [BHV93] U. Behrens, L. Hagge and W.O. Vogel. The Eventbuilder of the ZEUS-Experiment. *Nucl. Instrum. Methods, A* 332:233 – 262, 1993.
- [BL93] V. Blobel und E. Lohrmann. Statistische und numerische Methoden der Datenauswertung I. Vorlesungsskript Universität Hamburg, 1993.
- [Boo94] G. Booch. *Objektorientierte Analyse und Design*. Addison-Wesley, 1994.
- [Cou95] O. Couet et al. *PAW – Physics Analysis Workstation*. CERN, Genf, Schweiz, 1995.
- [Fla94] M. Flasiniski. Further Development of the ZEUS EXPERT SYSTEM: Computer Science Foundations of Design. DESY 94-048.
- [H1 93] H1 Kollaboration, I. Abt et al. The H1 Detector at HERA. *DESY*, 103, 1993.
- [Har88] D. Harel. On visual formalisms. *Communications of the ACM*, 31(5):514–530, 1988.
- [HER93] HERMES Kollaboration. Technical design report, DESY-PRC 93/06 (1993).
- [HU90] J.E. Hopcroft und J.D. Ullman. *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*. Addison-Wesley, 1990.
- [Jac83] J.D. Jackson. *Klassische Elektrodynamik*. de Gruyter, 1983. 2. Auflage.
- [Jac90] P. Jackson. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley, 1990.

- [Kri94] HERA-B Kollaboration (P. Krizan et al.). HERA-B, An Experiment to study CP Violation at the HERA Proton Ring using an Internal Target. *Nucl. Instrum. Methods A*, 351:111-131, 1994.
- [Mai95] J. Mainusch. *Measurement of the Total Photon-Proton Cross-Section at HERA Energies*. Dissertation, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, 1995.
- [Mil95] J. Milewski. The new run control system: states, transistions, protocols, 1995. ZEUS-note 95-008.
- [Ohr93] Kars Ohrenberg. Entwicklung des Prototypen eines Echtzeit-Expertensystems zur Diagnose von Fehlern in der ZEUS-Datennahme, 1993. Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- [Pio93] K. Piotrkowski. *Experimental aspects of the luminosity measurement in the ZEUS experiment*. PhD thesis, Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland, 1993.
- [RAT95] RATIONAL Software Corporation, Santa Clara, CA. *Rational Rose Application Notes*, 1995.
- [Sch96] U. Schneekloth, 1996. persönliche Mitteilung.
- [Smi90] W.H. Smith et al. The ZEUS trigger system, 1990. ZEUS-note 89-084.
- [Sta95] W.A. Stahel. *Statistische Datenanalyse*. Vieweg, 1995.
- [Tal95] Talarion Corporation, Mountain View, CA. *RTworks 3.5 (User Documentation)*, 1995.
- [Tok96] K. Tokushuku, 1996. persönliche Mitteilung.
- [Wii91] B. H. Wiik. HERA status. In W. Buchmüller and G. Ingelmann, editors, *Physics at HERA*, volume 1, page 1, Proceedings of the Workshop held at DESY, Hamburg, October 29 - 30, 1991.
- [Win92] P. H. Winston. *Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, 1992.
- [ZEU93] ZEUS Collaboration. *The ZEUS Detector, Status Report 1993*.

Danksagung

An dieser Stelle möchte all denen danken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. E. Lohrmann, der es mir ermöglichte, diese abwechslungsreiche und interessante Diplomarbeit im Rahmen des ZEUS-Experiments zu erstellen.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Ulf Behrens, Lars Hagge und Kars Ohrenberg für die ausgezeichnete Betreuung meiner Arbeit. Lars danke ich insbesondere für die vielen fruchtbaren Diskussionen über objektorientierte Analysemethoden.

Bedanken möchte ich mich auch bei Hans Kammerlocher für die finanzielle Unterstützung, die mir im Rahmen einer interessanten Nebentätigkeit im Rechenzentrum gewährt wurde.

Weiterhin danke ich Kars Ohrenberg und Dirk Westphal für die angenehme Bürogemeinschaft und insbesondere Kars für viele interessante Diskussionen und Teerunden, auch abseits der Wissenschaft.

Herrn Prof. Dr. R. Klanner danke ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die meine Zeit außerhalb des DESY mit Leben füllen: Jan, Kirsten, Malte, Marion, Steffi, Robert und ganz besonders danke ich Andrea für ihre immerwährende Unterstützung.